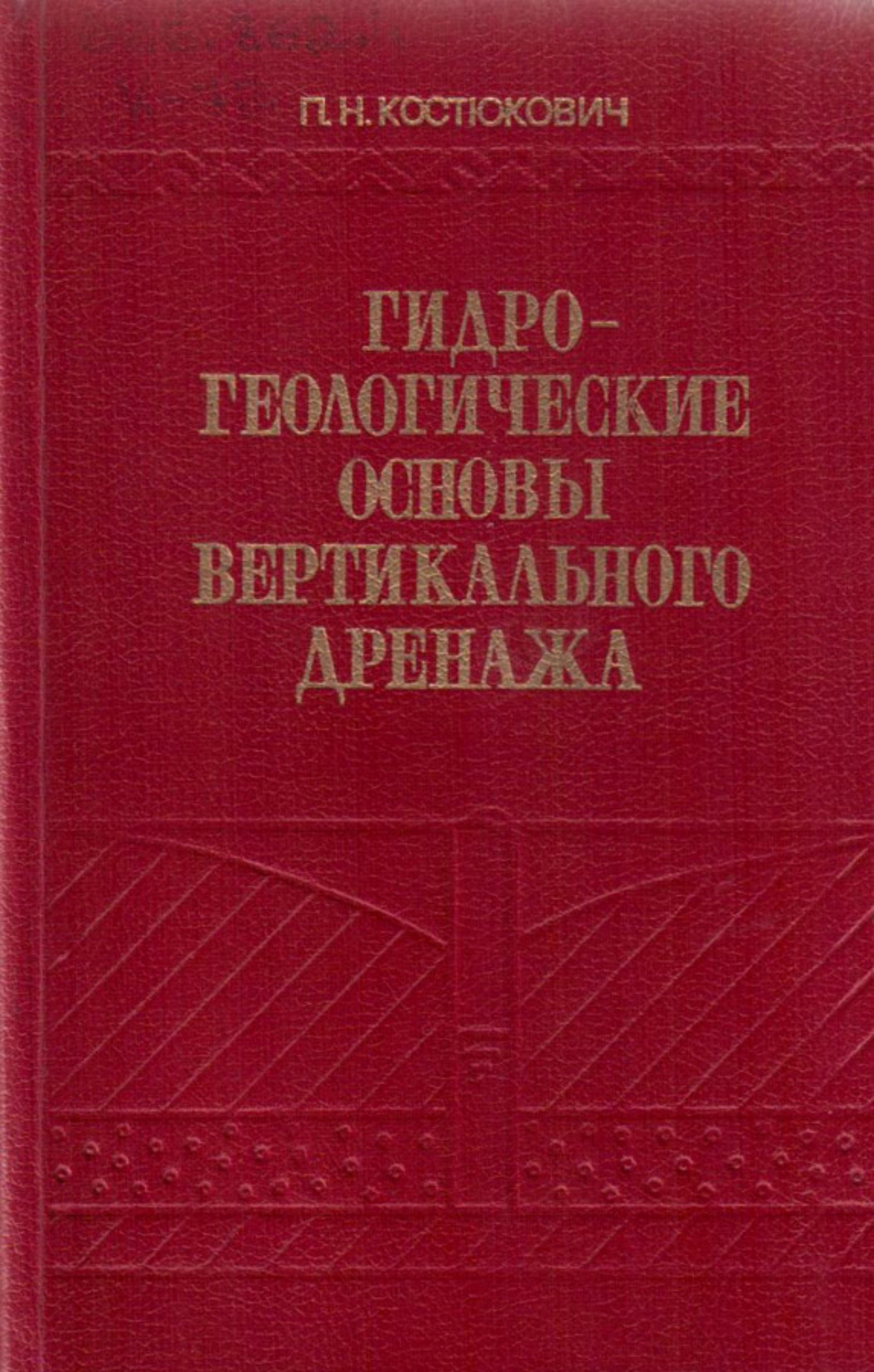
П. Н. КОСТЮКОВИЧ

ГИДРО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА



626.862.4
К-72

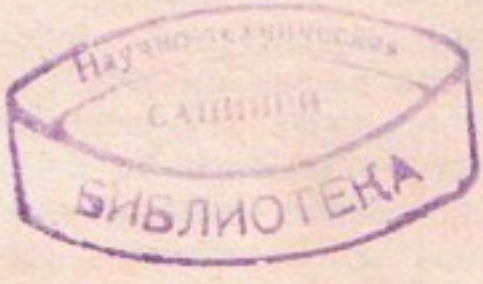
МИНИСТЕРСТВО МЕЛИОРАЦИИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА СССР
БЕЛОРУССКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕЛИОРАЦИИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

П. Н. КОСТЮКОВИЧ

ГИДРО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

59733

Под редакцией
члена-корреспондента АН БССР
С. Х. Будыки



МИНСК «НАУКА И ТЕХНИКА» 1979

551.49
К72
УДК 631.674.3+556.332.042

Костюкович П. Н. **Гидрогеологические основы вертикального дренажа.** Мн., «Наука и техника», 1979, 288 с.

В книге впервые излагаются гидрогеологические основы применения вертикального дренажа в осушительно-увлажнительных системах Белорусского Полесья. Приводится обширный материал натурных исследований осушительного действия вертикального дренажа на низинных торфяниках. Анализируются известные и предлагаются новые методы оценки несовершенства возмущающих скважин и определения гидрогеологических параметров пластов по данным опытных откачек при установившемся и неустановившемся режиме. Большое внимание уделяется также физике движения подземных вод, теоретическим проблемам мелиоративной гидрогеологии и обратным задачам подземной гидродинамики.

Книга предназначена для мелиораторов-гидротехников, гидрогеологов, горных инженеров, специалистов по водоснабжению и проектированию дренажных, водозаборных, водопонижающих и нефтяных скважин.

Таблиц 22. Иллюстраций 93. Библиография — 139 названий.

Рецензенты:

кандидат технических наук П. И. Закржевский,
кандидат технических наук В. П. Ильин

20806—161
К———110—79 3303000000
М316—79

© Издательство «Наука и техника», 1979.

ОТ РЕДАКТОРА

В настоящее время мелиоративное и водохозяйственное строительство в гумидной зоне страны приобрело региональный характер. В этих условиях оптимальный водный режим осушаемых земель могут обеспечить прежде всего мелиоративные системы периодического действия, основанные на механическом водоподъеме и широко оснащенные подземными трубопроводами. Вертикальный дренаж обладает основными свойствами таких систем и давно вызывал большой интерес у практиков и исследователей. Поэтому в зоне Припятского Полесья были проведены натурные испытания различных модификаций мелиоративных систем на базе вертикального дренажа. Результаты гидрогеологических исследований, выполненных по этой программе, и легли в основу предлагаемой читателю книги.

Целесообразность издания отдельной работы по гидрогеологическому обоснованию вертикального дренажа вызвана еще и тем, что общий уровень гидрогеологического и водобалансового обоснования мелиоративных проектов во многих случаях продолжает оставаться весьма низким, хотя уже имеются примеры блестящего использования гидрогеологических методов для выбора оптимальных вариантов мелиоративных систем на болотах с различными гидрогеологическими условиями. В этом отношении данная книга явится заметным вкладом в литературу по осушительно-увлажнительным мелиорациям и мелиоративной гидрогеологии.

Обширные материалы натурных исследований гидрогеологических параметров, дренажных скважин и неустановившейся гравитационной фильтрации, приведенные в книге, делают ее, на наш взгляд, полезным пособием для широкого круга читателей, чьи интересы связаны с созданием новых мелиоративных систем, обратными методами подземной гидродинамики, физикой движения подземных вод и другими вопросами гидрогеологических расчетов мелиоративных систем.

С. Х. БУДЫКА

Светлой памяти моего учителя
Василия Михайловича
Максимова
посвящаю

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одна из актуальнейших проблем современных осушительно-увлажнительных мелиораций — разработка оптимальных вариантов бассейновых схем мелиорации и создание технически совершенных и экономичных мелиоративных систем периодического действия, позволяющих регулировать водный режим осушаемых земель на больших территориях и в любые по водности годы. Существующие же мелиоративные системы, как правило, основаны на самотечной проводящей сети, выполняемой в виде непрерывных магистральных каналов, и в большинстве случаев не решают этой задачи, поскольку работают на сброс круглый год. Это приводит к тому, что под действием проводящей сети и отрегулированных водоприемников ранее переувлажняемые или заболачиваемые земли нередко переосушаются и появляется настоятельная необходимость в широком применении дополнительного увлажнения этих земель. В итоге данные мелиоративные системы в водобалансовом отношении становятся несовершенными и приводят к негативным последствиям как экономического, так и экологического характера. В этих условиях вопросы гидрогеологического обоснования мелиоративного и водохозяйственного проектирования приобретают первостепенное значение. Особенно они важны применительно к мелиоративным системам, основанным на различных сочетаниях горизонтального дренажа с вертикальным. Объясняется это тем, что граничные условия водоносных горизонтов, наблюдаемые на стадии гидрогеологических съемок и изысканий, в периоды строительства и эксплуатации вертикального дренажа претерпевают существенные изменения и становятся неустойчивыми функциями интенсивности и продолжительности дренирования. Следовательно, для повышения достоверности исходной гидрогеологической информации необходимо устанавливать закономерности изменения граничных условий водоносных пластов, которые будут иметь место при запланированном водоотборе, и далее проектирование дренажа вести с учетом этих закономерностей.

Указанные обстоятельства, а также многолетний опыт изучения работы дренажных скважин на осушаемых железо-

рудных месторождениях КМА и водозаборах БССР были использованы при разработке методологии проведения натурных и теоретических исследований по оценке возможности и масштабов применения вертикального дренажа в осушительно-оросительных системах Белорусского Полесья. Результаты выполненных исследований и легли в основу настоящей монографии.

В отличие от традиционных книг по динамике подземных вод, насыщенных строгими решениями уравнений фильтрации для идеальных граничных условий, обычно не встречающихся в реальных пластах, данная работа содержит прежде всего обширные материалы натурных исследований неустановившегося движения подземных вод. Эти материалы могут служить основой для апробации и совершенствования существующих моделей неустановившейся напорной и гравитационной фильтрации в условиях водообмена между пластами и, несомненно, будут полезными при разработке новых уравнений неустановившихся фильтрационных потоков с присоединяющимися и отсоединяющимися путевыми расходами и неустойчивыми граничными условиями возмущенного и смежных пластов.

Особое внимание в книге уделено тем разделам подземной гидродинамики, которые имеют непосредственное отношение к проектированию вертикального дренажа и в то же время слабо освещены в имеющейся литературе. Важнейшие из них: 1) неустойчивость расчетных значений гидрогеологических параметров при изменении интенсивности и продолжительности дренирования водоносных горизонтов; 2) существование пьезометрического разрыва уровней ΔS на стенке возмущающей артезианской скважины и связь ΔS с коэффициентами обобщенного сопротивления (несовершенства) скважины; 3) неустановившиеся фильтрационные сопротивления возмущающих скважин и оценка их составляющих, оказывающих различное влияние на точность определения пьезопроводности и проводимости пласта; 4) влияние дестабилизирующих граничных сопротивлений на неустойчивость фильтрационных потоков (и в частности, закона Дарси) в пермеаметрах; 5) закономерности изменения расчетных значений гидрогеологических параметров в зоне регулярного режима и за ее пределами в реальных пластах, гидравлически связанных со смежными пластами, и учет этих закономерностей в виде поправок водообмена (перетекания) к теоретическим моделям водоносных горизонтов; 6) определение гидрогеологических параметров с помощью преобразования $S_{rt}=f[\ln(t/r^{2-\lambda})]$, в котором пара-

метр λ является водобалансовой поправкой к основной формуле теории упругого режима.

Идеи, изложенные в книге, неоднократно обсуждались на различных конференциях и семинарах. При этом наиболее ценные замечания и советы были получены от В. М. Максимова, Г. В. Богомолова, Н. Ф. Бондаренко, С. Х. Будыки, Н. И. Толстихина, В. А. Мироненко, В. А. Кирюхина, В. Д. Ломтадзе, И. Е. Жернова, В. М. Шестакова, В. Е. Алексеевского, А. С. Василевского, В. И. Фоменко, У. Умарова, Ю. Б. Осипова, В. Т. Трофимова. Большое влияние на методологию и направленность исследований оказали работы А. И. Силина-Бекчурина, Е. М. Сергеева, В. А. Кудрявцева, И. В. Попова, О. К. Ланге, Г. С. Золотарева, С. С. Морозова, Г. А. Голодковской. Всем им я глубоко признателен.

Большую помощь в работе над рукописью оказали рецензенты П. И. Закржевский и В. П. Ильин, которым я бесконечно благодарен.

Особую признательность я выражаю В. Ф. Карловскому за неизменную поддержку в работе.

ВВЕДЕНИЕ

В системе мер по интенсификации сельскохозяйственного производства первостепенная роль отводится комплексной мелиорации земель. Это можно проиллюстрировать на примере Белоруссии, где за период после майского (1966) Пленума ЦК КПСС мелиорировано более 1,3 млн. га заболоченных и переувлажненных земель, т. е. столько, сколько их было мелиорировано за предыдущие 100 лет. В условиях республики еще нуждаются в инженерных мелиорациях более 35% площадей сельскохозяйственного использования. На этих землях весенние полевые работы проводятся с опозданием на две-четыре недели даже в нормальные по влажности годы. В годы же с повышенной влагообеспеченностью эти земли практически выпадают из сферы сельскохозяйственного производства.

Особенно в широких масштабах проводится комплексная гидромелиорация земель в Белорусском Полесье. Здесь насчитывается 2,7 млн. га заболоченных и переувлажненных массивов, что составляет 44% территории. Мировая практика не имеет, пожалуй, опыта преобразования природы такой обширной территории. К настоящему времени для нужд сельского хозяйства осушено более 1 млн. га. В перспективе доля мелиорируемых земель в производстве продуктов питания резко возрастет, поскольку осушение заболоченных водосборов и в дальнейшем намечается проводить ускоренными темпами (в среднем по 60—80 тыс. га осушаемых и 20—30 тыс. га орошаемых земель в год). К тому же надо иметь в виду, что осушенные торфяники—это богатые перегноем почвы. При внесении удобрений и оптимальном водном режиме они могут превосходить по плодородию знаменитые черноземы Кубани. Это говорит о том, что есть все основания превратить заболоченную Полесскую низменность в один из плодороднейших районов страны.

Всевозрастающие масштабы мелиоративного строительства и интенсификации земледелия (мелиорированный гектар должен давать 50 ц зерна и более) требуют, чтобы технико-экономический уровень мелиоративных систем соответствовал

перспективам развития сельского хозяйства и в то же время позволял в широких пределах осуществлять комплексное использование водных ресурсов (и прежде всего дренажного стока). Поэтому вопросы технической политики по многим коренным показателям мелиорации земель стали упираться в прежние мировоззрения, которые базировались на небольших объемах мелиорации и несущественном влиянии на природный комплекс. Возникла необходимость в совершенствовании принципиальных аспектов технической политики [106].

В этой связи целесообразно привести выводы, полученные академиком С. Г. Скоропановым при обобщении опыта мелиорации земель Белоруссии: «Совсем не случаен тот факт, что урожай на мелиорированных почвах по годам колеблется в больших пределах... Анализ причин этого позволяет заключить, что неустойчивые по годам урожаи — в основном прямое следствие неотрегулированного водного режима почв» [117].

Изучение вопросов создания осушительно-увлажнительных систем привело исследователей к выводу, что горизонтальный дренаж обладает весьма ограниченными способностями для выполнения многих (и прежде всего обратных) функций систем двустороннего действия. Академик С. Ф. Аверьянов по этому поводу писал, что *осушительные системы, рассчитанные на своевременный отвод избыточных вод, в современном их виде, как правило, не могут обеспечить обратное регулирование водного режима (например, подпором горизонтов воды)* [1].

Известный исследователь теории и технологии двустороннего регулирования водно-воздушного режима осушаемых болот и заболоченных земель профессор А. М. Янголь дает аналогичную оценку осушительно-регулирующему действию горизонтального дренажа, считая, что водный режим осушаемых болот зависит в основном от погодных условий. Неустойчивый водный режим сказывается на урожайности сельскохозяйственных культур таким образом, что наиболее высокие урожаи бывают в средние годы, наиболее низкие — в засушливые. Следовательно, одностороннее осушение, при котором водный режим создается стихийно, не обеспечивает получения устойчивых урожаев. Этим подтверждаются выводы о необходимости дополнительного увлажнения, вытекающие из показателей баланса почвенной влаги [132, 133].

Таким образом, можно считать установленным, что одностороннее действие самотечного горизонтального дренажа во многих случаях приводит к переосушению мелиорируемых

почв (в основном именно отсюда и вытекает необходимость в дополнительном увлажнении осушенных земель). Как отмечалось выше, переосушение происходит прежде всего из-за того, что мелиоративные системы рассчитываются на интенсивное дренирование заболоченных и переувлажненных земель в течение предпосевного периода многоводного года (иначе они не обеспечат своевременного отвода избыточных поверхностных и грунтовых вод). Это означает, что в остальные периоды расчетного года и в остальные 9 из 10 лет осушение будет заведомо гарантировано [1].

Кроме того, что осушительная сеть проектируется с большим запасом (для своевременного отвода предпосевного стока), в переосушении земель не менее важную роль играют сам принцип действия и устройство мелиоративной системы. По своему существу эти системы являются постоянно действующими и включают, кроме осушительной, проводящую сеть из множества крупных каналов 1-го и 2-го порядков. Последние, будучи практически неуправляемыми, продолжают дренировать массив с прежней интенсивностью и после того, как в междуречьях к началу весенних полевых работ обеспечена предпосевная норма осушения и дальнейший сброс воды с массива противопоказан.

Рассмотренные факторы приводят к тому, что уровни грунтовых вод (УГВ) постепенно опускаются ниже осушительной сети, дрены «зависают» над ними и прекращается связь между капиллярной каймой и корнеобитаемым слоем почвы. При отсутствии осадков появляется дефицит влаги в почве и начинаются хорошо известные полесским земледельцам процессы переосушения земель и ветровой эрозии.

Получается очевидный парадокс: до заложения дренажа на заболоченном массиве наблюдался избыток влаги в почве, после проведения мелиоративных работ — переосушение полей и необходимость в их дополнительном увлажнении. Совершенно ясно, что дренаж сбрасывает с массива не только избыточную, но и необходимую растениям воду; кроме того, после опускания УГВ ниже критической нормы осушения (или критического УГВ по А. М. Янголю [133]) проводящая сеть начинает отводить динамические и статические запасы грунтовых вод, которые уже не участвуют в питании корнеобитаемого слоя почвы и в принципе не должны обращаться в дренажный сток. Поэтому последний можно назвать *забалансовым дренажным стоком.*

Здесь и далее при пользовании термином «критическая норма осушения» будем исходить из определения, данного

А. М. Янголем [133]: в верхнем горизонте на влажность почвы влияет только сравнительно близкое залегание УГВ от поверхности. С понижением этого уровня влажность почвы в одном и том же горизонте уменьшается. Если этот горизонт не пополняется влагой за счет осадков, то при дальнейшем снижении УГВ наступает такой момент, когда интенсивность суммарного испарения из такого горизонта превышает интенсивность капиллярного подпитывания грунтовыми водами. Таким образом, связь между влажностью почвы и УГВ нарушается. Уровень, при котором нарушается эта связь, можно назвать критическим. При критическом УГВ влажность почвы в верхнем горизонте зависит лишь от осадков и испарения. Критический уровень характеризует собой предельную норму осушения. Критический уровень отвечает влажности завядания, а норма осушения — оптимальной влажности почвы для данных культур.

Аналогично под оптимальной нормой осушения будем понимать переменную (или неодинаковую по А. М. Янголю) глубину залегания УГВ, которую необходимо поддерживать для обеспечения заданной влажности почвы в одних и тех же пределах, независимо от погодных условий. В засушливые годы и отдельные периоды одного года она должна быть меньше, а во влажные — больше по сравнению со средней нормой осушения [133].

Таким образом, осушительное действие одностороннего горизонтального дренажа приводит к формированию следующих дренажных стоков. При снижении УГВ до оптимальной нормы осушения отводятся избыточные поверхностные и грунтовые воды, приводящие к переувлажнению почвы. В этот период формируется *необходимый дренажный сток*. При дальнейшем опускании УГВ ниже оптимальной нормы осушения на глубину порядка 50 см (до критического уровня) происходит постепенный отрыв капиллярной каймы от корнеобитаемого слоя почвы и прекращается поток влаги от УГВ к этому слою. Начинается переосушение почвы, поскольку дренаж перехватывает источник грунтового питания и отводит необходимую растениям воду. В этот период формируется *избыточный дренажный сток*. Дальнейшее осушение массива приводит к образованию забалансового дренажного стока. Отсюда следует, что избыточный и забалансовый стоки играют основную роль в переосушении осушаемых земель и вызывают необходимость в их дополнительном увлажнении. Очевидно, величиной этих стоков можно характеризовать степень водобалансового несовершенства любой осушительной

системы. По этому принципу целесообразно выделить три типа осушительных систем.

1. **Совершенные осушительные системы,** характеризующиеся отсутствием избыточного и забалансового стоков. На этих системах переосушение земель не наблюдается ввиду поддержания оптимальной нормы осушения в течение всего вегетационного периода. Поэтому совершенными осушительными системами могут быть прежде всего системы периодического действия и управляемые, отводящие только необходимый дренажный сток.

2. **Несовершенные осушительные системы,** характеризующиеся отсутствием забалансового дренажного стока. На этих системах УГВ не опускаются до критической нормы осушения и наблюдается лишь слабое переосушение почвы. Поэтому острой необходимости в дополнительном увлажнении осушаемых земель здесь не ощущается.

3. **Весьма несовершенные осушительные системы,** характеризующиеся наличием постоянного избыточного стока и весьма часто формирующие забалансовый дренажный сток (прежде всего в засушливые и маловодные годы). На этих системах УГВ опускаются ниже критического уровня и при отсутствии осадков наблюдается сильное переосушение почвы. Поэтому данные осушительные системы в водобалансовом и экономическом отношениях весьма несовершенны. Даже в обычные по водности годы они приводят к переосушению сопредельных территорий, что вызывает необходимость в широком применении дополнительного увлажнения.

Следует отметить, что приведенная классификация мелиоративных систем по интенсивности дренирования осушаемых земель нуждается в дальнейшем совершенствовании и уточнении исходя из конкретных гидрогеологических и гидрологических условий, степени влияния масштабов осушения на устойчивость режима (типа) водного питания водосбора и т. д. К примеру, в условиях центральной части Белорусского Полесья мелиоративные системы мелкие и средние, занимающие небольшие территории, могут работать как несовершенные и даже совершенные в зависимости от водности года. Однако та же мелиоративная сеть, заложенная на крупных и сверхкрупных осушительных системах, в этих же условиях нередко будет проявлять себя как весьма несовершенная, поскольку режим водного питания осушаемого массива существенно изменится в результате непрерывного действия регулирующей и проводящей сети. Эти особенности работы мелиоративных систем различного масштаба требуют дифференцирован-

ного подхода к их проектированию и указывают на то, что поддержание оптимального водного режима на крупных осушительных системах является крайне сложной проблемой.

Изучение водного режима на типичных мелиоративных системах Полесья показало, что степень осушения водосборов во многих случаях определяет характер и устойчивость водного (и прежде всего грунтового) питания осушаемого массива, а следовательно, и выбор способа воздействия на УГВ и влажность почвы. Отсюда можно заключить, что с развитием региональной мелиорации возникает необходимость в непрерывном совершенствовании наших представлений об интенсивности и режиме водного питания осушаемых и прилегающих к ним территорий, о влиянии масштабов осушения на водный баланс водосборов, о взаимодействии поверхностных и грунтовых вод, о соотношении осушения и дополнительного увлажнения (или о принципах двустороннего регулирования водного режима в целом), о густоте осушительной и проводящей сети и т. д.

На современном этапе мелиоративного строительства рассмотренные факторы учитываются в проектах в виде величин, постоянных для данных природных и эксплуатационных условий. Однако в дальнейшем, по мере вовлечения в зону осушения новых массивов, эти факторы из констант, какими они являются в естественных условиях, будут превращаться в сложные функции, которые предстоит изучить. К примеру, граничные условия (или режим водного питания в общем случае) осушаемых территорий претерпят существенные изменения, определяемые степенью дренирования данного и соседних водосборов. Объясняется это тем, что при наличии гидравлической связи между горизонтами верхнего и нижнего водоносных комплексов неизбежно вовлечение подземных вод более глубоких водоносных горизонтов в зону дренирования и уменьшение их запасов. Естественное пополнение этих запасов будет происходить за счет дополнительного притока подземных вод из областей питания. Этот приток образуется благодаря перераспределению давления в водонапорном комплексе. В результате осушение одних болотных массивов вызовет понижение уровней на соседних водоразделах (областях питания), а через эти области скажется на уровнях и водном балансе других смежных массивов и т. д. [47].

Этот процесс интерференции (взаимодействия) осушенных и неосушенных территорий с областями питания приведет к тому, что нарушение природного соотношения между поверхностным и подземным стоками на осушенной терри-

тории будет постепенно распространяться к границам бассейна и за его пределы до тех пор, пока не установится новое гидродинамическое равновесие (баланс) между сбросом и поступлением воды в водоносные горизонты. Количественная оценка и прогнозирование этого явления могут быть выполнены на региональных моделях уровенного режима подземных и поверхностных вод, охватывающих несколько водосборов.

Применяемые способы осушения земель Полесья базируются на различных модификациях горизонтального дренажа и не позволяют регулировать УГВ на больших территориях без широкого привлечения зарегулированного поверхностного стока. Согласно схеме осушения и освоения земель Полесской низменности (1968), в Белорусском Полесье запланировано построить 17 крупных водохранилищ. В результате этого будет затоплено мелководьем 30 тыс. га плодородных низинных торфяников. С учетом потерь на фильтрацию и испарение из данных водохранилищ можно использовать для увлажнения сельскохозяйственных земель около 318 млн. м^3 воды. При норме орошения 400 м^3/га для года 75-процентной обеспеченности по осадкам за счет этих вод предусматривается увлажнить 795 тыс. га (всего в Белорусском Полесье запланировано увлажнить 1381 тыс. га земель с подачей 553 млн. м^3 воды из водохранилищ, рек и прудов; при этом суммарная площадь затопления водоемами составит 105 тыс. га).

Таким образом, отношение затапливаемых площадей к увлажняемым за счет зарегулированного стока составит: для всех водоемов в целом 1 : 13, для водохранилищ 1 : 27. Из этих отношений видно, что для сбережения земельных ресурсов использование водохранилищ для аккумулирования поверхностного стока в 2 раза выгоднее, чем использование мелких прудов. Аналогичные выводы можно сделать по экономической эффективности систем двустороннего действия, основанных на применении шлюзования с подачей воды из запланированных водоемов. Оценка этой эффективности должна включать в себя исследование неравенства: стоимость прибавки урожая с площади 27 (или 13) га, получаемого за счет дополнительного увлажнения, должна превышать сумму, состоящую из стоимости всего урожая с 1 га затапливаемых земель и стоимости строительства и эксплуатации увлажнительной системы на площади 27 (или 13) га. При этом экономические расчеты следует вести с учетом более реальных норм орошения (брутто), включающих потери воды при пода-

че ее по каналам от водоисточника к потребителю. Если же технико-экономический анализ систем двустороннего действия вести в строгой постановке, то, очевидно, необходимо вводить в расчеты стоимость 1 м³ воды, потребляемой на орошение (брутто) и сбрасываемой безвозвратно в виде избыточного и забалансового стоков.

Исследования В. Ф. Шебеко, А. И. Михальцевича, А. И. Еськова, К. С. Пантелея и других показывают, что в Полесье летом в маловодные годы для дополнительного увлажнения одного гектара осушенных земель необходимо использовать нерегулируемый сток с площади 100 га. Из водоемов, предусмотренных схемой, можно будет использовать для орошения и подпочвенного увлажнения не более 500—600 млн. м³ воды. При средней норме орошения 1000 м³/га этой воды будет достаточно лишь для 500—600 тыс. га, а если учесть потери подаваемой воды на фильтрацию и испарение, зависящие от длины и густоты водоподводящей сети, то эта площадь уменьшится еще на 20—40% и составит ~300—400 тыс. га. Таким образом, орошаемые зарегулированными водами осушаемые земли Белорусского Полесья составят не более 15—20% всех сельскохозяйственных угодий, требующих увлажнения [47]. Для орошения остальных 80—85% мелиорированных земель необходим дополнительный источник воды. Этим источником могут служить прежде всего подземные воды верхних (а при благоприятных гидрохимических показателях и более глубоких) водоносных горизонтов.

Таким образом, с учетом реальной нормы орошения отношение затапливаемых площадей к увлажняемым для всех водоемов в целом будет изменяться от 1 : 3 до 1 : 5. Следовательно, только для того, чтобы восполнить потери урожая с затапливаемых земель, прибавки урожая с орошаемых земель должны составлять не менее 20—30%. А если учитывать затраты на строительство и эксплуатацию увлажнительной системы, то для окупаемости этих затрат в нормативные сроки (10 лет) прибавки урожая от дополнительного увлажнения должны увеличиться еще в 2—3 раза. В то же время, как показывают исследования БелНИИМиВХ, даже на опытных делянках эти прибавки пока не превышают 25—35%. Поэтому сроки окупаемости капиталовложений на дополнительное увлажнение (притом без учета стоимости потерь урожая с затапливаемых и подтапливаемых земель и стоимости потерь воды в водоподводящих каналах) во многих колхозах и совхозах республики превышают нормативные. Здесь необходимо отметить, что затраты на строительство и эксплуатацию

оросительных и осушительно-увлажнительных систем на базе горизонтального дренажа очень велики (2000—4000 руб/га) и свидетельствуют о том, что дополнительное увлажнение осушенных земель является весьма дорогим средством повышения их продуктивности [90].

Приведенные примеры носят исключительно сравнительный характер и позволили сделать вывод о том, что осушительно-увлажнительные системы на базе горизонтального дренажа имеют крайне низкие технико-экономические и особенно водобалансовые показатели [47, 79]. В этой связи В. В. Ермоленко пишет, что соблюдение действующих технических условий при проектировании закрытых дрен и коллекторов приводит к чрезмерному (на 2,2—4,0 м) заглублению открытых коллекторов и магистральных каналов, а также рек-водоприемников (до 5 м). При такой глубине гидромелиоративной сети все ее элементы — от дрены до реки — участвуют в понижении УГВ. В условиях подстилания торфяников песчаными грунтами закрытый дренаж, предопределивший положение проводящей сети каналов в вертикальной плоскости, работает с минимальной нагрузкой (например, на осушенных землях ПОМС он практически не влияет на понижение УГВ). Такая конструкция коллекторно-дренажной сбросной сети создает крайне неравномерное (от 0,5 до 3,0 м) понижение УГВ на территории, не обеспечивает на всей площади нормальных условий для регулирования водного режима в нужных пределах даже при наличии водорегулирующих сооружений [35].

В связи с изложенным и возникает задача об отыскании таких систем периодического осушения и увлажнения, которые работали бы в соответствии с закономерностями сезонного колебания водного режима почв и, таким образом, позволяли бы не только отводить избыточные воды, но и создавать условия для накопления влаги в корнеобитаемом слое. Разработка таких систем — это решение сложнейшей проблемы по управлению УГВ в региональном масштабе. Только такие мелиоративные системы позволят свести до минимума или полностью исключить возможность переосушения заболоченных массивов и этим значительно уменьшат потребность в дополнительном увлажнении осушаемых земель.

Мелиоративными системами, которые удовлетворяют перечисленным условиям, могут служить прежде всего многочисленные варианты вертикального дренажа, а также всевозможные сочетания периодически действующих дренажных скважин с постоянно действующей открытой и закрытой го-

ризонтальной сетью. Иначе говоря, решение задачи необходимо искать в различных моделях комбинированных и управляемых дренажей, используя положительные стороны известных способов осушения, водопонижения, подтопления (шлюзования) и орошения, а также гидродинамические силы (напорность) водоносных пластов и быструю самовосполняемость запасов грунтовых вод в весенне-осенние периоды. Комбинированный дренаж может представлять собой различные комбинации вертикального и горизонтального дренажей, вертикального дренажа и польдерных систем осушения, вертикального дренажа с редкой и неглубокой сетью открытых каналов и т. д. [47, 79].

Основным достоинством вертикального дренажа является то, что при отработанных режимах его эксплуатации исключается возможность искусственного переосушения дренируемых массивов и, следовательно, резко падает необходимость в их интенсивном дополнительном увлажнении. Это обусловливается тем, что дренажные скважины будут эксплуатироваться только в периоды подъема УГВ выше оптимальной нормы осушения, когда появляется избыточное увлажнение. Но поскольку такие периоды носят сезонный характер и наблюдаются лишь в отдельные декады (или сутки) весной и осенью (и очень редко летом), то дренажные скважины большей частью будут простаивать или работать в слабом режиме. При достижении оптимальной нормы осушения мелиоративную систему (или часть ее) можно отключать или переводить на более дешевый режим эксплуатации, обеспечивая регулирование дренажного стока на протяжении всего вегетационного периода. Благодаря этому свойству вертикальный дренаж является наиболее эффективным средством управления УГВ, позволяющим создавать регулируемое осушение и орошение.

Таким образом, применение управляемых мелиоративных систем двустороннего действия позволит получить основные предпосылки для комплексного использования водных ресурсов и обеспечения оптимального водного режима осушаемых земель в любых погодных условиях. При этом внедрение вертикального дренажа на заболоченных водосборах откроет новую страницу в теории и практике осушительной мелиорации и будет способствовать строительству действительно совершенных мелиоративных систем в зоне избыточного увлажнения.

Глава 1

ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ

59733

Среднегодовое количество осадков в Белорусском Полесье колеблется в пределах 500—600 мм. При этом наблюдается значительная неравномерность их распределения как по годам, так и внутри сезонов. Суммарное водопотребление сельскохозяйственных культур в средние по осадкам и засушливые годы значительно превышает количество выпадающих осадков. Дефицит влаги в почве еще более возрастает на мелкозалежных торфяниках, переосушаемых мелиоративной сетью. Его максимальная величина в засушливые годы составляет для трав 150 мм, для картофеля 50, для яровых зерновых 100 мм [127].

После проведения мелиоративных работ естественная речная сеть на многих водосборах увеличилась за счет магистральных каналов в 2—3 и более раз. Уже в настоящее время протяженность мелиоративной сети в целом превышает длину естественных водотоков. В перспективе мелиоративная и отрегулированная (спрямленная) речная сеть станут господствующими элементами в гидрографии Полесья.

Речная сеть Полесья в основном дренирует водоносный комплекс четвертичных отложений. Однако экспериментальных данных о глубине воздействия рек и каналов на подземные воды пока нет.

Для полесских рек характерна резкая сезонная неравномерность стока. Около 50—60% всего годового объема воды протекает за 1,5—2 весенних месяца. Вторая особенность рек Полесья — незначительная пропускная способность их русл, которые не могут обеспечивать своевременного отвода избыточных вод.

Поймы и первые надпойменные террасы рек сильно заболочены и заторфованы. В паводки и половодья здесь скапливаются огромные объемы воды, вызывающие длительное затопление и подтопление больших площадей низинных торфя-

ников. Особенно широкие разливы наблюдаются в пойме Припяти и нижнем течении ее притоков. Средняя продолжительность затопления изменяется от 50 до 90 дней, а в отдельные многоводные годы — от 80 до 170 дней. Ширина разлива Припяти достигает 25—30 км. Пойма Припяти, затапливаемая в период весенних половодий и осенних паводков, создает длительный подпор стоку, поступающему со склонов низменности. В этих условиях осуществление мелиорации заболоченных водосборов Полесья и рациональное использование их в сельскохозяйственных целях являются весьма сложной гидротехнической и водобалансовой проблемой.

§ 1.1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ МЕЛИОРАТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первый проект осушения болот Полесья составлен после организации Западной экспедиции по изысканиям и осушительным работам под руководством генерал-лейтенанта И. И. Жилинского (1873—1875). Согласно этому проекту, задача канализации Полесья должна была состоять в образовании новых путей для стока воды, не вмещающейся в естественные русла притоков Припяти, чтобы дать движение неподвижным водам и установить более правильное распределение и движение вод по всему бассейну Припяти.

На основании изысканий, выполненных экспедицией И. И. Жилинского, был составлен «генеральный план осушения Полесья посредством сети каналов, комбинированных и устроенных таким образом, чтобы не только открыть водам выход из поверхности котловин и дать им правильное распределение, но и получить возможность управлять ими... чтобы, понизив грунтовые воды до уровня, необходимого для освобождения низменных лесов от подмочки и образования на поверхности болот слоя сухой почвы, достаточного для произрастания трав и злаков, можно было предупреждать дальнейшее их понижение и тем избегнуть излишнего иссушения почвы» [39].

Давая оценку методам и способам осушительной мелиорации, носившей до 1966 г. локальный характер, А. И. Ивицкий писал, что главный недостаток в строительстве осушительных систем в Белоруссии до 60-х годов заключался в том, что они были несовершенными и недолговечными. Осушение болот и заболоченных минеральных почв в республике производилось исключительно открытыми канавами. Более совершенный

способ осушения закрытым дренажем не применялся. Так, с 1949 до 1959 г. закрытым дренажем осушено всего 626 га [42]. А. И. Ивицкий предложил новый способ осушения болот Полесья. Он писал, что на низинных незаливаемых болотах слабого грунтового питания, подстилаемых мощным слоем песка, надобность в систематическом гончарном или другом трубчатом дренаже с малым (30—40 м) расстоянием между дренами отпадает, так как здесь большой осушительный эффект оказывает редкая (через 400—500 м) *сеть глубоких* (2,0—3,0 м) *каналов,* прорезающих торф и врезающихся в подпочву. Осушение таких болот можно производить редкой (через 400—500 м) *сетью глубоких каналов* в сочетании с систематическим кротовым дренажем с расстоянием между дренами 20—30 м или разреженным гончарным или другим трубчатым дренажем с расстоянием между дренами 100 м и более. Последний необходим главным образом для обратного регулирования водного режима [42].

В этих условиях появляется необходимость в принципиально новом подходе к проектированию крупных и сверхкрупных мелиоративных систем. Решение задачи было найдено путем разработки бассейновых и межбассейновых схем комплексного использования и охраны водных и земельных ресурсов.

Переход к региональным осушительным системам поставил перед исследователями и проектировщиками ряд сложных мелиоративных, гидрологических и гидрогеологических проблем. Стала очевидной огромная осушительная роль проводящей сети и прежде всего крупных магистральных каналов и отрегулированных водоприемников. Возникла опасность переосушения значительных территорий мелиорированных торфяников и минеральных почв и как следствие этого необходимость в широком применении дополнительного увлажнения. Все говорило о том, что строящиеся осушительные системы с глубокими магистральными каналами в водобалансовом и технико-экономическом отношениях весьма несовершенны и требуют коренного улучшения. Начался период интенсивных поисков выхода из создавшегося положения. И с 1969 г. было взято направление на создание осушительно-увлажнительных систем двустороннего действия.

В это время появляется ряд интересных предложений о способах осушения безуклонных болот Полесья, подстилаемых хорошо проницаемыми песчаными отложениями (таких площадей только в белорусской части Полесья насчитывается не менее 1,3 млн. га). Большое внимание разработке новых и совершенствованию существующих мелиоративных систем

Полесья стали уделять А. И. Ивицкий, С. Х. Будыка, А. И. Мурашко, В. В. Ермоленко, В. Ф. Карловский, Л. С. Шкабаро, А. И. Михальцевич, П. И. Закржевский, А. Г. Иванькин, А. М. Захаренко и др.

В 1970 г. к изучению осушительных систем Полесья и разработке проектов различных вариантов осушительно-увлажнительных систем на базе вертикального дренажа приступил и автор [47, 79]. Установлено, что в условиях Полесья регулируемый водный режим болотных массивов может быть обеспечен заградительным (перехватывающим) и систематическим вертикальным дренажем с *редкой сетью неглубоких каналов*. Такая комбинированная гидротехническая система позволит осуществить перехват транзитного (бокового) притока грунтовых вод и заодно напорного питания снизу. В результате УГВ будут находиться на глубине, определяемой режимом работы дренажных скважин [47]. В 1971 г. была разработана усовершенствованная модель осушительной системы, состоящая из редкой сети неглубоких каналов, усиленная дренажными скважинами [47]. На практике, однако, по-прежнему строились самотечные осушительные системы с глубокими магистральными каналами и еще более глубокими отрегулированными водоприемниками. При возросших масштабах мелиорации это стало приводить к переосушению значительных территорий, требовало осуществления дорогостоящих мероприятий по дополнительному увлажнению этих земель и отрицательно сказывалось на сохранении водных ресурсов и торфяно-болотных почв. Поэтому в 1973 г. А. И. Ивицкий предложил решительно пересмотреть вопрос о глубине осушения болот Полесья, а значит, и о глубине открытых каналов и регулируемых рек. Он писал, что проектируемые теперь глубины каналов на мелиорируемых землях Полесья значительно завышены. Учитывая природные условия Полесья, технически представляется возможным уменьшить глубины магистральных каналов даже на 90—100 см и получить от осушительной сети тот же или еще лучший эффект при значительно меньших капиталовложениях на мелиорацию [43].

Основываясь на этих предпосылках, А. И. Ивицкий предложил две принципиально новые схемы осушения под луга на мелкозалежных болотах Полесья, подстилаемых мощным слоем хорошо водопроницаемого песка [44]. Обе схемы состоят из редкой сети мелких каналов, между которыми, если водопроницаемость подстилающего песка меньше 2 м/сут, параллельно закладывается дрена — осушитель большого

диаметра. Потребность в закрытом дренаже для целей осушения здесь совсем отпадает [43].

Данные схемы рекомендуются для любых по водности циклов лет и построены на допущении, что в условиях Полесья редкая сеть мелких (глубиной 1,3—1,6 м) каналов будет оказывать тот же или еще лучший эффект, что и редкая сеть глубоких (глубиной 2,2—2,6 м) каналов. Из этой предпосылки был сделан не менее заманчивый вывод о том, что и при наличии редкой сети мелких каналов надобность в закрытом дренаже для целей осушения «совсем отпадает».

В. В. Ермоленко не разделяет этого вывода А. И. Ивицкого и считает, что «в условиях Полесья закрытый материальный дренаж нужен и он должен вместе с открытыми каналами выполнять роль регулятора почвенной влажности путем равномерного понижения или повышения УГВ на мелиорируемой территории. Заложить закрытый дренаж только с целью орошения практически здесь невозможно, так как при сбросе излишней влаги с площади он все равно будет оказывать и осушительное действие независимо от глубины залегания дрен» [35].

Главполесьеводстрой и Союзгипромелиоводхоз считают целесообразным для осушения безуклонных болот, подстилаемых песчаными отложениями, и в дальнейшем независимо от водности года применять главным образом неуправляемые самотечные системы постоянного действия, основанные на самотечной осушительной и проводящей сети и отрегулированных водоприемниках. Отличие рекомендуемых систем от применявшихся ранее заключается лишь в том, что в предлагаемых системах расстояние между каналами открытой сети любого назначения должно быть не менее 400—800 м, а глубина открытой сети любого назначения не должна превышать 1,5—1,6 м, т. е. рекомендуемые мелиоративные системы характеризуются резко увеличенными междренными расстояниями и значительно уменьшенными глубинами открытой сети.

Указанные дренажные системы в гидрогеологическом и водобалансовом отношениях не являются достаточно обоснованными. Есть все основания полагать, что в циклы многоводных лет предлагаемые осушительные системы с весьма редкой и мелкой проводящей и осушительной сетью и слабо отрегулированными водоприемниками не будут в состоянии обеспечивать расчетные скорости снижения УГВ и оптимальные нормы осушения (тем более в критические периоды этих лет). В то же время эти мелиоративные системы могут ока-

заться приемлемыми для маловодных и засушливых лет, когда возникает необходимость не столько в осушении, сколько в орошении земель. В этом и заключается основной недостаток неуправляемых самотечных систем непрерывного действия, к типу которых относятся рассматриваемые осушительные системы. Объяснить его можно следующим образом.

Интенсивное осушительное действие существующих мелиоративных систем с относительно густой и весьма глубокой сетью каналов и отрегулированных водоприемников — закономерное явление, поскольку эти системы рассчитаны, согласно действующим техническим условиям и нормам, на своевременный отвод избыточных поверхностных и грунтовых вод в критические периоды многоводного года. Именно поэтому неуправляемый самотечный дренаж постоянного действия нормально осушает болотные массивы лишь в критические периоды расчетного года. За пределами этих периодов даже расчетного года дренажные системы чаще всего становятся несовершенными или весьма несовершенными, поскольку магистральные каналы и отрегулированный водоприемник продолжают сбрасывать с осушенного массива необходимую растению воду и тем самым переосушают почву. Сделать эти системы совершенными, которые могли бы в нужное время и в необходимых количествах отводить с переувлажняемого (в основном периодически) массива избыточную воду,— значит придать этим системам не только гравитационный, но и принудительный принцип дренирования. В работах [9, 10, 37, 40, 47, 51, 79, 100, 101, 121] показано, что такими системами могут быть только управляемые дренажи периодического действия, основанные на применении механического водоподъема с помощью насосных станций, артезианских и дренажных насосов, вакуумного и сифонного водозабора и т. д.

Режим естественного переувлажнения мелиорируемых земель имеет в основном периодический характер и подвержен резким колебаниям как в многолетнем, так и внутригодовом разрезе. Отсюда следует, что и режим дренирования переувлажняемых земель должен автоматически и в какой-то мере синхронно копировать режим водного питания осушаемого массива и, в частности, режим его естественного переувлажнения. Неуправляемые дренажные системы гравитационного действия не в состоянии осуществлять такое дренирование. Из-за этого любые самотечные системы, применяемые или рекомендуемые для осушения безуклонных болот Полесья, в многолетнем разрезе будут несовершенными как в водобалансовом, так и в технико-экономическом отношениях. На

землях, осушаемых такими системами, нельзя будет ежегодно создавать оптимальный водный режим, необходимый для получения гарантированных высоких урожаев сельскохозяйственных культур.

Эти недостатки полностью самотечных мелиоративных систем стали особенно заметными в последние 10—15 лет, когда подобными системами начали осушать значительные территории заболоченных водосборов. Начались поиски принципиально новых дренажных систем периодического действия. Путь к созданию таких систем, основанных на вертикальном дренаже, указали Г. В. Богомолов, А. И. Ивицкий, М. Ф. Козлов, В. С. Усенко, Г. И. Пастухов, А. А. Желобаев и др.

История изучения вертикального дренажа в Белоруссии начинается с периода обобщения гидрогеологических условий Белорусского Полесья и анализа осушительного действия водозаборов подземных вод и крупных мелиоративных систем, основанных на горизонтальном дренаже. В 1959 г. опубликована работа В. С. Усенко, в которой был поставлен вопрос о возможности осушения сельскохозяйственных угодий вертикальным дренажем. Им же в 1961 г. сделано предварительное гидрогеологическое обоснование целесообразности использования вертикального дренажа для осушения болотных массивов южной части Белоруссии [121].

Г. В. Богомолов справедливо указывает, что в условиях Белоруссии, где в ряде случаев заболачивание связано с подтоком глубоких напорных вод, необходимо испытать закрытый вертикальный дренаж. Преимущество этого типа дренажа заключается в том, что продолжительность осушения заболоченного массива можно значительно сократить. Регулируя режим откачки, можно создать те понижения, которые требуются в условиях его использования. В ряде районов Полесья, где заболоченные массивы обводняются напорными подземными водами, вертикальный дренаж может оказаться очень эффективным [9].

Г. В. Богомолов впервые указал на значительную эффективность использования подземных вод для орошения в период отсутствия или недостатка осадков. Он считал, что при наличии, скажем, 200 га орошаемых земель понадобится не более 10 скважин глубиной 50—60 м [9].

Однако до 1970 г. проектирование и строительство даже опытных осушительных и осушительно-оросительных систем на базе вертикального дренажа не проводились. По этой причине оставался открытым вопрос о том, какие технико-экономические параметры и модели вертикального дренажа как

осушительно-увлажнительной системы наиболее приемлемы для мелиоративных и гидрогеологических условий Белорусского Полесья.

С 1970 г. в БелНИИМиВХ автор начал проводить теоретические и проектные разработки осушительных и осушительно-увлажнительных систем на базе вертикального дренажа. К началу 1972 г. на территории Полесской опытно-мелиоративной станции (ПОМС) уже действовала целая система дренажных скважин опытно-производственного участка вертикального дренажа. На участке широким фронтом шли испытания осушительно-увлажнительного действия различных сочетаний дренажных скважин, в большом количестве проводились опытные кустовые и групповые откачки с целью определения гидрогеологических параметров дренируемой толщи, изучения характера формирования депрессионной поверхности при различных режимах работы дренажных скважин, выбора оптимальных технико-экономических характеристик фильтров и насосно-силового оборудования, исследования других вопросов динамики грунтовых вод, определяющих эффективность осушительно-увлажнительного действия вертикального дренажа. В этот период были определены мелиоративные и гидрогеологические требования к опытно-производственным участкам вертикального дренажа, установлены основные технико-экономические показатели и разработаны схемы осушительно-увлажнительных систем на базе вертикального дренажа, сформулированы задачи мелиоративной гидрогеологии, направленные на разработку гидрогеологических и гидродинамических основ теории и практики двустороннего регулирования водного режима осушаемых водосборов [47, 79]. Начался новый этап осушительной мелиорации, характеризующийся интенсивными поисками технически совершенных и экономичных осушительно-увлажнительных систем периодического действия, отличающихся высокими водобалансовыми показателями. Изучению таких систем, главным элементом которых являются дренажные скважины, и посвящается данная работа.

§ 1.2. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Низменная равнина Белорусского Полесья почти наполовину занята обширными болотами и представляет собой монотонно-однообразную поверхность с малыми уклонами и минимальными (от 8—10 до 20—30 м) превышениями водоразделов над меженными уровнями рек. Естественная дрени-

рованность (глубина расчленения) территории незначительна, поэтому в мощной толще песчано-глинистых отложений, слагающих эту равнину, содержатся значительные ресурсы пресных подземных вод.

Вся территория Полесья покрыта сплошным чехлом четвертичных отложений, залегающих на размытой поверхности различных по возрасту коренных пород (в основном неогеновых, палеогеновых и меловых). Мощность четвертичного покрова в пределах холмисто-возвышенной зоны составляет 80—120 м и более, в низменной равнине она уменьшается до 20—35 м. Литологически четвертичные отложения весьма невыдержанны по мощности и простиранию и часто замещают друг друга, образуя песчано-глинистые толщи с многочисленными линзами, слоями и прослойками песков, супесей и реже суглинков.

Распространение, формирование и движение подземных вод в Полесье обусловлены прежде всего геологическим строением, геоморфологическими и климатическими условиями территории. Образование крупных тектонических впадин, заполненных трещиноватыми и пористыми породами, разделенными водонепроницаемыми пластами, создало благоприятные условия для возникновения ряда водонапорных систем с различными гидродинамическими и гидрохимическими показателями. Наличие мощной толщи песчаных отложений четвертичного возраста в сочетании с равнинно-низменным рельефом и большим количеством атмосферных осадков привело к образованию весьма водообильной толщи грунтовых вод. Фильтрационные свойства этой толщи детально изучены в центральной части Белорусского Полесья на территории ПОМС. Результаты наиболее типичных опытов, представляющие практическую и теоретическую ценность для изучения кинематики неустановившихся потоков грунтовых вод, приведены в приложении.

Наряду с опытно-фильтрационными работами был проведен комплекс лабораторных исследований. В частности, анализ гранулометрического состава песчаной толщи, выполненный до глубины 50 м, позволил установить, что соотношение между основными фракциями мелкозернистых песков данной толщи характеризуется следующим равенством:

$$d_{17} = 0{,}01 + d_{10}, \qquad (1.2.1)$$

где d_{10} — действующий, или эффективный, диаметр в мм, определяемый по кривой механического состава; d_{17} — диаметр частиц в мм, которых в данном грунте содержится не

более 17% по весу (определяется аналогично действующему диаметру).

Существование функции $d_{10}=f(d_{40}, d_{50}, d_{60})$ не установлено ввиду отсутствия корреляционной связи между действующим диаметром и диаметрами зерен d_{40}, d_{50}, d_{60}. Это обстоятельство надо иметь в виду при оценке проницаемости песков Полесья по эмпирическим формулам А. Хазена, Е. А. Замарина, И. И. Зауербрея, Д. Терцаги, В. С. Истоминой и др.

Натурные исследования осушительного действия вертикального дренажа показали (рис. 1.1—1.4), что скорости снижения и восстановления УГВ вокруг дренажных скважин особенно значительны в первые 2—8 мин после включения или остановки насосов и в среднем составляют 2—4 см/с; при этом величины понижения УГВ, отсчитываемые от статического уровня, в радиусе от 0,5 до 3,0 м от дренажных скважин достигают 1,8—4,0 м при дебитах 80—150 м³/ч (рис. 1.5).

Характеристика дренажных скважин приведена в работах [100, 101].

В рассматриваемых гидрогеологических условиях впервые были проведены опытные кустовые и групповые откачки в широком диапазоне изменения дебита скважин [100, 101]. Это дало возможность существенно уточнить ряд бытующих представлений о фильтрационных свойствах и водообильности безнапорных пластов Полесья, а также об условиях перетекания в них и подстилающих напорных горизонтах [11, 51, 91, 121]. Кроме того, данные опыты позволили изучить характер формирования графиков площадного (рис. 1.1, 1.3—1.5), временного (рис. 1.6, 1.7) и комбинированного (рис. 1.8—1.11)

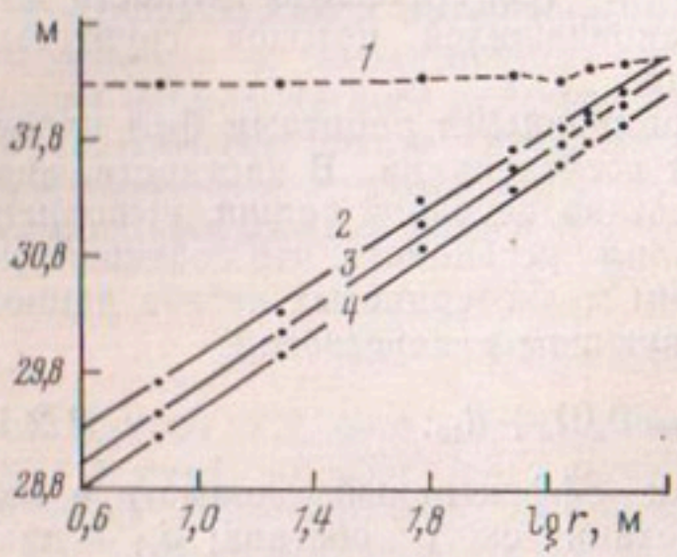


Рис. 1.1. Площадное прослеживание снижения УГВ на три момента времени после пуска скв. 7 в работу с дебитом 150 м³/ч. Откачка проводилась с 24.II по 3.III 1975 г.; $i_D^*=1{,}7$ м; $T_D=32{,}29$ м²/ч: *1*—статический уровень; *2, 3, 4*—положение кривой депрессии через 24, 62 и 162 ч соответственно после включения скв. 7 в работу

прослеживания изменения УГВ при различной интенсивности возмущения и при различной продолжительности дренирования безнапорной толщи. Материалы этих опытов свидетельствуют о том, что расчетные гидрогеологические параметры безнапорных пластов Полесья, определяемые по общепринятым зависимостям Ж. Дюпюи и Ч. В. Тейса, неустойчивы и указывают на изменение режима водного питания данных пластов при изменении интенсивности их дренирования (рис. 1.12, 1.13). Наличие этого явления и высокая проницаемость подстилающих песков приводят к тому, что водопроводимость безнапорной толщи весьма высока и составляет в среднем: по Дюпюи (стационарный режим) — T_D=600—1000 м²/сут; по Тейсу (нестационарный режим) — T=2000—3000 м²/сут. Эти факторы создают благоприятные условия для применения вертикального дренажа в зоне Полесья. Из рис. 1.14 и 1.15 видно, что уже спустя 1 ч после включения дренажной скважины в работу с дебитом 100—150 м³/ч понижение УГВ на расстоянии 120 м (скв. 33) составляет 20 см; на расстоянии 220 м (скв. 34) величина понижения УГВ на 20-й час работы дренажной скважины достигает 20 см, что в 2—3 раза и более превышает интенсивность снижения УГВ при работе горизонтального дренажа.

Для водоносных горизонтов как коренных, так

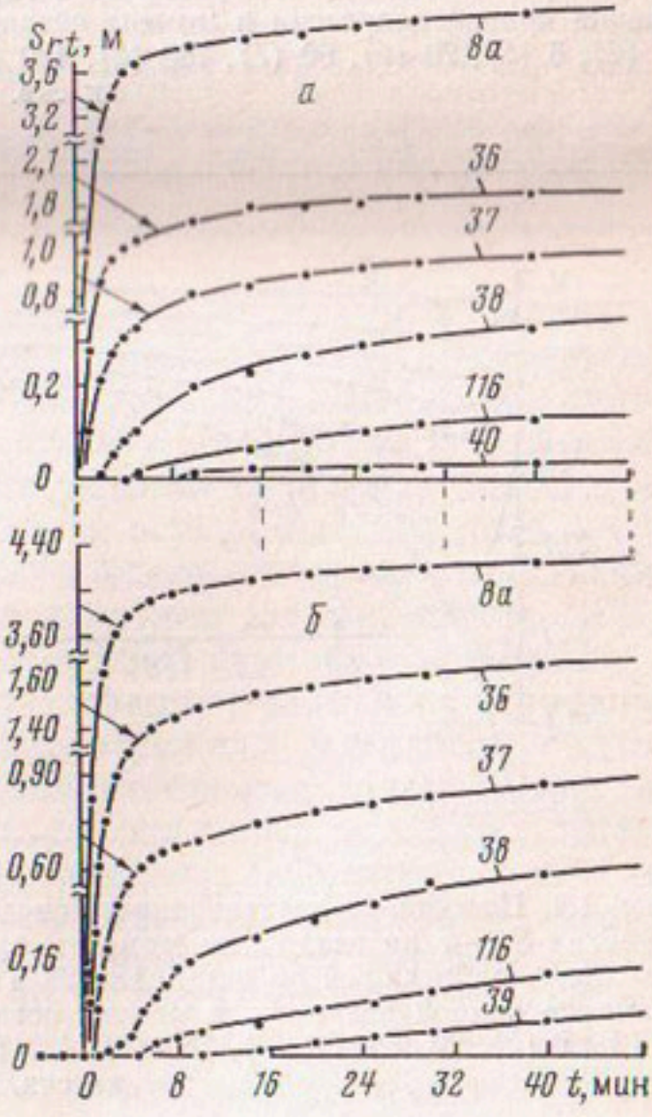


Рис. 1.2. Характер снижения (*а*) и восстановления (*б*) уровня в различных наблюдательных скважинах при откачке из дренажной скв. 8, работавшей до остановки 24 ч с дебитом 100 м³/ч (опыт 42). Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

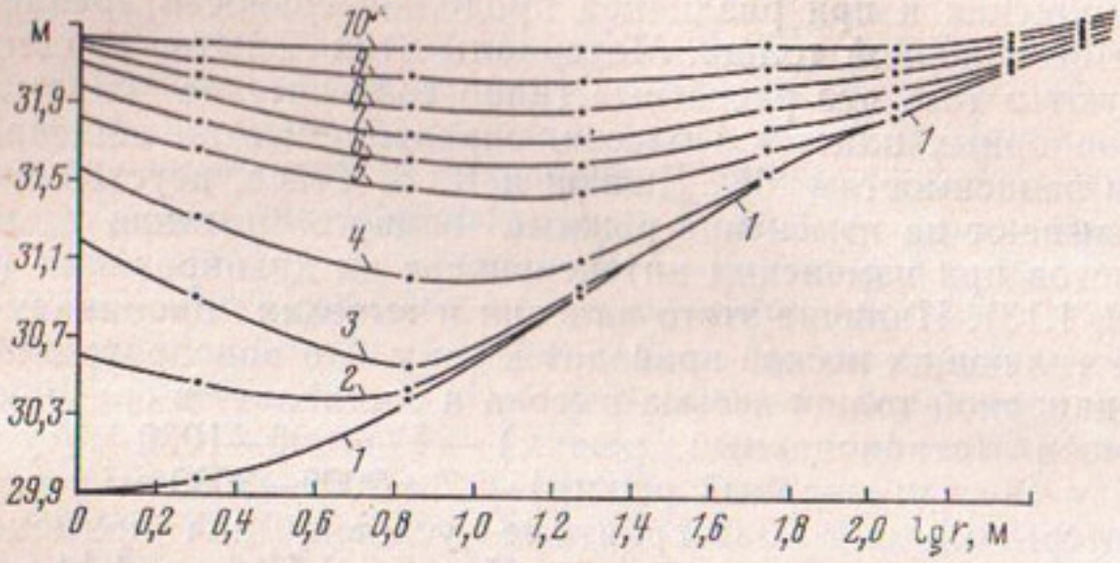


Рис. 1.3. Характер восстановления депрессионной поверхности в координатах S_{rt}—lg r на различные моменты времени после прекращения откачки из скв. 7, работавшей до остановки 24 ч с дебитом 110 м³/ч (опыт 20). Положение кривой депрессии в момент остановки (*1*) и через 1/6 (*2*), 1/3 (*3*), 1 (*4*), 6 (*5*), 20 (*6*), 60 (*7*), 180 (*8*), 420 (*9*) и 1200 мин (*10*) после остановки скв. 7

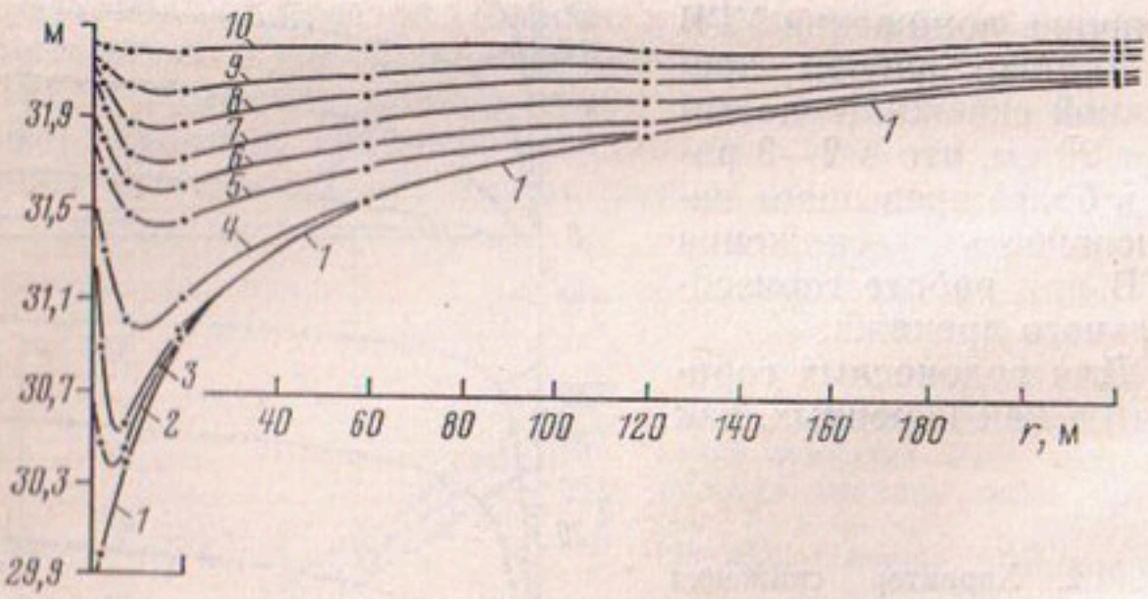


Рис. 1.4. Положение неустановившейся депрессионной поверхности в координатах S_{rt}—r на различные моменты времени после прекращения откачки из скв. 7, работавшей до остановки 24 ч с дебитом 110 м³/ч (опыт 20). Положение кривой депрессии в момент остановки (*1*) и через 1/6 (*2*), 1/3 (*3*), 1 (*4*), 6 (*5*), 20 (*6*), 60 (*7*), 180 (*8*), 420 (*9*) и 1200 мин (*10*) после остановки скв. 7

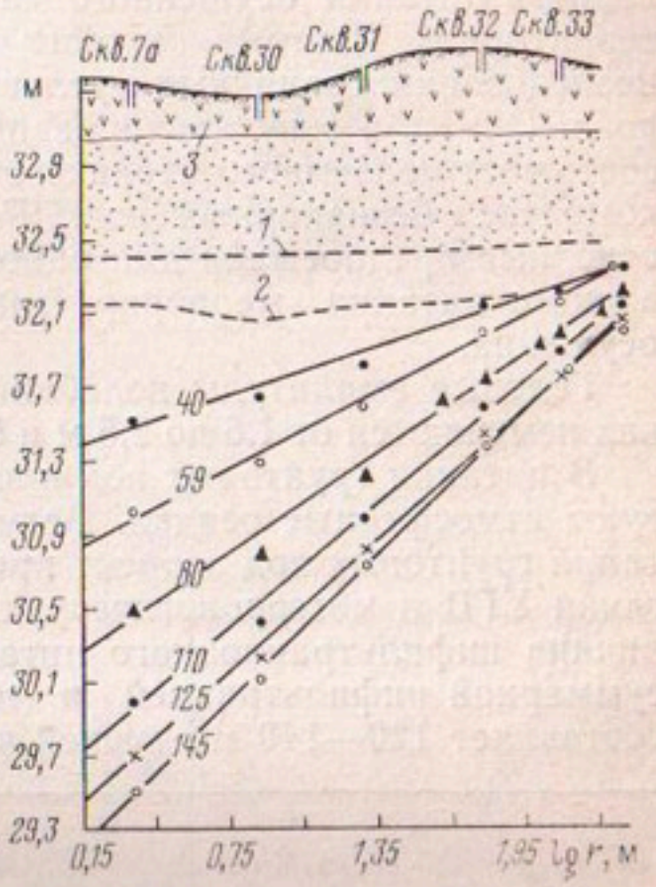


Рис. 1.5. Положение неустановившихся депрессионных поверхностей в координатах S_{rt}—lg r на момент времени t=20 ч после пуска скв. 7 в работу с дебитами 40, 59, 80, 110, 125 и 145 м³/ч: *1* — положение статического уровня при дебите 59 м³/ч; *2* — то же при дебите 125 м³/ч; *3* — торф

и четвертичных отложений характерно отсутствие выдержанных по простиранию водоупоров, что свидетельствует о наличии тесной гидравлической связи между водоносными горизонтами всей осадочной толщи. В этих условиях при возрастании масштабов осушения заболоченных водосборов, отличающихся разнообразным сочетанием мелкозалежных торфяников с песчаными взбугрениями карбонатных солончаков, резко возрастает интенсивность дренирования грунтовых вод мелиоративной сетью и как следствие усилится перетекание между водоносными горизонтами. В результате закономерности естественного режима грунтовых вод и, в частности, режима водного питания осушаемых массивов, широко изучаемые при гидрогеологических съемках, существенно изменяются. Их влияние на характер формирования УГВ и водного баланса осушаемых водосборов будет отлично от влияния, которое нередко прогнозируют исходя из гидродинамического анализа естественного режима и баланса подземных вод. В гидродинамическом отношении толща четвертичных отложений и верхние пласты коренных пород будут вести себя как единый водоносный комплекс безнапорных вод. Поэтому мощность активной зоны дренирования (или глубина активной зоны фильтрации) в Белорусском Полесье весьма неустойчива, изменяется от 50 до 100 м и более и будет возрастать с увеличением степени дренирования водосборов.

После заложения дренажа перетекание между пластами принимает динамичный (неустойчивый) и частично знакопере-

менный характер, существенно влияя на дальнейшем режим водного питания осушенного массива и прилегающих к нему территорий. Поэтому крайне необходимы аналитические исследования граничных условий водоносных горизонтов, вовлекаемых в зону дренирования, и количественная оценка состояния подземного стока в областях питания и разгрузки комплекса безнапорных вод. Решение этой задачи создаст основные предпосылки для районирования Полесья по типам водного питания мелиорируемых территорий и методам их осушения.

Годовые амплитуды колебания УГВ на осушенных массивах изменяются от 1,5 до 2,5 м и более.

В питании грунтовых вод в значительной степени участвуют атмосферные осадки. Величина инфильтрационного питания грунтовых вод зависит прежде всего от глубины залегания УГВ и метеорологических факторов. Фактическая величина инфильтрационного питания, равная разности между суммарной инфильтрацией и испарением с УГВ, в среднем составляет 120—140 мм весной и 25—30 мм осенью; в летние

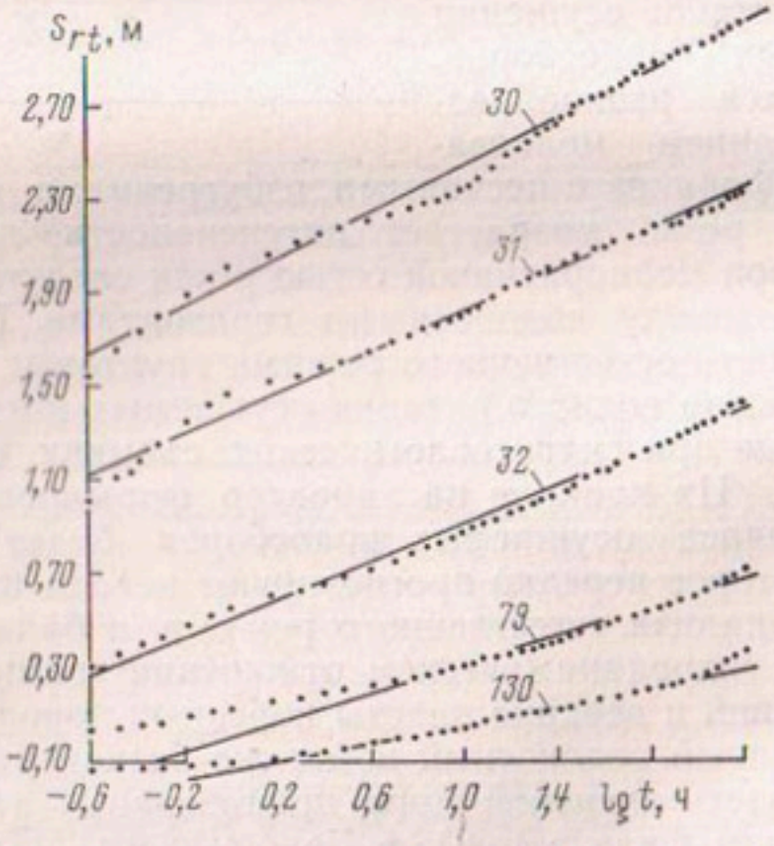


Рис. 1.6. Временное прослеживание снижения УГВ по створу наблюдательных скв. 30—130 при откачке из дренажной скв. 7 с дебитом 150 м³/ч. Продолжительность откачки 162 ч (с 24.II по 3.III 1975 г.). Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

и зимние периоды испарение преобладает над инфильтрацией на 8—40 мм [51, 127].

Таким образом, анализ гидрогеологических условий Белорусского Полесья показывает, что для заболоченных водосборов этого края характерны три основных свойства.

1. Высокая проницаемость песчаных отложений, подстилающих практически все основные массивы мелко- и глубокозалежных торфяников и переувлажняемых минеральных

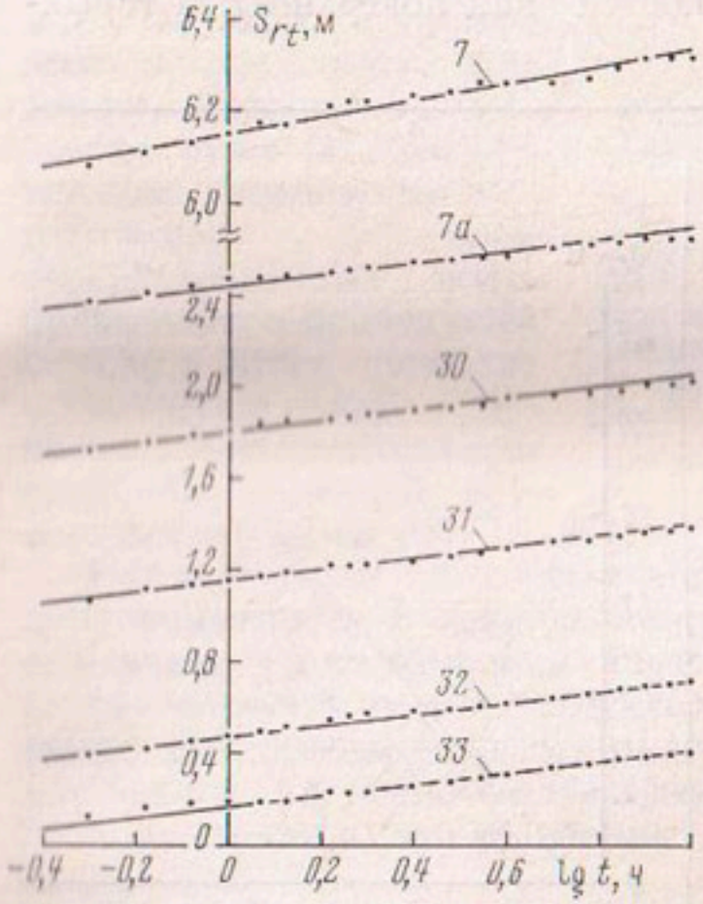


Рис. 1.7. Временное прослеживание снижения УГВ при опытной откачке из дренажной скв. 7 с дебитом 145 м³/ч (опыт 23); $i^*=0{,}24$ м; $T=115$ м²/ч. Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

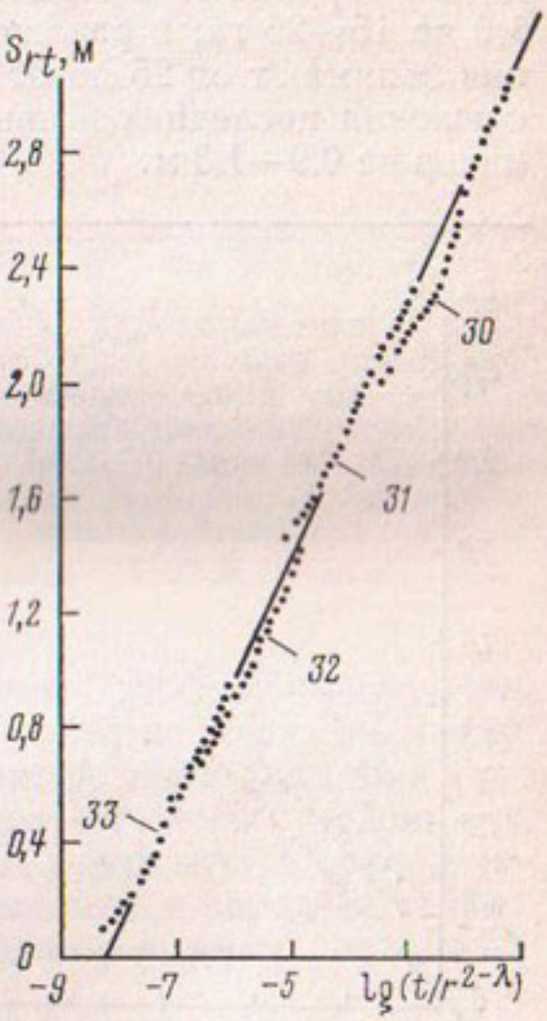


Рис. 1.8. Комбинированное (по автору) прослеживание снижения УГВ по створу наблюдательных скв. 30—33 при откачке из дренажной скв. 7 с дебитом 150 м³/ч. Откачка проводилась с 24.II по 3.III 1975 г.; $i^*=0{,}436$ м; $A_k^0=3{,}58$ м; $\lambda=-2$. Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

почв. Величина коэффициента фильтрации этих песков в среднем составляет, по нашим данным, 17—35 м/сут, а водопроводимость изменяется от 600 до 3000 м²/сут и более. Толща песков содержит много глинистых прослоев и линз, которые невыдержанны по мощности и простиранию, и в гидродинамическом отношении представляет собой весьма водообильный горизонт безнапорных вод мощностью 20—70 м.

2. Незначительные или нулевые уклоны земной поверхности заболоченных водосборов, для которых характерно переплетение мелкозалежных торфяников с песчаными взбугрениями карбонатно-кальциевых солончаков площадью от 0,7—1,0 до 15—25 га; в различных районах Полесья эти взбугрения занимают от 25 до 65% заболоченных массивов и после осушения последних возвышаются над поверхностью торфяников на 0,9—1,3 м.

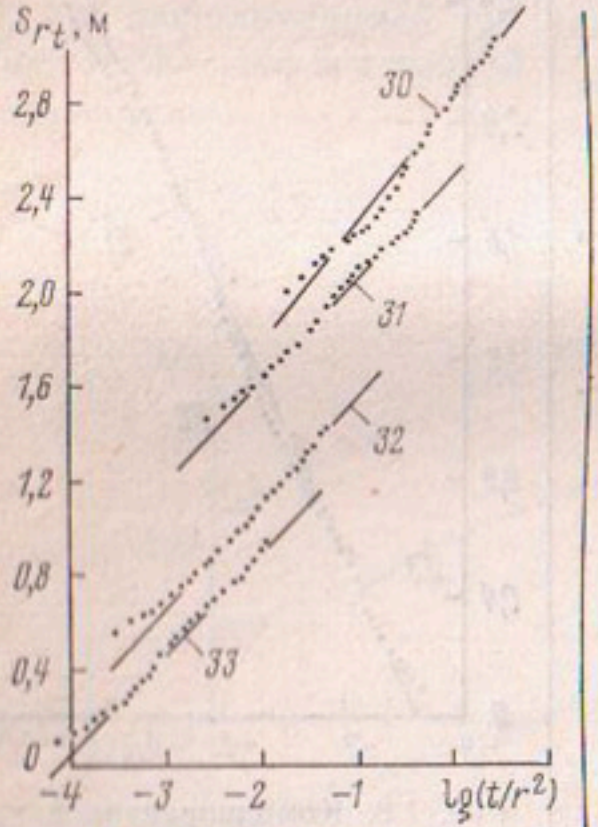


Рис. 1.9. Комбинированное (по Джейкобу) прослеживание снижения УГВ по створу наблюдательных скв. 30—33 при откачке из дренажной скв. 7 с дебитом 150 м³/ч. Откачка проводилась с 24.II по 3.III 1975 г. Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

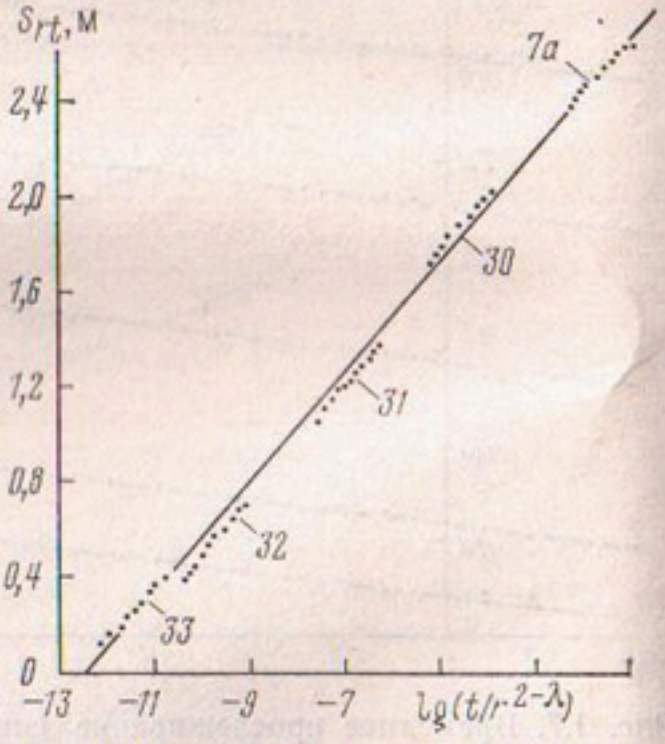


Рис. 1.10. Комбинированное (по автору) прослеживание снижения УГВ в наблюдательных скв. 7а—33 при откачке из дренажной скв. 7 с дебитом 145 м³/ч (опыт 23); $i^*=0{,}234$ м; $T=113$ м²/ч; $T_D=40{,}2$ м²/ч; $A_k^0=2{,}91$ м; $\lambda=-3{,}70$. Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

3. Неустойчивые и взаимосвязанные источники водного питания болот, среди которых главенствующую роль играют атмосферные осадки, подземные воды (грунтовые и напорные), воды местного поверхностного стока и речные воды; при возрастании степени дренированности водосборов многие режимообразующие факторы (и прежде всего интенсивность подземного питания) претерпевают существенные изменения, вызываемые осушительным действием отрегулированных водоприемников и проводящей сети, и в итоге приводят к соответствующим изменениям и неустойчивости граничных условий осушаемых массивов [47, 79, 85].

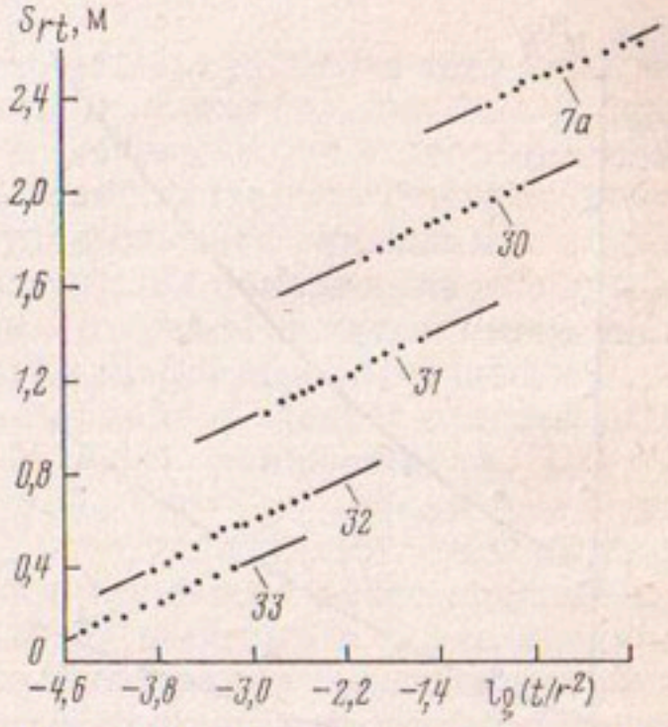


Рис. 1.11. Комбинированное (по Джейкобу) прослеживание снижения УГВ в наблюдательных скв. 7а—33 при откачке из дренажной скв. 7 с дебитом 145 м³/ч (опыт 23). Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

Наличие таких источников водного питания, высокая водопроницаемость и водообильность подстилающих песчаных отложений и в то же время отсутствие условий для стока (из-за особенностей геоморфологического строения района), а также микронеоднородность рельефа и мозаичное переплетение болотных и дерново-заболоченных почв и определяют способы осушения и регулирования водного режима полесских водосборов.

При составлении приведенной характеристики гидрогеологических условий Полесья тщательно изучались прежде всего новейшие материалы комплексных съемок для целей мелиорации, выполненных Белорусской геолого-гидрогеологической экспедицией. В результате этого анализа установлено следующее.

1. Основным недостатком указанных съемок является неполный гидродинамический анализ характера формирования и движения подземных вод на осушенных и неосушенных болотных массивах. По этой причине многие назревшие про-

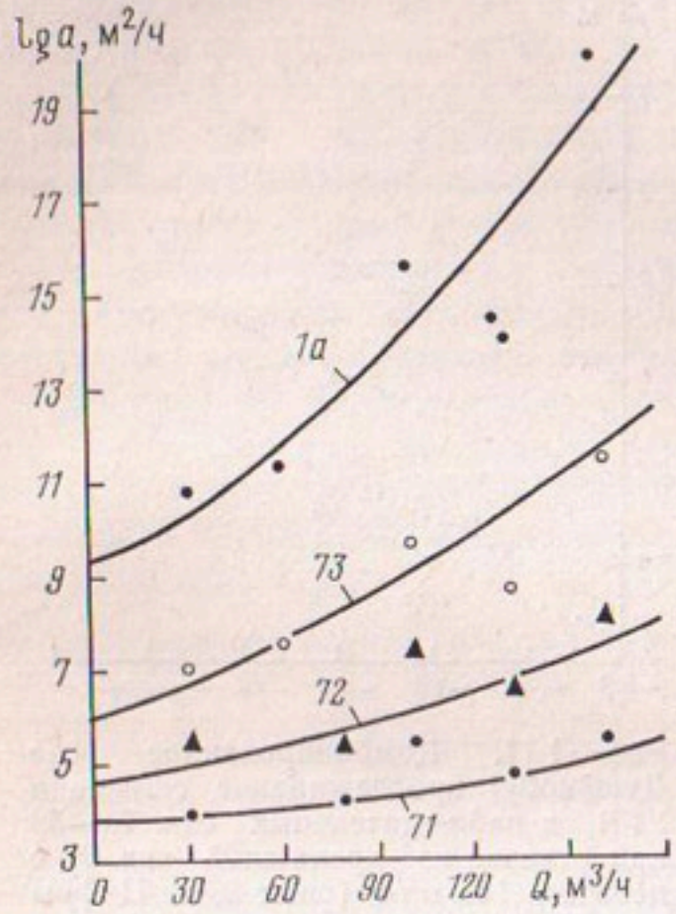


Рис. 1.12. Влияние интенсивности дренирования на устойчивость расчетных значений уровнепроводности, определенной в зоне квазистационарного режима по снижению УГВ при откачках из дренажной скв. 1. Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин створа А—А

блемы мелиоративной гидрогеологии, связанные с созданием технически совершенных и экономичных осушительно-увлажнительных систем различного масштаба, продолжают оставаться нерешенными, несмотря на то, что большая часть водосборов покрыта комплексной съемкой крупного масштаба.

Примером неполного гидродинамического анализа гидрогеологической обстановки может служить то, что в четвертичной толще Полесья обычно выделяется 8—11 самостоятельных водоносных горизонтов и комплексов, а всего в геологическом разрезе, включая воды кристаллического фундамента,— до 18—20 водоносных горизонтов и комплексов. Если такое расчленение водоносной толщи, может быть, правомерно с точки зрения стратиграфии пород, то с точки зрения фильтрационных расчетов и моделирования дренажа дробление четвертичной толщи на множество самостоятельных водоносных горизонтов и комплексов вносит большую путаницу в составление расчетных схем и в итоге себя не оправдывает (тем более, что в Белорусском Полесье четвертичная толща представляет собой единый водоносный горизонт безнапорных вод, участвующий в водном питании болот и дренируемый мелиоративной сетью). Поэтому при проектировании дренажа и водохранилищ по-прежнему остаются нерешенными вопросы схематизации и типизации гидрогеологических условий полесских водосборов. С нашей же точки зрения, гидрогеологические съемки крупного масштаба как

раз и должны решать подобные задачи хотя бы в первом приближении.

2. Для определения водопроницаемости верхней зоны четвертичных отложений по данным одиночных пробных и опытных откачек во всех отчетах используются известные формулы Н. К. Гиринского и В. Д. Бабушкина. Эти формулы учитывают понижение уровня внутри опытной скважины и в то же время не содержат соответствующих поправок на обобщенное сопротивление этих скважин. Получаемые таким путем значения коэффициента фильтрации, например, песчаных отложений речных террас, равные 4—5 м/сут, следует считать значительно (не менее чем в 2 раза) заниженными. Поэтому проектирование мелиоративной сети по таким величинам коэффициента фильтрации подстилающих отложений приведет к тому, что дренаж, рассчитанный на менее проницаемую среду, в действительности будет работать в более проницаемой и, следовательно, будет в состоянии переосушить мелиорируемые земли из-за большой глубины и густоты осушительной и проводящей сети, запроектированной исходя из принятых (т. е. заниженных) значений коэффициента фильтрации [57, 77]. Это говорит о том, что оценке гидрогеологических параметров, определяющих точность последующих проектных расчетов и моделирования дренажа, следует уделять первостепенное внимание.

3. Материалы комплексных съемок содержат обширные данные лабораторных и полевых определений гранулометрического состава, водных и инженерно-геологических свойств всех геолого-генетических комплексов пород. Изучение этого материала показывает, что

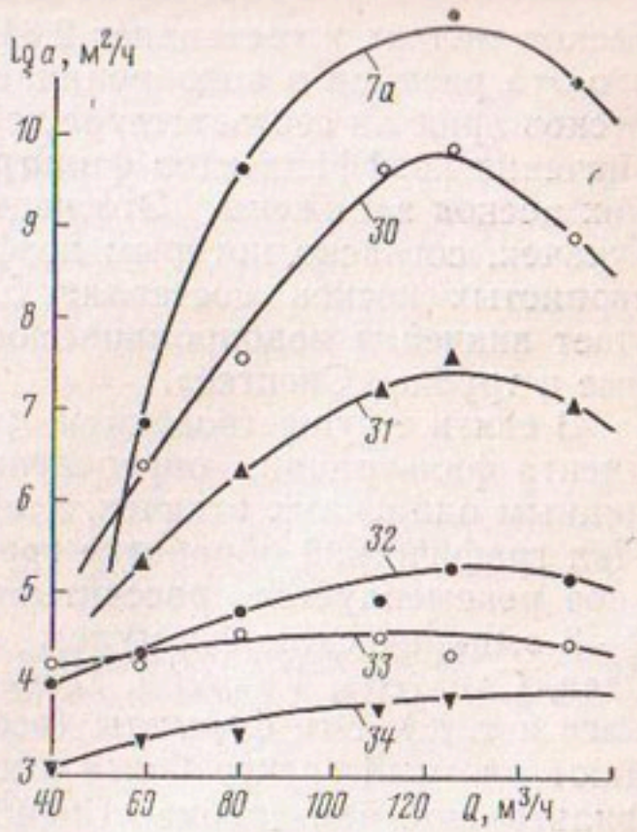


Рис. 1.13. Характер зависимости логарифма коэффициента уровнепроводности от дебита при опытных откачках из дренажной скв. 7. Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

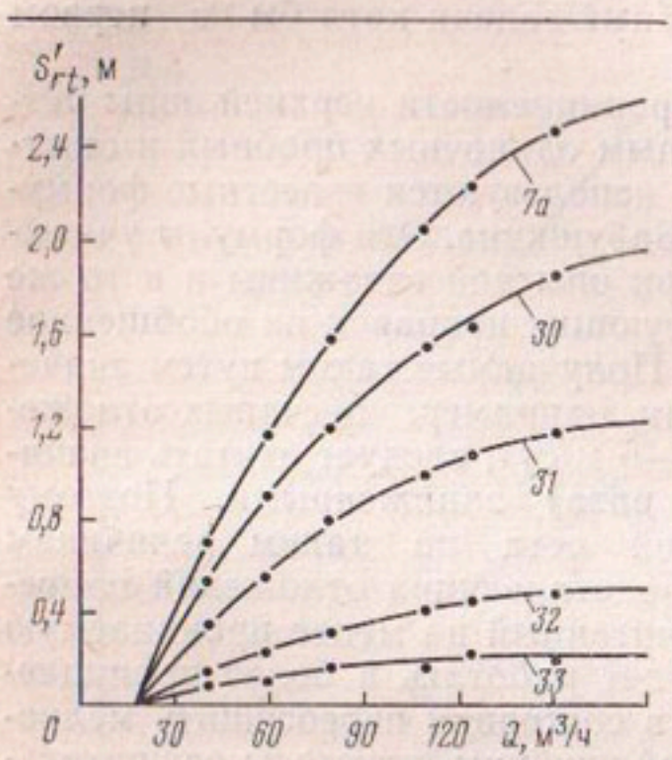


Рис. 1.14. Зависимость фактических понижений уровня от величины дебита на момент времени $t=1$ ч после пуска дренажной скв. 7 в работу. Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

рекомендуемые в отчетах величины водопроницаемости песчаных отложений верхней (5—10-метровой) зоны четвертичной толщи следует рассматривать весьма критически.

Для примера обратимся к материалам комплексной гидрогеологической съемки масштаба 1 : 50 000, выполненной в 1972—1974 г. на площади 1600 км² в бассейне Бобрика. Результаты определения коэффициента фильтрации в трубке «Спецгео» и по данным пробных и опытных откачек приведены в табл. 1.1. Их анализ показывает, что коэффициент фильтрации песков средней крупности всего на 0,6 м/сут превышает среднее значение коэффициента фильтрации песков мелких и составляет 2,81 м/сут. Совершено очевидно, что эта разница в водопроницаемости двух разновидностей песков вряд ли соответствует действительности, а абсолютные значения коэффициентов фильтрации как мелких, так и средних песков занижены. Это подтверждают и данные опытных откачек, согласно которым коэффициент фильтрации среднезернистых песков составляет 5,64 м/сут, т. е. в 2 раза превышает значения водопроницаемости этих отложений, полученные в трубке «Спецгео».

В связи с существованием разнобоя в величинах коэффициента фильтрации, определенного в трубке «Спецгео» и по данным одиночных откачек, необходимо отметить следующее. При графической обработке гранулометрического состава песков рекомендуется рассчитывать их водопроницаемость по 2—3 эмпирическим формулам (Хазена, Истоминой, Зауэрбрея, Слихтера, Крюгера, Цункера, Замарина, Козени, Терцаги и т. д.). Эти формулы (особенно первых трех авторов) дают плотный спектр более высоких значений коэффициента фильтрации, чем трубка «Спецгео» и подобные ей приборы. В результате значительно сокращается разрыв между вели-

чинами коэффициента фильтрации, определяемого опытными откачками и в лабораторных условиях.

4. В последние годы в отечественной и зарубежной литературе стали появляться высказывания о том, что расчетные гидрогеологические параметры (и прежде всего коэффициент фильтрации и водопроводимость), определенные по материалам опытных откачек или на физических моделях в лабораторных условиях с использованием существующих формул, неустойчивы и закономерно или непоследовательно изменяются при изменении интенсивности возмущения пласта. Это поставило перед теорией и практикой гидрогеологических расчетов совершенно новые, еще не изученные проблемы как чисто физического, так и инженерного характера. Для объяснения наблюдаемых закономерностей изменения гидрогеологических параметров при изменении интенсивности возмущения (дренирования) пласта начали разрабатываться соответствующие гипотезы. Но вопрос о том, какие гидрогеологические параметры — устойчивые или неустойчивые по отношению к изменению расхода потока — использовать в практике проектирования дренажа, до сих пор остается открытым. По этой

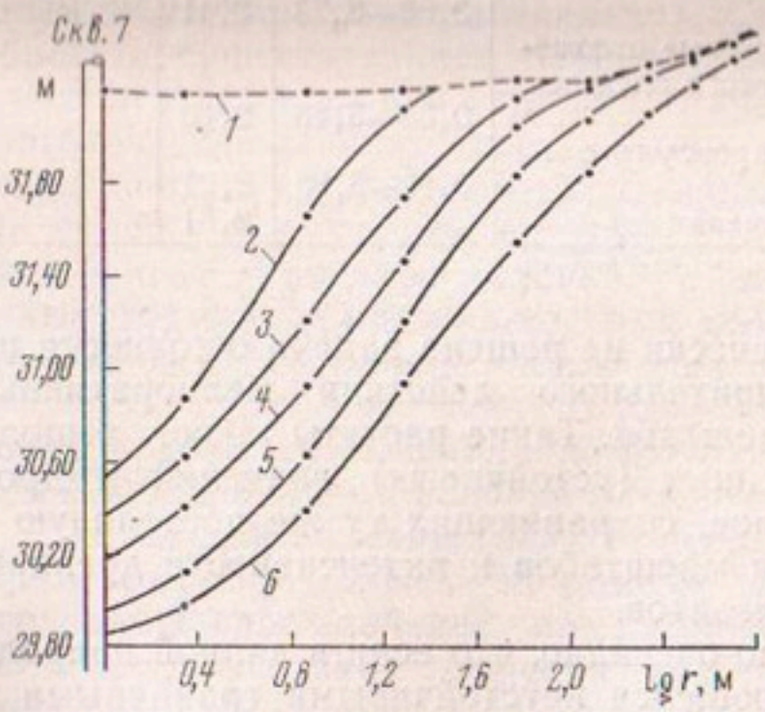


Рис. 1.15. Положение депрессионных поверхностей в координатах $S_{r,t}$—lg r на различные моменты времени после пуска скв. 7 в работу с дебитом 110 м³/ч (опыт 20). Положение статического уровня (*1*) и кривой депрессии через 1 (*2*), 3 (*3*), 10 (*4*), 60 (*5*) и 1440 мин (*6*) после включения скв. 7 в работу

Таблица 1.1

Коэффициент фильтрации мелко- и среднезернистых песков (бассейн Бобрика), м/сут

Песок	Геолого-генетический комплекс пород	Трубка «Спецгео»		Опытные и пробные откачки	
		интервалы изменения	средние значения	интервалы изменения	средние значения
Мелкозернистый	Аллювиальные отложения пойм	0,07—2,22	1,08	0,98—8,54	1,8—3,9
	Эоловые отложения	1,59—7,73	3,54		
	Аллювий надпойменных террас	0,12—6,27	1,66	0,91—9,79	
	Водно-ледниковые отложения московского оледенения	1,89—2,58	2,18	3,84—7,02	
	То же, днепровского оледенения	0,002—6,94	2,53	0,69—8,70	
	Средние значения		2,20		
Среднезернистый	Аллювий надпойменных террас	3,06—3,78	3,41		
	Водно-ледниковые отложения московского оледенения	0,55—5,48	2,80		5,64
	То же, днепровского оледенения	0,16—5,90	2,21		
	Средние значения		2,81		

причине фактически не решена задача о точности прогнозных расчетов осушительного действия мелиоративных систем различного масштаба. Такие расчеты пока выполняются на основе неизменных (устойчивых) значений гидрогеологических параметров, сохраняющих ту же постоянную величину при изменении масштабов и интенсивности дренирования водоносных горизонтов.

Совершенно очевидно, что если в данной природной обстановке, отличающейся неустойчивыми граничными условиями осушаемых пластов, расчетные гидрогеологические параметры последних неустойчивы и «плавают» идентично колебанию или монотонному изменению режима водного питания, зависящего от интенсивности и степени осушения водосборов, а мелиоративная сеть запроектирована исходя из устойчивости этих параметров и неизменности режима водного питания, то

будут наблюдаться отклонения проектных данных от фактических.

В связи с изложенным необходимо было изучить влияние дебита скважин Q на устойчивость расчетных значений коэффициента фильтрации k песков, подстилающих болотные образования полесских водосборов. Было установлено, что с увеличением Q расчетные значения k возрастают по линейной зависимости. В главе 4 функция $k=f(Q)$ и подобные ей закономерности, предложенные другими исследователями, будут рассмотрены более обстоятельно с физической и гидрогеологической точек зрения. Здесь же необходимо отметить, что существование функции $k=f(Q)$ на первый взгляд является парадоксом и противоречит теории линейной фильтрации. В действительности же возникновение этой функции обязано прежде всего зависимости режима водного питания осушаемого пласта (или граничных условий в общем случае) от интенсивности, характера и продолжительности его возмущения. По этой причине в натурных условиях для каждого установившегося состояния возмущенного потока грунтовых вод существует своя расчетная гидродинамическая схема с вполне определенными граничными условиями (например, с одним и тем же постоянным значением радиуса влияния). Следовательно, если пренебрегать существованием закономерности $k=f(Q)$ и считать $k=\text{const}\neq f(Q)$, то при гидрогеологическом изучении таких потоков, обладающих переменными и зачастую вообще неопределенными граничными условиями, необходимо использовать не одну формулу, выведенную для вполне конкретных и устойчивых граничных условий, а несколько или ряд однотипных формул, каждая из которых должна соответствовать некоторому состоянию меняющихся граничных условий.

Иначе говоря, требуются решения, которые отражали бы характер изменения граничных условий осушаемых пластов и водосборов. Только при наличии таких решений гидрогеологические параметры, определяемые по данным опытных откачек, будут сохранять свое значение при изменении дебита скважин. Но поскольку такие решения отсутствуют и по-прежнему используются формулы, полученные для постоянных граничных условий, то при наличии зависимостей $k=f(Q)$ проектирование дренажа во многих случаях целесообразно вести по дифференцированным (переменным) значениям гидрогеологических параметров, соответствующим принятой интенсивности дренирования.

§ 1.3. АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ МЕЛИОРАТИВНОЙ ГИДРОГЕОЛОГИИ

На современном этапе мелиоративного и водохозяйственного строительства, охватывающего значительные территории, исследования в области мелиоративной гидрогеологии должны быть направлены на разработку гидрогеологических и гидродинамических основ проектирования горизонтального и вертикального дренажа на заболоченных и периодически переувлажняемых землях с различными условиями водного питания и стока. Это значит, что предстоит разработать гидрогеологические и гидродинамические основы теории двустороннего регулирования водного режима осушаемых водосборов, выявить место вертикального и горизонтального дренажей, а также их сочетаний в технически совершенных и экономичных системах двустороннего действия.

Многие задачи мелиоративной гидрогеологии сформулированы и решены Г. В. Богомоловым, Д. М. Кацем, Б. С. Масловым, Н. И. Дружининым, В. Ф. Шебеко, П. А. Киселевым, А. В. Лебедевым, И. Е. Жерновым, Н. Н. Веригиным, В. М. Шестаковым, О. В. Поповым, В. Е. Алексеевским и др. Обобщение работ этих исследователей показывает, что в области осушительной мелиорации перед мелиоративной гидрогеологией стоит еще ряд нерешенных комплексных проблем. Изучение этих проблем позволило установить следующие наиболее актуальные задачи на ближайшие 15—20 лет [79].

1. Закономерности формирования уровня грунтовых вод и зоны аэрации на осушаемых и прилегающих к ним территориях при работе дренажных систем одностороннего и двустороннего действия. Режим и баланс подземных вод верхних слоев горизонтов, вовлекаемых в зону дренирования. Мощность зоны дренирования в различных гидрогеологических и эксплуатационных условиях. Оценка величины перетекания между водоносными горизонтами, участвующими в формировании дренажного стока. Влияние граничных условий массива, капиллярной каймы и начального градиента фильтрации на формирование и развитие неустановившейся поверхности грунтовых вод; роль силы тяжести, водоотдачи и градиента напора в неустановившемся движении грунтовых вод.

2. Закономерности многолетнего и внутригодового изменения инфильтрационного и напорного (подземного) питания грунтовых вод на осушаемых и прилегающих к ним территориях речных бассейнов. Районирование заболоченных водосборов по величине модуля питания грунтовых вод. Влияние

масштабов и способов осушения на устойчивость инфильтрационного и напорного питания грунтовых вод. Методы количественной оценки и прогнозирования режима водного питания болотных массивов.

3. Закономерности взаимодействия поверхностных и подземных вод на осушенных и примыкающих к ним территориях. Оценка и прогнозирование подземного стока в дренажную сеть мелиоративных систем различного назначения. Выделение подземной составляющей дренажного стока на массивах с различными гидрогеологическими и гидродинамическими условиями. Закономерности многолетнего и внутригодового изменения дренажного стока на мелиоративных системах с различными параметрами дренажной сети и различными источниками водного питания. Роль поверхностного и подземного стока в заболачивании различных геоморфологических элементов. Влияние регулирования русл рек и устройства водохранилищ на динамику и баланс грунтовых вод малых речных бассейнов. Характер самовосполнения запасов грунтовых вод на осушаемых массивах с различной глубиной торфяника.

4. Гидрогеологические и гидродинамические условия применения вертикального и горизонтального дренажа для регулирования уровня грунтовых вод. Влияние типа водного питания на выбор способа регулирования водного режима осушаемой территории. Обобщение опыта работы горизонтального и вертикального дренажа на болотных массивах с различным режимом грунтовых вод. Гидрогеологическое и водобалансовое обоснование расчетных фильтрационных схем. Натурные исследования динамики граничных условий водоносных горизонтов, вовлекаемых в зону дренирования.

5. Принципы (критерии) мелиоративно-гидрогеологического районирования заболоченных водосборов по условиям применения горизонтального и вертикального дренажа, а также использования подземных вод на орошение.

6. Методы моделирования и гидрогеологического обоснования краткосрочных и долгосрочных прогнозов влияния масштабов и способов осушения на изменение водного режима крупных и малых водосборов. Гидрогеологическое обоснование математических моделей осушительно-увлажнительных систем регионального масштаба.

7. Методы гидрогеологических изысканий под мелиоративные и водохозяйственные проекты различной капиталоемкости. Оптимальные объемы опытных и разведочных работ при гидрогеологическом и инженерно-геологическом картировании заболоченных водосборов.

Глава 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСОВЕРШЕНСТВА СКВАЖИН ПРИ РАБОТЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

Вопрос о несовершенстве дренажных скважин и дополнительных фильтрационных сопротивлениях, вызываемых этим несовершенством, имеет большое практическое и теоретическое значение. Поэтому нами выполнен большой объем натурных, лабораторных и теоретических исследований характера движения подземных вод к скважинам [53—81]. В результате было установлено существование разрыва напорной функции (пьезометрического скачка уровней) ΔS у стенки возмущающей артезианской скважины и изучены закономерности его изменения (в последующем это явление было обнаружено Э. А. Грикевичем и нашло отражение в учебной и научно-методической литературе [30, 50, 128]). Было доказано, что величина этого разрыва (наряду с величиной промежутка высачивания Δh) представляет собой суммарные потери напора на стенке скважины и, таким образом, отражает скин-эффект и все остальные виды несовершенства возмущающей скважины. Использование величины ΔS позволило установить, что известный показатель обобщенного сопротивления (или несовершенства) возмущающей скважины ξ всегда имеет только положительные значения, а приведенный радиус возмущающей скважины r_0' всегда меньше действительного радиуса этой скважины r_0 [60—78]. Эти положения легли в основу новой модели несовершенства возмущающих грунтовых и артезианских скважин, которая излагается ниже.

§ 2.1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О НЕСОВЕРШЕНСТВЕ ДРЕНАЖНЫХ СКВАЖИН

Наиболее обстоятельно современная теория несовершенства возмущающих скважин изложена в работах [15, 17, 50, 77, 78, 128]. Например, Ф. М. Бочевер считает ([17],

с. 126), что общее сопротивление в связи с несовершенством скважины, особенно ту его часть, которая обусловливается характером вскрытия пласта, можно оценить лишь приближенно, но в некоторых случаях произвести такую оценку вообще невозможно из-за отсутствия соответствующей методики. Особенно это относится к составляющей, характеризующей сопротивление породы в прискважинной зоне. Учитывая это обстоятельство, наиболее надежным в настоящее время следует считать метод комплексной оценки суммарного сопротивления скважины по данным опытных и эксплуатационных откачек. Во многих случаях при этом величина ξ вводится в основную формулу для совершенной скважины и рассматривается фиктивная совершенная скважина с приведенным радиусом ($r_0' = r_0 \exp(-\xi)$). Величина r_0' может быть больше и меньше r_0 в зависимости от характера деформаций в прискважинной зоне и знака у показателя ξ.

Для определения величины показателя общего сопротивления $\xi_н$ несовершенных скважин по данным опытных кустовых откачек Ф. М. Бочевер рекомендует формулу [17]

$$\xi_н = \frac{2\pi T_D (S_{сн} - S_r)}{Q_н} - \ln \frac{r}{r_0}, \qquad (2.1.1)$$

где проводимость пласта T_D рассчитывается графо-аналитическим способом по данным понижений уровня в наблюдательных скважинах. При этом Ф. М. Бочевер считает, что оба вида несовершенства (по степени и характеру вскрытия пласта) вызывают дополнительное (по сравнению с совершенной скважиной) сопротивление и соответственно дополнительное понижение уровня в прискважинной зоне и в самой скважине [17].

Таким образом, в основе современной теории несовершенства реальных скважин лежат следующие положения.

1. Приведенный радиус несовершенной скважины есть радиус воображаемой совершенной скважины, имеющей тот же дебит и то же сопротивление, что и реальная несовершенная скважина.

2. Величина приведенного радиуса r_0' может быть больше и меньше величины действительного радиуса скважины r_0, т. е. могут быть случаи $r_0' \geqslant r_0$ и $r_0' \leqslant r_0$. Аналогично величина показателя суммарного сопротивления ξ может принимать как положительные (при $r_0' < r_0$), так и отрицательные (при $r_0' > r_0$) значения и будет равна нулю при $r_0' = r_0$.

3. У стенки возмущающей артезианской скважины отсутствует разрыв (скачок) между уровнем (давлением) жидкости внутри скважины и уровнем пьезометрической поверхности в пласте по внешней стенке скважины [15, 17, 18, 36, 41, 98, 103, 109, 116, 125, 130].

Последнее положение является причиной того, что на всех схемах притока к артезианским скважинам указанный разрыв не изображается и пьезометрическая поверхность плавно соединяется с уровнем жидкости в скважине [15, 17, 111, 125, 128]. Это приводит к тому, что в теории фильтрации правомерными считаются задачи о пуске скважин с постоянным забойным давлением, в которых распространение пьезометрической воронки депрессии вблизи скважины протекает согласно схеме, представленной на рис. 2.1, *а*, т. е. также без разрыва уровня на стенке скважины и, кроме того, при допущении мгновенного снижения пьезометрической поверхности вблизи скважины на величину, равную понижению уровня внутри скважины [111, 130].

4. Характерная особенность современной теории несовершенства скважин — отсутствие в ней зависимостей и даже предположений, указывающих на наличие физической или математической связи между параметрами несовершенства ξ и r_0', с одной стороны, и величиной разрыва уровней (в частности, промежутка высачивания) у стенки скважины — с другой [18, 24, 41, 111, 116, 118, 125]. На этом основании оценка несовершенства грунтовых скважин также производится

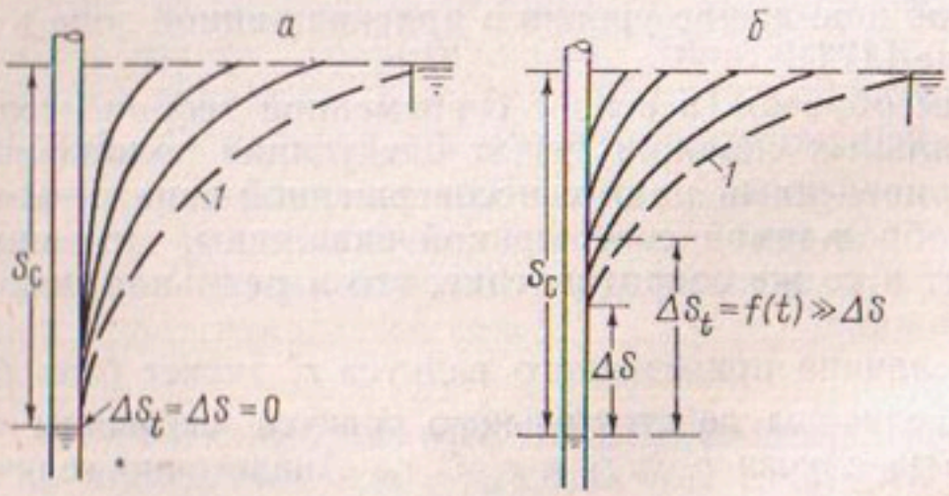


Рис. 2.1. Характер распространения воронки депрессии вблизи возмущающей скважины, пущенной в эксплуатацию с постоянным забойным давлением $S_c = \text{const}$: *а* — по В. Н. Щелкачеву; *б* — по автору; *1* — положение пьезометрической поверхности при стационарном режиме фильтрации

без учета промежутка высачивания и промежутка нависания, существование которых было обнаружено Р. Эренбергером еще в 1928 г. [8, 17, 18, 25, 110, 116, 118, 126].

5. Одним из фундаментальных положений современной теории несовершенства является вывод о том, что параметры несовершенства ξ и r_0', полученные для артезианских скважин (напорные условия), пригодны для оценки несовершенства грунтовых скважин (безнапорные условия). В связи с этим Н. Н. Веригин пишет ([24], с. 48), что фильтрационное сопротивление вблизи несовершенной скважины в безнапорном и напорном пластах одинаково. Это позволило получить простые формулы для дебита несовершенных скважин и в безнапорных пластах.

На этом основании поправка Н. Н. Веригина к формуле Дюпюи ξ_B, отражающая несовершенство артезианской скважины по степени вскрытия пласта, рекомендуется также для определения несовершенства грунтовых скважин с затопленным и незатопленным фильтром [25].

Таким образом, анализ современной теории несовершенства скважин показывает, что основным ее недостатком является то, что в этой теории несовершенство скважин не выражается через величину разрыва уровней (потерь напора) на стенке скважины. По этой причине перечисленные положения теории несовершенства во многих отношениях неполны и нуждаются в дальнейшем совершенствовании и уточнении.

§ 2.2. ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОБОБЩЕННЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДРЕНАЖНЫХ СКВАЖИН

Открытие Р. Эренбергером существования разрыва напорной функции (гидравлического скачка, или промежутка высачивания) на стенке возмущающей грунтовой скважины дало основание по-разному толковать теорию Дюпюи, поскольку при составлении известных формул притока к колодцу Дюпюи и Тим не знали о существовании этого явления и считали, что между положением депрессионной поверхности в пласте у внешней стенки скважины и уровнем воды внутри скважины нет разрыва (рис. 2.2).

Мнения по этому поводу различны. Одни исследователи в формулы Дюпюи подставляют мощность потока (понижение депрессионной поверхности) по внешней стенке скважины h_0,

другие—мощность столба воды внутри скважины h_c, а третьи считают, что при расчете дебита скважины (расхода потока) необходимо принимать величину h_c, а при расчете депрессионной поверхности — величину h_0 [53—57].

Этому вопросу посвящено много работ [46, 53, 88, 110, 125]. Нашими исследованиями установлено [53—60], что в последней точке зрения, получившей в 50-х и 60-х годах широкое распространение, расчет расхода потока (дебита скважины) противопоставляется расчету депрессионной поверхности потока, формирующей этот расход, т. е. имеет место противоречие закону Дарси, который устанавливает однозначное соответствие между скоростью фильтрации (расходом потока) и уклоном депрессионной поверхности. Был сделан важный вывод о том, что область справедливости (применения) как формул Дюпюи, так и других формул по расчету фильтрационных потоков ограничена внутренней областью фильтрации, расположенной между границами разрыва напорной функции. Эти границы могут быть представлены внешними контурами фильтров, стенками бесфильтровых скважин, каналов, бьефов и т. д. Ширина зоны раз-

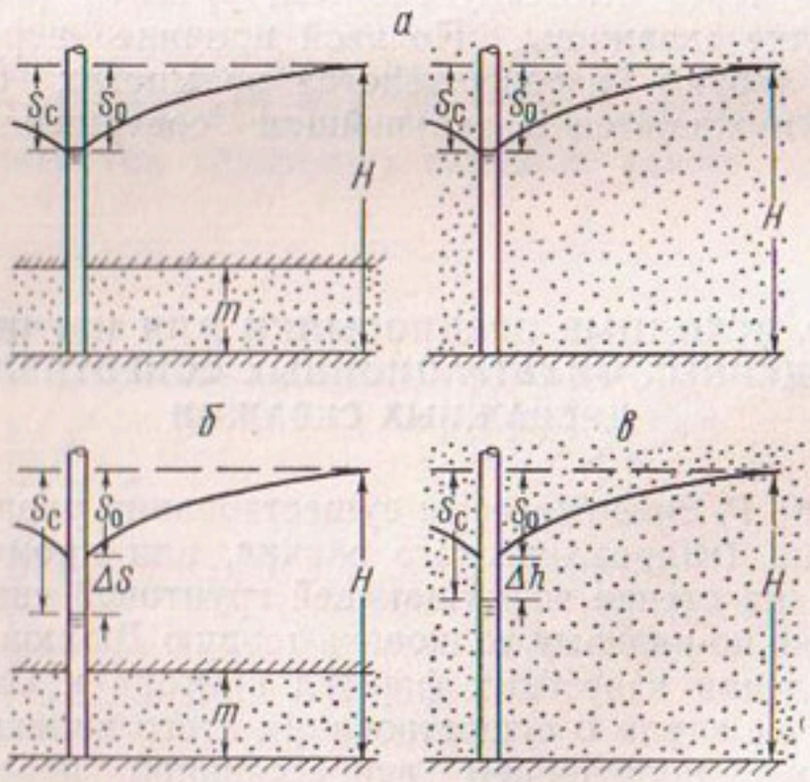


Рис. 2.2. Расположение установившейся депрессионной поверхности у внешней стенки возмущающей скважины: *а* — по Дюпюи; *б* — по автору; *в* — по Р. Эренбергеру

рыва напорной функции (в плане) остается неизвестной. Это требует, чтобы параметры пластов и фильтрационного потока определялись не по замерам уровня жидкости внутри дрены, где не существует фильтрационного потока, а по замерам уровней депрессии в пласте, начиная с некоторого расстояния от внешней стенки дрены. Очевидно, это расстояние должно быть не меньше ширины зоны разрыва напорной функции [55].

Данный вывод был развит в работах [53, 54]. Здесь указывалось, что дифференцировать напорные функции можно только в пределах пористой среды, т. е. до внешних стенок дрен, внутри которых среда не имеет пор, коэффициент фильтрации стремится к бесконечности, а напорная функция терпит максимальный разрыв. Поэтому при интегрировании дифференциальных уравнений теории фильтрации за граничные условия в частном случае следует брать значения напорной функции по внешним стенкам дрен, а не внутри их. Следовательно, поскольку на границах области фильтрации (контуре стока и контуре питания) напорная функция (потенциал) терпит разрыв, проявляющийся, в частности, в промежутке высачивания, дифференцировать напорную функцию на границах области фильтрации и, вероятно, вблизи них нельзя (функции в их точках разрыва, как известно, не дифференцируются). Поэтому уже отсюда следует, что граничные условия в задачах фильтрации должны браться внутри данной области фильтрации, где они непрерывны, а не на ее границах или за их пределами [54]. Это означало, что в формулах Дюпюи для грунтовых и артезианских скважин должны приниматься значения потенциалов фильтрационного потока по их внешним стенкам, т. е. понижения S_0 или остаточный напор h_0 [53—57].

К этому принципиальному выводу впоследствии пришли многие исследователи. Например, Э. А. Грикевич писал в 1969 г. [30]: «...величина понижения уровня воды, входящая во все расчетные формулы, равна понижению уровня именно у наружной стенки скважины и только в случае незначительных потерь напора в фильтре и обсадных трубах численно равна понижению уровня внутри скважины».

Таким образом, была доказана справедливость толкования формул Дюпюи по И. П. Кусакину — Г. Н. Каменскому [46, 88]. С этих позиций формулы Дюпюи для артезианских и грунтовых совершенных скважин было предложено записывать в виде многократных равенств, отражающих гидродинамический смысл этих формул и включающих как внутренние (S_{r_1}, S_{r_2},

h_{r_1}, h_{r_2} и т. д.), так и граничные (S_0, h_0, R, r_0) точки депрессионной поверхности [53—60]:

$$Q = \frac{2\pi T_D (S_{r_1} - S_{r_2})}{\ln (r_2/r_1)} = \frac{2\pi T_D (S_0 - S_r)}{\ln (r/r_0)} = \frac{2\pi T_D S_r}{\ln (R/r)} = \frac{2\pi T_D S_0}{\ln (R/r_0)}; \quad (2.2.1)$$

$$Q = \frac{\pi k_D (h_{r_2}^2 - h_{r_1}^2)}{\ln (r_2/r_1)} = \frac{\pi k_D (h_r^2 - h_0^2)}{\ln (r/r_0)} = \frac{\pi k_D (H^2 - h_r^2)}{\ln (R/r)} = \frac{\pi k_D (H^2 - h_0^2)}{\ln (R/r_0)}. \quad (2.2.2)$$

Представление формул Дюпюи в виде многократных равенств (2.2.1) и (2.2.2) имеет ряд преимуществ перед практикуемой формой записи их в виде нескольких однократных равенств, каждое из которых является отдельной формулой [17, 41, 116]. Основное преимущество заключается в том, что в многократных равенствах (2.2.1) и (2.2.2) *расход фильтрационного потока определяется формой кривой депрессии* [53—57]. Это значит, что в указанных равенствах расход потока (дебит скважины), депрессионная поверхность и параметры T_D и k_D соединены в одно целое. Отсюда был сделан вывод [57], что *расчет дебита (расхода потока) не следует противопоставлять расчету депрессионной кривой*, как это рекомендуют некоторые исследователи, и что формулы Дюпюи (2.2.1) и (2.2.2) обладают одинаковой точностью как при расчете кривой депрессии и параметров пласта, так и при оценке дебита скважины.

Этим самым была доказана ошибочность широко распространенного утверждения о том, что формулы Дюпюи точны для дебита и приближенны для депрессионной поверхности [125].

Благодаря указанным преимуществам запись формул Дюпюи в виде многократных равенств (2.2.1) и (2.2.2) начинает применяться многими исследователями [50, 107].

Достоинство равенств (2.2.1) и (2.2.2) еще более проявляется при их использовании в обратных методах подземной гидродинамики, поскольку в эти равенства не входит величина снижения уровня внутри возмущающей скважины S_c. Это позволило заключить, что *во избежание учета сопротивления фильтра и зоны разрыва напорной функции определение па-*

раметров пласта следует производить по замерам уровней в пласте, а не в возмущающих скважинах [55].

Данный вывод имеет большое значение для методологии опытно-фильтрационных работ. Поэтому впоследствии он был существенно дополнен на конкретных примерах определения гидрогеологических параметров по данным опытных кустовых откачек [53, 57]. В результате обработки большого числа таких материалов было установлено, что расчет расхода потока (или теоретического дебита дрен), кривых депрессий и параметров пластов следует вести только по значениям уровня в наблюдательных скважинах. Использовать для этого положение уровня в возмущающих скважинах без учета величины разрыва уровня по их стенкам не рекомендуется ввиду получающейся при этом большой погрешности [57]. Действительно, из (2.2.1) и (2.2.2) следует, что определение параметров T_D и k_D необходимо вести по положению уровня в наблюдательных скважинах:

$$T_D = \frac{Q \ln (r_2/r_1)}{2\pi (S_{r_1} - S_{r_2})} = \frac{Q \ln (r/r_0)}{2\pi (S_0 - S_r)} = \frac{Q \ln (R/r)}{2\pi S_r} = \frac{Q \ln (R/r_0)}{2\pi S_0}; \quad (2.2.3)$$

$$k_D = \frac{Q \ln (r_2/r_1)}{\pi (h_{r_2}^2 - h_{r_1}^2)} = \frac{Q \ln (r/r_0)}{\pi (h_r^2 - h_0^2)} = \frac{Q \ln (R/r)}{\pi (H^2 - h_r^2)} = \frac{Q \ln (R/r_0)}{\pi (H^2 - h_0^2)}. \quad (2.2.4)$$

Итак, мы рассмотрели первую (или основную) предпосылку для оценки несовершенства скважин, лежащую в основе последующих выводов. Эта предпосылка раскрывает гидродинамический смысл формул Дюпюи—Тима и позволяет однозначно толковать их. Она показывает, что данные формулы необходимо выводить для фильтрационного потока, образующегося в результате отбора жидкости из скважины, не выходя за пределы области фильтрации, т. е. пористой среды, на границах которой напорная функция терпит разрыв.

На практике же не менее важно использовать формулы (2.2.1) и (2.2.2) и за пределами пористой среды (или за границей разрыва напорной функции), поскольку именно здесь (к примеру, внутри возмущающей скважины) известна или задается величина снижения уровня S_c. Способ использова-

ния понижения S_c в формулах притока к скважинам и составляет содержание второй предпосылки, определяющей достоверность оценки несовершенства скважин и расчета величины разрыва уровней на их стенках. Изучению этого вопроса посвящены многие работы [53—81]. Исследования показали, что понижение уровня жидкости внутри скважины S_c существенно зависит от сопротивления фильтра и может быть определено при одновременном учете параметров пласта, фильтрационного потока и фильтра. Значит, и величина промежутка высачивания существенно зависит от гидравлического сопротивления фильтра и может быть определена тем же методом, что и понижение уровня внутри скважины S_c [55]. Применительно к проектированию вертикального дренажа этот вывод получил дальнейшее развитие и заключается в следующем [57, 60].

Основу исходных данных, по которым производится расчет дренажных скважин, составляют коэффициенты фильтрации и пьезопроводности. Методы определения этих параметров в большинстве случаев основаны на проведении одиночных опытных или пробных откачек с использованием понижения уровня воды S_c внутри возмущающей скважины [8, 17, 18, 24, 96]. Погрешность таких методов состоит в том, что величина понижения S_c в неявном виде отражает все (суммарные или обобщенные) фильтрационные и гидравлические сопротивления возмущающей скважины, т. е. всегда для совершенных и несовершенных реальных скважин понижение S_c является функцией обобщенного сопротивления (или несовершенства) возмущающей скважины. Поэтому использование в расчетных формулах (и при моделировании) величины S_c без введения достоверных поправок ξ на обобщенное сопротивление скважины приводит к тому, что определяемые такими методами параметры пласта и депрессионные поверхности зависят от ξ и являются кажущимися (по В. Н. Щелкачеву [130]), или фиктивными [53—60].

Сложность решения данной проблемы состоит в том, что несовершенство скважин зависит от режима фильтрации (установившийся или неустановившийся), гидрогеологических условий территории (глубины залегания пласта, его проницаемости, литологии, неоднородности и мощности), конструкции и технологии сооружения фильтра и т. д. [53—60]. Поэтому, как неоднократно указывалось С. К. Абрамовым, Н. Н. Веригиным, Ф. М. Бочевером, В. М. Шестаковым, Э. А. Грикевичем, В. С. Алексеевым и др. [3, 16, 17, 30, 130],

не представляется возможным дать универсальные теоретические зависимости по расчету ξ в натурных условиях. С нашей точки зрения вызывают недоверие и те значения ξ, которые получены в лабораторной обстановке и автоматически переносятся на эксплуатационные скважины. Объясняется это тем, что на фильтрационных, электролитических или щелевых моделях практически невозможно в количественном и качественном отношениях воспроизвести все сопротивления, которые возникают при бурении и эксплуатации дренажных скважин различной глубины, различной конструкции и в различных гидродинамических условиях. Наиболее надежными способами определения сопротивлений скважин являются те, которые основаны на использовании материалов опытных гидрогеологических работ, проводимых в период эксплуатации или изысканий. Полученные таким путем экспериментальные значения ξ могут быть распространены на аналогичные скважины в аналогичных природных и эксплуатационных условиях и, кроме того, могут служить критерием для оценки достоверности теоретических значений ξ, вытекающих из соответствующих расчетных формул. Возможность такой экстраполяции опытных значений ξ и указывает на необходимость всестороннего изучения несовершенства дренажных скважин в натурных условиях и оценки его влияния на точность определения фильтрационных параметров и последующего моделирования поля фильтрации.

Таким образом, можно считать доказанным, что использование в формулах притока к реальным скважинам (например, в формулах Дюпюи (2.2.1) и (2.2.2)) понижения S_c должно сопровождаться одновременным введением в эти формулы соответствующих поправок, отражающих обобщенное фильтрационное сопротивление скважины. Но из теории движения грунтовых вод к скважинам известно [116, 128], что переход от понижения S_0 к понижению S_c связан с преодолением величины разрыва напорной функции (промежутка высачивания Δh или промежутка нависания ΔH) у стенки скважины, поскольку $S_c = S_0 + \Delta h = S_0 + \Delta H$. В связи с этим возникает ряд вопросов, касающихся способов преодоления величины разрыва напорной функции на стенке грунтовой скважины и увязки этого разрыва с известными показателями несовершенства скважин ξ и r'_0.

§ 2.3. ОБНАРУЖЕНИЕ ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКОГО СКАЧКА УРОВНЕЙ У СТЕНКИ АРТЕЗИАНСКОЙ СКВАЖИНЫ. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЭТОГО ЯВЛЕНИЯ

В работе [55] впервые был сделан вывод о том, что и в артезианских скважинах существует разрыв между уровнем жидкости в скважине и пьезометрическим уровнем за внешней стенкой скважины, который по аналогии с промежутком высачивания можно назвать промежутком разрыва ΔS. Подтверждение этому факту находим и в том, что если внутризабойное давление в артезианской скважине можно снизить до какой-то величины практически мгновенно (например, в поглощающих скважинах и сквозных фильтрах), то скорость снижения пьезометрического уровня в пористой среде, как известно, всегда имеет незначительную величину. В результате при проходке горных выработок с постоянным понижением внутри их ($S_c = \text{const}$) снятие напоров в пластах происходит не мгновенно, а в течение долгого времени.

В указанной работе впервые было доказано, что в артезианских скважинах величина разрыва уровней ΔS находится в прямой пропорциональной зависимости от понижения внутри скважины S_c, и получены следующие формулы для расчета этой величины:

$$\Delta S = S_c - \frac{Q}{2\pi T_D} \ln \frac{R}{r_0}, \qquad (2.3.1)$$

$$\Delta S = S_c \xi_D / [\ln (R/r_0) + \xi_D], \qquad (2.3.2)$$

где $\xi_D = \frac{2}{N} \ln (2/\pi\omega) = \text{const}$ — поправка К. Р. Додсона и В. Т. Кардуэлла на несовершенство щелевого фильтра; N — число вертикальных рядов щелей в фильтре; ω — скважность фильтра.

В последующем теоретическому и экспериментальному изучению величины ΔS уделялось большое внимание [56, 57]. К примеру, в работе [57] на основе анализа материалов натурных исследований пьезометрического скачка было подтверждено, что у стенок артезианских дрен имеет место разрыв ΔS между уровнем жидкости в дрене и пьезометрическим уровнем по внешней стенке дрены. Величина разрыва ΔS находится в прямолинейной зависимости от величины понижения уровня в дрене S_c и величины дебита и в реальных гидрогеологических одиночных скважинах составляет 50—80% от величины S_c.

Формулы (2.3.1) и (2.3.2) применимы в тех случаях, когда имеются фиксированные значения S_c. При расчете величины пьезометрического разрыва для других задаваемых величин S_c, больших или меньших по сравнению с фиксированными, можно пользоваться формулами (2.3.3)—(2.3.14).

Известно, что во многих случаях удельный дебит артезианской скважины и грунтовой скважины с затопленным фильтром q_c сохраняет постоянное значение в широком диапазоне изменения дебита скважины, т. е.

$$q_c = \frac{Q_1}{S_{c1}} = \frac{Q_2}{S_{c2}} = \dots = \frac{Q}{S_c} = \frac{2\pi T_{kR}}{\ln(R/r_0)} = \text{const}. \quad (2.3.3)$$

По аналогии с q_c введем новый параметр — удельный расход фильтрационного потока q_0, определяемый как отношение расхода потока (дебита скважины) к понижению пьезометрической (или депрессионной в безнапорном потоке) поверхности в пласте по внешней стенке скважины S_0. Опытами установлено [53, 57], что в напорных условиях этот параметр также обладает высокой устойчивостью (рис. 2.3):

$$q_0 = \frac{Q_1}{S_{01}} = \frac{Q_2}{S_{02}} = \dots = \frac{Q}{S_0} = \frac{2\pi T_D}{\ln(R/r_0)} = \text{const}. \quad (2.3.4)$$

В отличие от удельного дебита скважины q_c параметр q_0 не зависит от несовершенства возмущающей скважины и на этом основании может использоваться при оценке водообильности водоносных горизонтов.

Поскольку $\Delta S = \Delta H = S_c - S_0$, то из (2.3.3) и (2.3.4) имеем

$$\Delta S = \Delta H = Q\left(\frac{1}{q_c} - \frac{1}{q_0}\right). \quad (2.3.5)$$

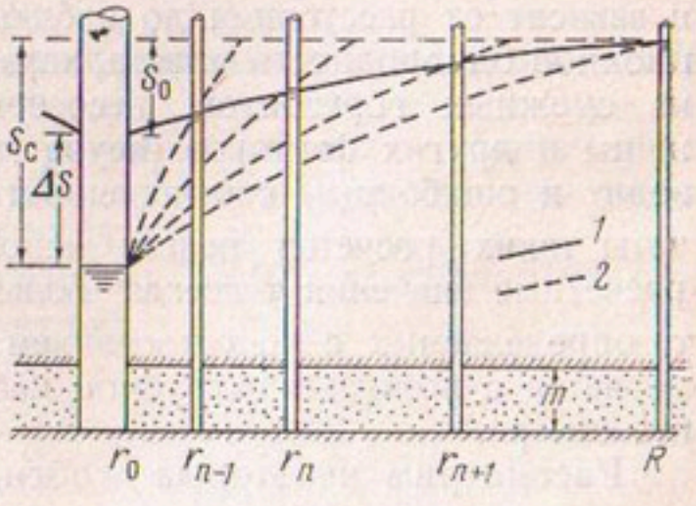


Рис. 2.3. Схема расчета коэффициента фильтрации различными способами при установившейся фильтрации: *1* — реальная депрессионная поверхность; *2* — фиктивные депрессионные поверхности, исходящие из положения уровня S_c внутри возмущающей скважины

Различные свойства параметров q_c и q_0 позволяют получить новый, весьма удобный критерий для оценки несовершенства артезианской скважины. Действительно, из (2.3.3) и (2.3.4) находим

$$\tau = S_0/S_c = q_c/q_0 = \text{const}, \tag{2.3.6}$$

откуда следует

$$S_0 = \tau S_c \tag{2.3.7}$$

и

$$\Delta S = \Delta H = S_c(1 - \tau). \tag{2.3.8}$$

Параметр τ характеризует эффективность работы артезианской скважины и может быть назван коэффициентом эффективности (или коэффициентом полезного действия) скважины [53, 57, 60]. Чем больше τ скважины, тем эффективнее работает она, т. е. тем больше дебит при том же понижении уровня в ней S_c.

Поскольку $S_c \gg S_0$ и $\Delta S \gg 0$, то всегда $\tau \ll 1$. В одиночных гидрогеологических скважинах в большинстве случаев величина τ изменяется от 0,05 до 0,5. К примеру, в скважинах глубиной до 50—70 м, оборудованных блочными, сетчатыми и кожуховыми фильтрами, величина коэффициента эффективности составляет 0,1—0,3; в бесфильтровых скважинах и скважинах с гравийными и щелевыми фильтрами параметр τ изменяется от 0,2 до 0,4 [57, 64, 74].

Исследования положения реальной пьезометрической и депрессионной поверхности в пласте вблизи возмущающей скважины показывают, что действительные величины понижений этой поверхности по внешней стенке возмущающей скважины S_0^* обычно значительно меньше расчетных величин S_0, определяемых по положению уровня в наблюдательных скважинах, т. е. всегда имеет место соотношение $S_0^* < S_0 < S_c$. Погрешность определения S_0^* расчетным путем может достигать 100% и более и зависит от расстояния до наблюдательных скважин, фильтрационной однородности пласта, характера проявления перетекания из смежных горизонтов, несовершенства возмущающей скважины и других факторов (неучет этих факторов нередко приводит к ошибочным соотношениям $S_0 > S_c$, $\tau > 1$, $r_0' > r_0$; результаты таких расчетов нельзя использовать). По этой причине расчетные значения τ всегда больше действительных значений τ, определяемых с использованием понижения S_0^*, которое замеряется с помощью затрубной наблюдательной скважины или пьезометра.

Рассмотрим некоторые особенности определения ΔS при

наличии осложняющих граничных сопротивлений, а также в условиях неустойчивого контура питания (радиуса влияния), перемещающегося при изменении интенсивности возмущения. В этих случаях, как показали опыты в фильтрационных лотках [73], уравнения индикаторных кривых для скважины $Q=f(S_c)$ и фильтрационного потока $Q=f(S_0)$ следует записывать так:

$$Q = q_c' (S_c - S_c^0) = q_0' (S_0 - S_0^0), \qquad (2.3.9)$$

где

$$q_c' = (Q_2 - Q_1)/(S_{c2} - S_{c1}); \quad q_0' = (Q_2 - Q_1)/(S_{02} - S_{01});$$

S_c^0 и S_0^0 — отрезки осей понижений уровня, отсекаемые продолжением прямолинейных участков графиков соответственно $Q = f(S_c)$ и $Q=f(S_0)$. Величины этих отрезков являются аппроксимационными константами и в одном и том же водоносном горизонте могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Например, при работе грунтовой скважины с затопленным фильтром часто наблюдаются случаи, когда внутри скважины $S_c^0 > 0$, по внешней стенке скважины $S_0^0 < 0$; в то же время могут быть случаи, когда в одной и той же скважине $S_c^0 < 0$ и $S_0^0 < 0$.

Если в уравнении (2.3.9) отрезки S_c^0 и S_0^0 отличны от нуля, то удельные дебиты скважины $q_c = Q/S_c$ и удельные расходы фильтрационного потока $q_0=Q/S_0$, определяемые по одной точке индикаторной кривой, становятся функциями дебита или понижения уровня:

$$q_c = f(S_c) = q_c' (1 - S_c^0/S_c), \qquad (2.3.10)$$

$$q_0 = f(S_0) = q_0' (1 - S_0^0/S_0). \qquad (2.3.11)$$

При $S_c^0 = S_0^0 = 0$ эти функции переходят в константы (2.3.3) и (2.3.4).

В работах [53, 57, 60] приведено большое количество результатов опытных откачек, подтверждающих высокую точность формул (2.3.10) и (2.3.11).

При наличии закономерностей (2.3.9) коэффициент эффективности скважины примет вид

$$\tau' = \frac{q_c'}{q_0'} = \frac{S_0 - S_0^0}{S_c - S_c^0} = \text{const} \qquad (2.3.12)$$

и тогда вместо константы (2.3.6) будет иметь место функция $\tau = f(S_c)$:

$$\tau = S_0^0/S_c^0 + \tau'(1 - S_c^0/S_c). \qquad (2.3.13)$$

Аналогично вместо прямой (2.3.8), исходящей из начала координат, при наличии зависимостей (2.3.9) будем иметь прямую в отрезках

$$\Delta S = \Delta S^0 + \alpha S_c, \qquad (2.3.14)$$

где $\Delta S^0 = \tau' S_c^0 - S_0^0$ — отрезок оси ΔS, отсекаемый графиком $\Delta S = f(S_c)$; $\alpha = 1 - \tau'$ — угловой коэффициент этой прямой.

Формула (2.3.14) выводится путем подстановки значения τ, определяемого выражением (2.3.13), в равенство (2.3.8).

Итак, многочисленными опытами в лабораторных и натурных условиях, а также с помощью выражений (2.3.5), (2.3.8) и (2.3.14) мы установили, что величина пьезометрического разрыва ΔS находится в линейной зависимости от понижения уровня внутри возмущающей скважины S_c и в одиночных гидрогеологических скважинах при установившейся фильтрации составляет не менее половины величины S_c. Отсюда следует, что при пуске артезианской скважины в работу то ли с постоянным забойным давлением, то ли с постоянным расходом всегда на ее стенке будет возникать пьезометрический скачок ΔS и расположение пьезометрической кривой в пласте вблизи возмущающей скважины будет резко отличным от того, которое показано на рис. 2.1, *а* и наблюдается при отсутствии скачка ΔS. Это значит, что в действительности при пуске скважины в работу с постоянным забойным давлением ($S_c = \text{const}$) или с постоянным расходом ($Q = \text{const}$) перераспределение давления в пласте будет иметь вид, представленный на рис. 2.1, *б*. Поэтому задачи подземной гидродинамики, решенные в предположении отсутствия разрыва уровней ΔS (прежде всего задачи о пуске скважины с постоянным забойным давлением), необходимо использовать критически исходя из наличия пьезометрического скачка ΔS и его изменяемости при неустановившейся фильтрации. В работах [64, 74] показано, что из существования неустановившейся величины пьезометрического разрыва ΔS_t следует, что при пуске скважины с постоянным понижением уровня в ней ($S_c = \text{const}$) по внешней стенке скважины в пласте будет происходить снижение уровня и условие $S_0 = \text{const}$ не будет иметь места (рис. 2.1, *б*). Это значит, задачи неустановившейся фильтрации, решенные в предположении одновременного существования условий $S_c =$

$=\text{const}$ и $S_0=\text{const}$, не будут иметь подтверждения в реальных условиях.

Таким образом, обнаружение пьезометрического скачка уровней у стенки возмущающей артезианской скважины имеет большое значение еще и потому, что позволяет правильно задавать граничные условия на контуре реальных стоков и источников, а следовательно, и правильно решать задачи по прогнозированию пластового давления при проектировании вертикального дренажа, водопонижения, водозаборов подземных вод, а также при разработке нефтяных и газовых месторождений.

Изложенное дает основание заключить, что существование разрыва напорной функции Δh, ΔH или ΔS у стенки реальной возмущающей скважины следует считать основным свойством возмущающих скважин. Это свойство можно назвать также принципом невозможности существования возмущающей скважины без скачка напорной функции у ее стенки. Данный принцип является следствием первого закона термодинамики или закона сохранения энергии.

§ 2.4. ВЛИЯНИЕ НЕСОВЕРШЕНСТВА ВОЗМУЩАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Опытные кустовые откачки при установившемся движении позволяют определять коэффициент фильтрации (или проводимости) пласта двумя способами: отдельно по наблюдательным скважинам (1-й способ) и по возмущающей и наблюдательным скважинам вместе (2-й способ). В первом способе расчет коэффициента фильтрации производится по реальной (истинной) депрессионной поверхности фильтрационного потока, фиксируемой наблюдательными скважинами, и применяются уравнения Дюпюи (2.2.3) и (2.2.4).

Если использовать уровень в возмущающей и любой из наблюдательных скважин (рис. 2.3), то уравнения (2.2.1) и (2.2.2) принимают следующий вид [53, 60]:

$$Q = \frac{2\pi T_{kr_1}(S_c - S_{r_1})}{\ln(r_1/r_0)} = \frac{2\pi T_{kr_2}(S_c - S_{r_2})}{\ln(r_2/r_0)} = \ldots =$$

$$= \frac{2\pi T_{kR} S_c}{\ln(R/r_0)}; \qquad (2.4.1)$$

$$Q = \frac{\pi k_{hr_1}(h_{r_1}^2 - h_c^2)}{\ln(r_1/r_0)} = \frac{\pi k_{hr_2}(h_{r_2}^2 - h_c^2)}{\ln(r_2/r_0)} = \ldots =$$

$$= \frac{\pi k_{hR}(H^2 - h_c^2)}{\ln(R/r_0)}. \qquad (2.4.2)$$

В уравнениях (2.4.1) и (2.4.2) коэффициент фильтрации k_{hr} определяется по возмущающей и любой из наблюдательных скважин вместе без учета существования пьезометрического скачка ΔS и промежутка высачивания Δh у стенки возмущающей скважины. Этот способ оценки водопроницаемости применяется прежде всего при наличии одиночных опытных откачек и, следовательно, из-за своей экономичности является одним из основных при проведении гидрогеологических съемок и изысканий [8, 24, 96, 107, 108, 118].

Обнаружение пьезометрического скачка уровней дало основание поставить вопрос о достоверности значений водопроницаемости, определяемой по формулам (2.4.1) и (2.4.2), и необходимости учета величины этого скачка в прямых и обратных задачах динамики подземных вод. Исследования показали [53, 60], что расчетные значения коэффициента фильтрации k_{hr} (или водопроводимости T_{hr}) являются функцией расстояния до наблюдательных скважин r и величины разрыва уровней ΔS, поскольку расход потока рассчитывается по фиктивным депрессионным поверхностям, уклон которых определяется величинами r и ΔS. Из рис. 2.3 видно, что с удалением наблюдательных скважин от возмущающей и уменьшением величины пьезометрического разрыва фиктивные депрессионные поверхности выполаживаются, всегда оставаясь круче реальной депрессионной поверхности. Это приводит к тому, что значения T_{hr} возрастают при увеличении r и уменьшении ΔS, всегда оставаясь меньше величины T_D. Очевидно, только при $\Delta S = 0$ функция $T_{hr} = f(r)$ переходит в константу T_D. Определим вид этой функции.

Записывая (2.4.1) для двух значений r, найдем

$$T_{hr_2} - T_{hr_1} = \frac{Q}{2\pi}\left[\frac{\ln(r_2/r_0)}{S_c - S_{r_2}} - \frac{\ln(r_1/r_0)}{S_c - S_{r_1}}\right]. \qquad (2.4.3)$$

С другой стороны, из (2.2.1) имеем

$$\frac{Q}{2\pi} = T_D \frac{S_{r_1} - S_{r_2}}{\ln(r_2/r_1)} = T_D \frac{S_0 - S_{r_2}}{\ln(r_2/r_0)} =$$

$$= T_D \frac{S_0 - S_{r_1}}{\ln(r_1/r_0)}. \qquad (2.4.4)$$

В правой части (2.4.3) перемножим $Q/2\pi$ на разность в квадратных скобках, используя вместо $Q/2\pi$ его значение из (2.4.4), выраженное сначала третьим, а затем четвертым членом этого равенства:

$$T_{kr_2} - T_{kr_1} = T_D \left(\frac{S_0 - S_{r_2}}{S_c - S_{r_2}} - \frac{S_0 - S_{r_1}}{S_c - S_{r_1}} \right). \quad (2.4.5)$$

Подставляя в (2.4.5) вместо T_D его значение из (2.2.3), выраженное первым равенством

$$T_D = [Q \ln (r_2/r_1)]/2\pi (S_{r_1} - S_{r_2}),$$

и разделив затем (2.4.5) на $\ln (r_2/r_1)$, получим

$$\frac{T_{kr_2} - T_{kr_1}}{\ln (r_2/r_1)} = \frac{Q}{2\pi} \frac{1}{S_{r_1} - S_{r_2}} \left(\frac{S_0 - S_{r_2}}{S_c - S_{r_2}} - \frac{S_0 - S_{r_1}}{S_c - S_{r_1}} \right). \quad (2.4.6)$$

Повторив аналогичные операции для других значений r, придем к выводу, что соотношение (2.4.6) останется неизменным. Это говорит о том, что данное соотношение, справедливое для любых пар значений r, является константой. Следовательно, можем записать

$$\alpha_k = \frac{T_{kr_2} - T_{kr_1}}{\ln (r_2/r_1)} = \text{const} = f(\Delta S, \Delta H, \Delta h), \quad (2.4.7)$$

где

$$\alpha_k = \frac{Q}{2\pi} \frac{1}{S_{r_1} - S_{r_2}} \left(\frac{S_0 - S_{r_2}}{S_c - S_{r_2}} - \frac{S_0 - S_{r_1}}{S_c - S_{r_1}} \right) =$$

$$= \frac{Q}{2\pi} \frac{1}{S_r} \left(\frac{S_0}{S_c} - \frac{S_0 - S_r}{S_c - S_r} \right) = \text{const}. \quad (2.4.8)$$

Из (2.4.7) окончательно имеем

$$T_{kr} = \frac{Q \ln (r/r_0)}{2\pi (S_c - S_r)} = T_{kr}^0 + \alpha_k \ln r \quad (2.4.9)$$

или при $r = R$

$$T_{kR} = \frac{Q \ln (R/r_0)}{2\pi S_c} = T_{kr}^0 + \alpha_k \ln R, \quad (2.4.10)$$

где T_{kr}^0 — отрезок оси T_{kr}, отсекаемый графиком $T_{kr} = f(\ln r)$; α_k — тангенс угла наклона графика $T_{kr} = f(\ln r)$ к оси $\ln r$ при данном сопротивлении возмущающей скважины.

Зависимость (2.4.9) также характерна для уравнения (2.4.2), т. е.

$$k_{kr} = \frac{Q \ln (r/r_0)}{\pi (h_r^2 - h_c^2)} = k_{kr}^0 + \alpha_k^* \ln r \qquad (2.4.11)$$

или при $r=R$

$$k_{kR} = \frac{Q \ln (R/r_0)}{\pi (H^2 - h_c^2)} = k_{kr}^0 + \alpha_k^* \ln R. \qquad (2.4.12)$$

Неучет существования пьезометрического скачка ΔS у стенки артезианской скважины или неточное его определение косвенными методами (например, через поправки на несовершенство ξ_x) приводит к тому, что кажущиеся величины коэффициента фильтрации k_{xr} подчиняются уравнению (2.4.9) и становятся в несколько (а то и в десятки) раз меньшими по сравнению с действительной величиной водопроницаемости пласта. Это значит, что уравнения (2.4.9)—(2.4.12) целесообразно использовать в качестве критерия существования ΔS и неточного определения величины истинного коэффициента фильтрации пласта k_D и показателя суммарного сопротивления ξ.

Положим в (2.4.8) $r_1=r_0$, $r_2 = R$. Тогда $S_{r_1} = S_0$, $S_{r_2} = 0$ и формула (2.4.8) примет вид

$$\alpha_k = \frac{Q}{2\pi S_c} = \frac{Q}{2\pi (S_0+\Delta S)}. \qquad (2.4.8а)$$

На практике также необходимо рассматривать зависимость коэффициента фильтрации k_{kr} (или проводимости T_{kr}) от величины гидравлического сопротивления возмущающей скважины (или величины разрыва уровня у ее стенки). Выясним характер функции $T_{kr}=f(\Delta S)$.

Приравнивая значения дебитов в (2.2.1) и (2.4.9), получаем

$$T_{kr} = T_D \frac{S_0 - S_r}{S_c - S_r} = \frac{T_D}{1 + \Delta S/(S_0 - S_r)}. \qquad (2.4.9а)$$

Графики функций $\alpha_k = f(\Delta S)$ и $T_{kr} = f(\Delta S)$ приведены в работе [60].

Согласно (2.4.9а), при $\Delta S \to 0$ значения $T_{kr} \to T_D$. Отсюда следует, что выражение (2.4.9) может служить критерием для оценки достоверности определения истинной величины коэффициента фильтрации k_D (или водопроводимости T_D) и, кроме того, указывает на наличие разрыва уровней ΔS у стенки возмущающей скважины.

Пусть в (2.4.9а) $r \to R$, тогда будут иметь место пределы: $S_r \to 0$ и $T_{kr} \to T_{kR}$. В этом случае из (2.4.9а) получаем предельное значение T_{kr}:

$$T_{kR} = T_D (S_0/S_c) = \text{const}. \qquad (2.4.10а)$$

Формула (2.4.10а) позволяет существенно расширить наши представления о коэффициенте эффективности возмущающей скважины τ. Действительно, из (2.4.10а) и (2.3.6) находим

$$\tau = \frac{S_0}{S_c} = \frac{T_{kR}}{T_D} = \frac{q_c}{q_0} = \frac{S_r \ln (R/r_0)}{S_c \ln (R/r)} = \text{const}, \qquad (2.3.6а)$$

откуда

$$T_{kR} = \tau T_D = T_D/(1 - \Delta S/S_c) = \text{const}. \qquad (2.4.10б)$$

По поводу параметра k_{kR} (или T_{kR}) В. Н. Щелкачев пишет, что нарушение проницаемости пласта в призабойной зоне и нарушение гидродинамического совершенства скважины сильно влияют на величину понижения забойного давления, соответствующего заданному дебиту скважины, а следовательно, и на величину удельного дебита (коэффициента продуктивности) скважины q_c. При определении проницаемости по величине q_c пользуются равенством

$$k_{q_c} = k_{kR} = \frac{Q \ln (R/r_0)}{2\pi m S_c} = q_c \frac{\ln (R/r_0)}{2\pi m}. \qquad (2.4.13)$$

В формуле (2.4.13) в обозначение коэффициента фильтрации введен индекс q_c. Этим подчеркивается, что проницаемость пласта определяется именно по удельному дебиту скважины q_c. Если скважина гидродинамически несовершенна и проницаемость пласта в призабойной зоне нарушена, то величина k_{kR}, подсчитанная по формуле (2.4.13), не может отражать истинной проницаемости пласта. Величину k_{kR}, подсчитанную по формуле (2.4.13) и зависящую не только от истинной проницаемости пласта, но и от состояния забоя и призабойной зоны скважины, «будем называть кажущейся проницаемостью. Сравнение величин k_D и k_{kR} может быть весьма полезно, ибо оно сразу выявляет, насколько сильно изменена проницаемость пласта и насколько сильно сказывается нарушение гидродинамического совершенства скважины» ([130], с. 285).

В этом отношении значительный интерес представляет формула (2.4.10б), в которой идеи В. Н. Щелкачева нашли дальнейшее развитие. Действительно, из (2.4.10б) видно, что

эта формула устанавливает характер зависимости кажущейся водопроводимости T_{kR}, с одной стороны, от истинной водопроводимости пласта T_D и величины пьезометрического скачка на стенке скважины ΔS, с другой. Более того, поскольку всегда $\Delta S>0$ и $\tau<1$, то из (2.4.10б) следует важный вывод о том, что независимо от состояния проницаемости призабойной зоны всегда величина кажущегося коэффициента фильтрации k_{kR} значительно меньше величины истинного коэффициента фильтрации k_D, т. е. всегда $k_{kR}<k_D$ или $T_{kR}<T_D$.

Параметр k_{kR} является предельным (максимальным) значением величин k_{kr}, определяемых по формулам (2.4.9) или (2.4.11). На этом основании значения коэффициентов фильтрации k_{kr} и проводимости T_{kr}, следуя В. Н. Щелкачеву, будем также называть кажущимися, или фиктивными.

Таким образом, можно заключить, что кажущийся коэффициент фильтрации k_{kr}, определяемый по возмущающей и наблюдательным скважинам вместе (второй способ), зависит от обобщенного сопротивления возмущающей скважины (или величины разрыва уровней у ее стенки) и расстояния до наблюдательной скважины. Его максимальная величина k_{kR}, определяемая с учетом радиуса влияния (одиночные пробные и опытные откачки), обычно в 2—3 и более раза меньше истинной водопроницаемости k_D, определяемой первым способом (по наблюдательным скважинам). Это значит, что запасы подземных вод, подсчитанные по параметрам T_{xr} или k_{xr} [8, 18, 24, 96, 107, 108], занижены и нуждаются в переоценке. Отсюда следует, что при подсчете запасов подземных вод, оценке водообильности водоносных горизонтов и определении общих притоков к дренажу необходимо использовать параметры k_D или T_D [53—60, 73, 77].

§ 2.5. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСОВЕРШЕНСТВА АРТЕЗИАНСКИХ СКВАЖИН. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ПРИВЕДЕННОГО РАДИУСА

В § 2.1 было показано, что в теории фильтрации наиболее приемлемым способом оценки несовершенства скважин считается использование в формулах Дюпюи обобщенных параметров сопротивления ξ и r_0'. Докажем, что применение такого способа оценки несовершенства скважин равносильно определению величины пьезометрического скачка ΔS у стенки скважины. Иначе говоря, установим наличие прямой зависимости параметров ξ и r_0' от величин ΔS и τ. Исследо-

вания начнем с выяснения геометрического смысла параметра r_0' [71—73, 77].

Понятие о приведенном (расчетном или эффективном) радиусе r_0' широко применяется при фильтрационных расчетах несовершенных скважин. При этом под величиной r_0' понимается радиус воображаемой совершенной скважины, дебит которой при прочих равных условиях равен дебиту несовершенной скважины радиуса r_0, т. е. при введении r_0' несовершенная скважина радиуса r_0 заменяется равнодебитной совершенной скважиной радиуса r_0' [17, 41, 45, 95, 98, 99, 103, 111, 112, 128].

Из приведенного определения величины r_0' следует, что при установившейся и неустановившейся фильтрации она имеет одно и то же значение $r_0' = \text{const}$, которое может быть меньше и больше действительного радиуса r_0 [15, 17, 126]. Эти условия, однако, часто не соблюдаются, если для установившейся и неустановившейся фильтрации расчет r_0' вести существующими способами, Приведем типичный пример определения r_0'. В работе [126, с. 133, 135] для одной и той же возмущающей скважины радиуса $r_0 = 0{,}1$ м получены следующие значения r_0': для периода неустановившейся фильтрации $r_0' = 3{,}55$ м, для периода установившегося режима $r_0' = 23{,}8$ м. Данные величины r_0' объяснены тем, что «сопротивления притоку в призабойной зоне отсутствуют и что они меньше сопротивлений притоку во всей остальной области дренирования. Такое явление можно наблюдать, например, после удачно проведенного гидроразрыва пласта».

Таким образом, помимо того что для обоих периодов фильтрации значения r_0' оказались различными по величине, оба значения r_0' в 35 и 238 раз (соответственно для неустановившейся и установившейся фильтрации) больше действительного радиуса скважины r_0. Очевидно, полученные величины приведенного радиуса находятся в противоречии с физическими (гидродинамическими) представлениями об этом параметре. Отсюда следует, что целесообразно точно и однозначно установить физический и геометрический смысл параметра r_0' и дать ему такое определение и методику расчета, чтобы исключались отмеченные противоречия при его вычислении в условиях установившейся и неустановившейся фильтрации.

Для решения поставленной задачи уравнение (2.4.9) преобразуем таким образом, чтобы вместо функции k_{kr} (или T_{kr}) получить константу k_D (или T_D). Для этого возмущаю-

щую скважину заменим цилиндром, состоящим из пористой среды проводимостью T_D. В результате такой замены область фильтрации T_D распространится к началу координат, где мы расположим математический сток интенсивностью Q.

Полученная таким образом область фильтрации является расширенной и однородной по проницаемости. Используя эту область, депрессионную поверхность Дюпюи продолжим внутрь возмущающей скважины до пересечения ее с уровнем S_c. Поскольку уравнение поверхности Дюпюи является логарифмической функцией, пересечение этой поверхности с уровнем S_c произойдет на некотором расстоянии r'_0 от начала координат ($0<r'_0<r_0$) и для расстояний r'_0 и r с понижениями депрессионной поверхности соответственно S_c и S_r формула (2.4.9) примет вид (рис. 2.4)

$$T_D = \frac{Q \ln (r/r'_0)}{2\pi (S_c - S_r)} = \frac{Q \ln (R/r'_0)}{2\pi S_c} . \qquad (2.5.1)$$

Следуя И. А. Чарному, Ю. П. Борисову, В. Н. Щелкачеву, В. И. Щурову, Н. Н. Веригину и др., преобразуем форму-

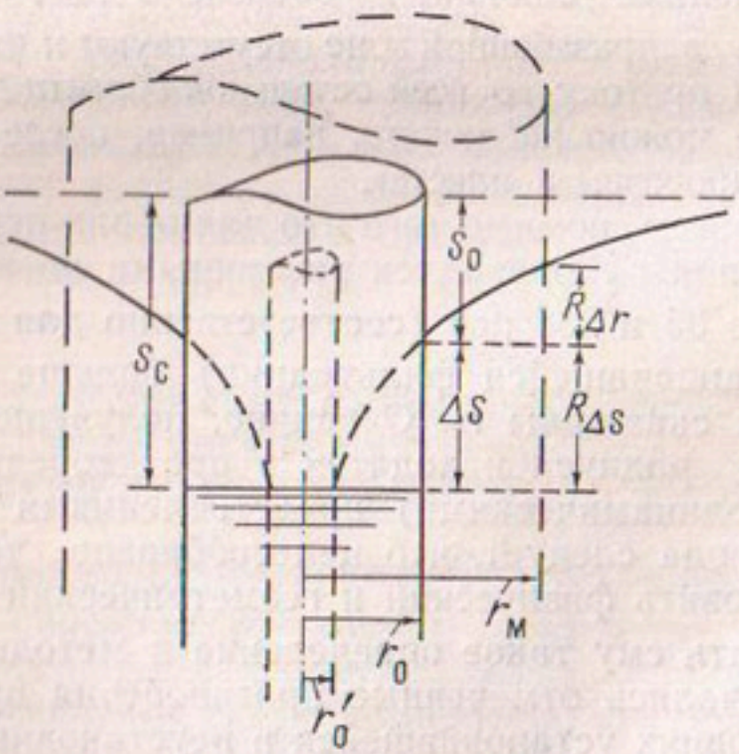


Рис. 2.4. Схема построения приведенного радиуса возмущающей артезианской скважины и его учета при моделировании скважины методом ЭГДА

лу (2.5.1) таким образом, чтобы вместо радиуса r_0' в ней был действительный радиус r_0. Для этого положим

$$\xi = \ln (r_0/r_0') = \text{const}. \qquad (2.5.2)$$

Тогда формула (2.5.1) примет вид

$$T_D = \frac{Q[\ln (r/r_0) + \xi]}{2\pi (S_c - S_r)} = \frac{Q[\ln (R/r_0) + \xi]}{2\pi S_c}. \qquad (2.5.3)$$

Построенный таким способом параметр r_0' является приведенным радиусом возмущающей скважины (совершенной или несовершенной). Из выражения (2.5.1) видно, что r_0' и S_c — это координаты точки пересечения пьезометрической поверхности Дюпюи с уровнем жидкости в скважине S_c. Иначе говоря, *приведенный радиус r_0' — это абсцисса точки пьезометрической поверхности Дюпюи, продолженной внутрь возмущающей скважины и имеющей ординату (понижение) S_c*. Отсюда следует, что абсцисса r_0' является функцией ординаты S_c. Но так как величина S_c в неявном виде отражает все (суммарные или обобщенные) фильтрационные и гидравлические сопротивления возмущающей скважины, то, очевидно, и приведенный радиус также отражает обобщенное сопротивление возмущающей скважины. Таким образом, *при введении r_0' осуществляется переход от понижения S_0 к понижению S_c, т. е. определение r_0' равносильно определению величины разрыва уровней ΔS.*

Этот вывод впервые был опубликован в работах [77, 78]. Он лежит в основе всех наших решений по оценке несовершенства возмущающих скважин и играет фундаментальную роль в раскрытии математической структуры и физического смысла этих решений.

Из (2.5.1) — (2.5.3), учитывая (2.3.8) и (2.3.6а), получаем формулы для определения параметров ξ и r_0' по данным опытных кустовых откачек [69, 72, 73, 77, 78]:

$$r_0' = r \exp\left[-\frac{2\pi T_D (S_c - S_r)}{Q}\right] = \frac{r_0^{1/\tau}}{R^{1/\tau - 1}} =$$

$$= r_0 \exp(-2\pi T_D \Delta S/Q) = r_0 \exp(-\xi); \qquad (2.5.4)$$

$$\xi = \frac{2\pi T_D (S_c - S_r)}{Q} - \ln \frac{r}{r_0} = \frac{2\pi T_D S_c}{Q} - \ln \frac{R}{r_0}. \qquad (2.5.5)$$

В последнем выражении переменную r будем приближать к внешней стенке возмущающей скважины, т. е. к точке $r = r_0$. Тогда ординаты S_r перейдут в понижение S_0, $\ln(r_0/r_0) = 0$ и формула (2.5.5) примет вид [71, 73, 77]

$$\xi = 2\pi T_D \frac{\Delta S}{Q} = \left(\frac{1}{\tau} - 1\right) \ln \frac{R}{r_0} = \ln \frac{r_0}{r_0'} \qquad (2.5.6)$$

или, если представить показатели обобщенного сопротивления ξ, τ, r_0' в виде суммы отдельных сопротивлений,

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 + \cdots + \xi_x = 2\pi T_D (\Delta S_1 + \Delta S_2 + \cdots + \Delta S_x)/Q =$$
$$= \left(\frac{1}{\tau_1 + \tau_2 + \cdots + \tau_x} - 1\right) \ln \frac{R}{r_0} =$$
$$= \ln [r_0/(r_{01}' + r_{02}' + \cdots + r_{0x}')], \qquad (2.5.7)$$

где поправки ξ_x, τ_x, r_{0x}' эквивалентны соответствующим величинам разрыва уровней ΔS_x.

Формула (2.5.6) весьма удобна для расчета показателя обобщенного сопротивления ξ. В табл. 2.1 и на рис. 2.5 приведены значения функции

$$\xi = \left(\frac{1}{\tau} - 1\right) \ln \frac{R}{r_0}$$

для различных величин аргументов соответственно $\ln(R/r_0)$ и τ.

Из (2.5.6) находим, что коэффициент эффективности τ связан следующими соотношениями с показателями обобщенного сопротивления ξ и r_0' [73]:

$$\tau = 1 - \frac{\Delta S}{S_c} = \frac{\ln(R/r_0)}{\ln(R/r_0')} = \frac{\ln(R/r_0)}{\ln(R/r_0) + \xi}. \qquad (2.5.8)$$

Формула (2.5.6) позволяет выразить величину пьезометрического разрыва ΔS через коэффициенты суммарного сопротивления возмущающей скважины ξ, r_0', τ:

$$\Delta S = \frac{\xi}{2\pi T_D} Q = \frac{\ln(r_0/r_0')}{2\pi T_D} Q = \frac{(1/\tau - 1)\ln(R/r_0)}{2\pi T_D} Q =$$
$$= (S_c - S_r) \frac{\ln(r_0/r_0')}{\ln(r/r_0')} = S_c \frac{\ln(r_0/r_0')}{\ln(R/r_0')} = S_0 \frac{\ln(r_0/r_0')}{\ln(R/r_0)}. \qquad (2.5.9)$$

Таблица 2.1

Значения коэффициента обобщенного сопротивления дренажных скважин ξ

τ	$\ln(R/r_0)$					
	4	6	8	10	12	14
0,04	96,00	144,0	192,0	240,0	288,0	336,0
0,06	62,68	94,02	125,4	156,7	188,0	219,4
0,08	46,00	69,00	92,00	115,0	138,0	161,0
0,10	36,00	54,00	72,00	90,00	108,0	126,0
0,12	29,32	43,98	58,64	73,30	87,96	102,6
0,14	24,56	36,84	49,12	61,40	73,68	85,96
0,16	21,00	31,50	42,00	52,50	63,00	73,50
0,18	18,20	27,30	36,40	45,50	54,60	63,70
0,20	16,00	24,00	32,00	40,00	48,00	56,00
0,25	12,00	18,00	24,00	30,00	36,00	42,00
0,30	9,32	13,98	18,64	23,30	27,96	32,62
0,35	7,04	10,56	14,08	17,60	21,12	24,64
0,40	6,00	9,00	12,00	15,00	18,00	21,00
0,45	4,89	7,33	9,78	12,22	14,66	17,11
0,50	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00
0,55	3,27	4,91	6,54	8,18	9,82	11,45
0,60	2,67	4,00	5,33	6,67	8,00	9,33

Многократное равенство (2.5.9) легко построить, если пьезометрическую поверхность Дюпюи изобразить в координатах $S_r - \ln r$ и продлить ее внутрь возмущающей скважины до пересечения с понижением S_c. Тогда получим, что тангенс угла наклона этой поверхности к оси $\ln r$ будет определяться соотношением

$$\frac{Q}{2\pi T_D} = \frac{S_0}{\ln(R/r_0)} = \frac{S_c}{\ln(R/r_0')} = \frac{\Delta S}{\ln(r_0/r_0')} = \frac{S_c - S_r}{\ln(r/r_0')} = \frac{S_0 - S_r}{\ln(r/r_0)} = \frac{S_r}{\ln(R/r)}. \quad (2.5.9a)$$

Из (2.5.9) видно, что поправка ξ, отражающая в формуле Дюпюи несовершенство возмущающей скважины, представляет собой тангенс угла наклона прямой $\Delta S = f(Q)$ к оси Q при $2\pi T_D = 1$. Следовательно, *при введении ξ в формулу Дюпюи осуществляется переход от понижения S_c к понижению S_0, т. е. определение ξ равносильно определению* ΔS [71—73]. Очевидно, $\xi = 0$ при условии, что и $\Delta S = 0$ (или $\tau = 1$, $r_0' = r_0$). Но так как любая реальная скважина (совершенная или несовершенная, гидрогеологическая или нефтяная) всегда работает с наличием пьезометрического разрыва уров-

ней у стенки, т. е. поскольку всегда $\Delta S \gg 0$, то из (2.5.6) и (2.5.9) получаем важные неравенства, справедливые для установившейся и неустановившейся фильтрации [77, 78]:

$$\Delta S \gg 0, \quad \tau \ll 1,$$
$$\xi \gg 0, \quad r_0' \ll r_0, \qquad (2.5.10)$$
$$\varepsilon \gg 0, \quad \eta \ll 1.$$

Здесь η — коэффициент гидродинамического несовершенства скважины; $\varepsilon = 1 - \eta$ — фактор «повреждения» пласта (по Томасу) в призабойной зоне скважины [126]. Эти неравенства сохраняются независимо от того, уменьшена или увеличена проницаемость призабойной зоны по сравнению с проницаемостью остальной части пласта, поскольку для реальных стоков (водопонижающих, дренажных, водозаборных скважин, из которых откачивается вода) всегда $S_c > S_0$. Это очевидно, так как на контуре даже идеальной совершенной скважины также существует разрыв напорной функции и понижение пьезометрической поверхности S_0 у внешней стенки скважины не может превышать понижение уровня воды S_c внутри скважины. Данный вывод справедлив и для случаев, когда оздоровительными мероприятиями (гидроразрывом и кислотной обработкой пласта, торпедированием забоя, установкой фильтров с высокой водозахватной способностью и незначительными сопротивлениями) удается резко увеличить проницаемость призабойной зоны (это приводит к значительному уменьшению разрыва ΔS и, следовательно, к соответствующему увеличению коэффициента эффективности скважины τ и ослаблению неравенств (2.5.10), но не к их изменению в обратную сторону).

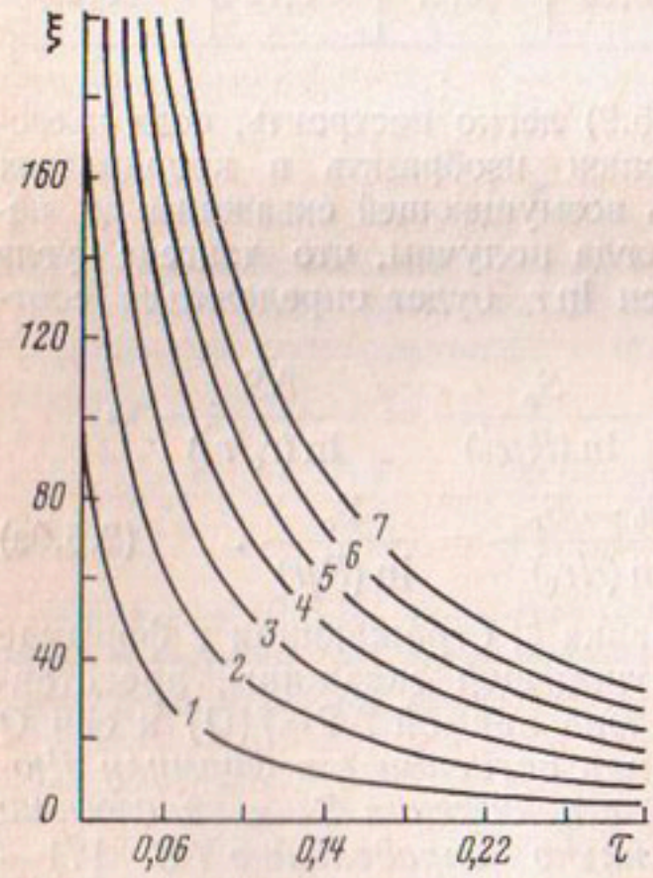


Рис. 2.5. Функция $\xi = f(\tau)$ для значений $\ln(R/r_0) = 2$ (*1*), 4 (*2*), 6 (*3*), 8 (*4*), 10 (*5*), 12 (*6*), 14 (*7*)

Итак, благодаря обнаружению существования пьезометрического скачка уровней у стенки артезианской скважины нами установлено, что обобщенное фильтрационное сопротивление (или несовершенство скважины по степени и характеру вскрытия пласта) отражается в величине разрыва уровней ΔS и измеряется этой величиной. В результате появилась возможность выяснить гидродинамический смысл параметров несовершенства ξ, r_0', τ, дать им однозначное толкование и методику расчета, установить области их изменения, выраженные неравенствами (2.5.10). Чтобы привести результаты этих исследований к конечному виду, заменим в формуле Дюпюи (2.2.1) понижение S_0 понижением S_c. Тогда мы объединим приведенные выше зависимости по оценке дополнительных фильтрационных сопротивлений в одно многократное равенство, справедливое для совершенных и несовершенных реальных скважин [53—60, 73—81]:

$$Q = \frac{2\pi T_D S_0}{\ln(R/r_0)} = \tau \frac{2\pi T_D S_c}{\ln(R/r_0)} = \frac{2\pi T_D S_c}{\ln(R/r_0')} =$$

$$= \frac{2\pi T_D S_c}{\ln(R/r_0) + \xi} = \frac{2\pi T_D \Delta S}{(1/\tau - 1)\ln(R/r_0)} =$$

$$= \frac{\Delta S}{1/q_c - 1/q_0} = \frac{2\pi T_D \Delta S}{\ln(r_0/r_0')} = \frac{2\pi T_D}{\xi} \Delta S. \quad (2.5.11)$$

Приведенные зависимости по расчету параметров ξ, r_0', τ были получены исходя из предпосылок, рассмотренных в § 2.2, и прежде всего из существования пьезометрического скачка уровней ΔS у стенки артезианской скважины и толкования формул Дюпюи согласно выражениям (2.2.1) и (2.2.2).

Расчет коэффициента обобщенного (по Ф. М. Бочеверу) сопротивления несовершенной скважины $\xi_н$ с дебитом $Q_н$ можно вести также с учетом коэффициента гидродинамического несовершенства скважины η. В этом случае, полагая $S_c = S_{сн}$ и $r = R$, из (2.5.11) имеем

$$\eta = \frac{Q_н}{Q_c} = \frac{\ln(R/r_0) + \xi_c}{\ln(R/r_0) + \xi_н}, \quad (2.5.12)$$

где Q_c и ξ_c — соответственно дебит и показатель обобщенного сопротивления совершенной скважины [71—73].

Из (2.5.12) получаем зависимость [73, 78]

$$\xi_н = \frac{\xi_c}{\eta} + \left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \ln \frac{R}{r_0}, \qquad (2.5.13)$$

которая при $\xi_c = 0$, т. е. для идеальной несовершенной скважины, переходит в известную формулу И. А. Чарного [125].

Рассмотрим некоторые особенности использования полученных зависимостей. Допустим, что при определении коэффициента фильтрации по данным опытных откачек поправка на несовершенство возмущающей скважины заранее рассчитана или теоретически, или взята из лабораторных опытов и отражает лишь некоторую часть суммарного сопротивления ξ (или ΔS), т. е. является заниженной и принята равной ξ_x, причем $\xi_x < \xi$. Тогда, как доказано в § 2.4, вместо истинного значения коэффициента фильтрации пласта k_D, определяемого по формуле (2.5.3), получим кажущиеся (т. е. заниженные) значения коэффициента фильтрации k_{xr}, подчиняющиеся уравнению (2.4.9) [60, 73, 78]:

$$k_{xr} = \frac{Q[\ln(r/r_0) + \xi_x]}{2\pi m (S_c - S_r)} = k^0_{xr} + \alpha_x \ln r \qquad (2.5.14)$$

или при $r = R$

$$k_{xR} = \frac{Q[\ln(R/r_0) + \xi_x]}{2\pi m S_c} = k^0_{xr} + \alpha_x \ln R. \qquad (2.5.15)$$

При $\xi_x = 0$ уравнения (2.5.14) и (2.5.15) переходят в зависимости (2.4.9) и (2.4.10), а величины k_{xr} — соответственно в функции k_{hr}.

При $\xi_x = \xi$ функция k_{xr}, согласно выражению (2.5.3), переходит в константу k_D. Следовательно, величина кажущейся водопроницаемости k_{xr} находится в прямой зависимости от точности определения показателя суммарного сопротивления ξ_x. Для определения характера этой зависимости запишем (2.5.14) в виде суммы двух слагаемых:

$$k_{xr} = \frac{Q \ln(r/r_0)}{2\pi m (S_c - S_r)} + \frac{Q}{2\pi m (S_c - S_r)} \xi_x. \qquad (2.5.14а)$$

Сравнивая (2.4.9) и (2.5.14а), окончательно получаем для $r = 1$, $1 < r < R$, $r = R$ соответственно:

$$k^0_{xr} = k^0_{hr} + \rho^0_r \xi_x, \qquad (2.5.16)$$

$$k_{xr} = k_{hr} + \rho_r \xi_x, \qquad (2.5.17)$$

$$k_{xR} = k_{hR} + \rho_R \xi_x, \qquad (2.5.18)$$

где ρ_r^0, ρ_r, ρ_R — угловые коэффициенты прямых $k_{xr}^0 = f(\xi_x)$, $k_{xr} = f(\xi_x)$, $k_{xR} = f(\xi_x)$; k_{kr}^0, k_{kr}, k_{kR} — отрезки оси k_{xr}, отсекаемые прямыми $k_{xr}^0 = f(\xi_x)$, $k_{xr} = f(\xi_x)$, $k_{xR} = f(\xi_x)$.

Функции (2.5.16)—(2.5.18) приведены на рис. 2.6.

Следуя рекомендациям [8, 96, 108, 118], для определения коэффициента фильтрации по центральной и любой из наблюдательных скважин воспользуемся формулой Дюпюи с поправкой Н. Н. Веригина $\xi_B = 0{,}5\,\xi_0$ на несовершенство центральной скважины по степени вскрытия пласта фильтром. Поскольку $\xi_0 = f(l/m;\ m/r_0)$, то очевидно, что поправка ξ_0 отражает ту часть обобщенного сопротивления ΔS, которая сформирована несовершенством скважины по степени вскрытия пласта. Сопротивления, обусловленные несовершенством скважины по характеру вскрытия пласта, скин-эффектом и другими факторами, поправкой ξ_B не учитываются. Поэтому при использовании этой поправки зависимость (2.5.14) сохраняется и принимает вид

$$k_{Br} = \frac{Q\left[\ln\left(r/r_0\right) + \xi_B\right]}{2\pi m\left(S_c - S_r\right)} = k_{Br}^0 + \alpha_B \ln r \qquad (2.5.19)$$

или при $r = R$

$$k_{BR} = \frac{Q\left[\ln\left(R/r_0\right) + \xi_B\right]}{2\pi m S_c} = k_{Br}^0 + \alpha_B \ln R, \qquad (2.5.20)$$

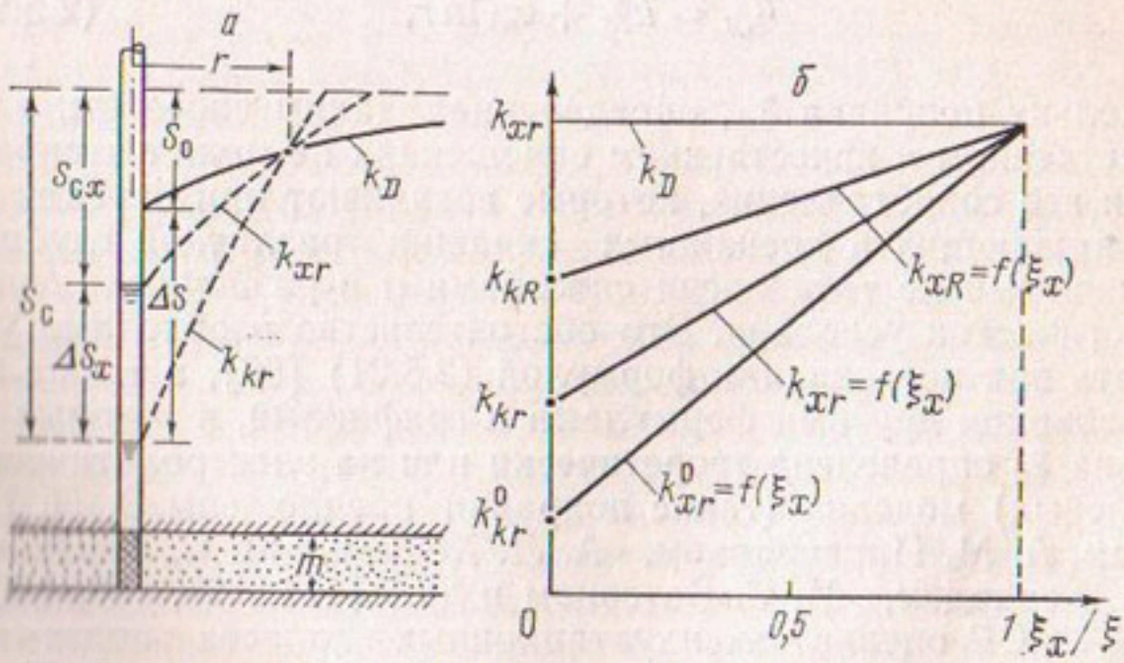


Рис. 2.6. Схема расчета кажущихся и истинных значений коэффициента фильтрации (*а*) и функции $k_{xr} = f(\xi_x/\xi)$ для различных точек пласта r (*б*)

где поправка $\xi_B = 0{,}5\xi_0$ определяется по таблицам или графикам Н. Н. Веригина [18, 24].

В работе В. С. Алексеева и А. Г. Тесля [4] произведено уточнение формулы (2.5.19) путем введения в нее поправки ξ_A на несовершенство центральной скважины по характеру вскрытия пласта фильтром:

$$k_{Ar} = \frac{Q\left[\ln\left(r/r_0\right) + 0{,}5\xi_0 + \xi_A\right]}{2\pi m\left(S_c - S_r\right)} = \frac{0{,}366Q\left[\lg\left(r/r_0\right) + 0{,}217\xi_0 + 0{,}435\xi_A\right]}{m\left(S_c - S_r\right)}. \quad (2.5.21)$$

Поправка ξ_A определяется по графику, составленному по данным опытов в напорном фильтрационном лотке (в лабораторных условиях исследовалась величина ξ_c для совершенных артезианских скважин, оборудованных сетчатыми фильтрами); эти опыты подтвердили наш вывод о том, что и совершенные реальные скважины обладают сопротивлениями, приводящими к возникновению пьезометрического скачка уровней ΔS у их стенок [53—60]. Отсюда можно заключить, что коэффициент фильтрации k_{Ar}, определяемый по формуле (2.5.21), также является кажущимся (а следовательно, и значительно заниженным по сравнению с величиной k_D) и изменяется по радиусу депрессионной воронки по зависимости

$$k_{Ar} = k^0_{Ar} + \alpha_A \ln r, \quad (2.5.21а)$$

поскольку поправка ξ_A, определенная таким способом, в количественном и качественном отношениях не может воспроизвести все сопротивления, которые возникают при бурении водопонижающих и дренажных скважин различной глубины, различными по технологии способами и в различных гидрогеологических условиях. Это обстоятельство необходимо учитывать при пользовании формулой (2.5.21) [96], а также при пользовании другими формулами и графиками, в которых поправка ξ_x определена теоретически или на электролитических (щелевых) моделях (такие поправки предложены В. И. Щуровым, А. М. Пирвердяном, А. Л. Хейном, М. С. Хантушем, Р. А. Ховардом, М. С. Ватсоном и др. [111, 125, 126, 130]).

В СССР оценка эксплуатационных запасов подземных вод, водообильности и водопроницаемости водоносных горизонтов производится согласно рекомендациям [8, с. 113—115]. В этом руководстве для определения коэффициента

фильтрации напорных пластов по данным откачек рекомендуется применять следующие формулы:

если опытная (центральная) скважина совершенная (формулы (8.1) и (8.2) из работы [8]):

для центральной скважины

$$k = \frac{Q \ln (R/r_0)}{2\pi m S_c} = \frac{0{,}366 Q \lg (R/r_0)}{m S_c}; \qquad (2.5.22)$$

для центральной и наблюдательной скважин

$$k = \frac{Q \ln (r/r_0)}{2\pi m (S_c - S_r)} = \frac{0{,}366 Q \lg (r/r_0)}{m (S_c - S_r)}; \qquad (2.5.23)$$

если возмущающая скважина несовершенная (формулы (8.7) и (8.8) из работы [8]):

для центральной скважины

$$k = \frac{Q [\ln (R/r_0) + 0{,}5\xi_я]}{2\pi m S_c} = \frac{0{,}366 Q [\lg (R/r_0) + 0{,}217\xi_я]}{m S_c}; \qquad (2.5.24)$$

для центральной и наблюдательной скважин

$$k = \frac{Q [\ln (r/r_0) + 0{,}5\xi_я]}{2\pi m (S_c - S_r)} = \frac{0{,}366 Q [\lg (r/r_0) + 0{,}217\xi_я]}{m (S_c - S_r)}, \qquad (2.5.25)$$

где $\xi_я = \xi_0 + \xi_0''$; ξ_0 — поправка Н. Н. Веригина; поправка ξ_0'' отражает влияние конструкции фильтровой части и других технических причин [8].

Нетрудно заметить, что формулы (2.5.22) и (2.5.23) построены на допущении, что реальные совершенные артезианские скважины не обладают обобщенным фильтрационным сопротивлением и, следовательно, могут рассчитываться без введения в формулу Дюпюи соответствующих поправок для компенсации этого сопротивления. Аналогичным образом рекомендуется вести расчет таких скважин и в других руководствах, пособиях и справочниках [15, 17, 18, 118, 126].

Нашими исследованиями установлено [53—60], что такое допущение не соответствует действительности, так как любой реальный сток или источник (в том числе и любая совершенная скважина) характеризуются наличием разрыва напорной функции (пьезометрического скачка уровней ΔS) у их стенок и, следовательно, обладают обобщенным сопротивлением. Иначе говоря, не может существовать реальной возмущаю-

Таблица 2.2

Средние значения коэффициентов фильтрации в м/сут по данным откачек [53, 57, 82]

№ скв.	k_D	$k_{Яr}$	k_{Ar}	k_{Br}	k_{kr}	τ
2ц	10,40	6,24	3,85	0,60	0,45	0,11
3ц	6,80	4,08	2,90	0,65	0,28	0,07
4ц	7,00	4,20	3,46	1,70	1,08	0,24

щей скважины без разрыва напорной функции (или потерь напора ΔS, Δh или ΔH) у ее стенки. Поэтому формулы (2.5.22) и (2.5.23), как следует из соотношений (2.4.10) и (2.4.9), будут давать кажущиеся (и притом максимально заниженные) значения коэффициента фильтрации соответственно k_{kR} и k_{kr}, поскольку в этих формулах $\xi_x=0$.

Поправку $\xi_Я$ Л. С. Язвин рекомендует определять графоаналитическим методом Ф. М. Бочевера и В. С. Алексеева с использованием формулы Ф. М. Бочевера (2.1.1), т. е. по Л. С. Язвину $\xi_Я=\xi_н$ (см. формулы (8.53) — (8.56) работы [8]). Но в этом случае получаем, что $0{,}5\,\xi_Я=0{,}5\,\xi_н=\xi_x$. Поэтому, подставив данное равенство в (2.5.24) и (2.5.25), получим соответственно

$$k_{ЯR}=\frac{Q\left[\ln\left(R/r_0\right)+0{,}5\xi_н\right]}{2\pi m S_c}=k^0_{Яr}+\alpha_Я\ln R, \quad (2.5.24а)$$

$$k_{Яr}=\frac{Q\left[\ln\left(r/r_0\right)+0{,}5\xi_Я\right]}{2\pi m\left(S_c-S_r\right)}=k^0_{Яr}+\alpha_Я\ln r. \quad (2.5.25а)$$

Поправки ξ_B, ξ_A и $\xi_Я$ широко используются для оценки водопроницаемости пластов при проведении гидрогеологических съемок и изысканий [8, 18, 24, 96, 108]. Поэтому весьма важно дать им сравнительную оценку и еще раз убедиться в достоверности и огромном значении критериальных уравнений (2.4.9) и (2.5.14), играющих фундаментальную роль в диагностировании значений коэффициентов фильтрации k_{xr} (и в частности k_{Br}, k_{Ar}, $k_{Яr}$), определяемых по центральной или по центральной и любой из наблюдательных скважин. С этой целью по данным опытных кустовых откачек из несовершенных артезианских скв. 2ц, 3ц, 4ц с использованием формул (2.4.9), (2.5.19), (2.5.21) и (2.5.25) были определены значения коэффициентов фильтрации k_{kr}, k_{Br}, k_{Ar}, $k_{Яr}$ и k_D (табл. 2.2). Результаты расчетов показывают, что поправки

на несовершенство ξ_B, ξ_A и $\xi_Я$ отражают лишь часть суммарного сопротивления ΔS и приводят к тому, что полученные величины коэффициентов фильтрации являются кажущимися и изменяются по радиусу депрессионной воронки согласно закономерности (2.4.9). Иерархическое положение их друг относительно друга описывается следующим неравенством (табл. 2.2 и 2.3, рис. 2.7):

$$k_{kr} < k_{Br} < k_{Ar} < k_{Яr} \ll k_D . \qquad (2.5.26)$$

В этом неравенстве параметры k_{Ar} и $k_{Яr}$ могут меняться местами, если возмущающая скважина обладает сравнительно небольшим обобщенным сопротивлением. В качестве примера воспользуемся данными опытной кустовой откачки, приведенными В. Н. Эмихом в работе [110]. Используя понижения уровня в наблюдательных скважинах, по формуле Дюпюи (2.2.1а) определяем: $k_D = 28{,}2$ м/сут, $S_0 = 1{,}52$ м. Зная S_0 и $S_c = 11{,}22$ м, по формулам (2.3.6) и (2.3.8) рассчитываем: $\tau = 0{,}136$, $\Delta S = 9{,}70$ м. Подставляя полученные значения ΔS, T_D, Q в зависимость (2.5.6), получаем $\xi = 55{,}3$.

Таблица 2.3

Результаты расчета кажущихся k_{xr} и истинного k_D значений коэффициента фильтрации по формуле (2. 5. 14) с использованием опытных данных В. Н. Эмиха и различных поправок ξ_x

Исходные параметры	k_{xr}, м/сут				k_D, м/сут
	k_{kr}	k_{Br}	$k_{Яr}$	k_{Ar}	
$r = 1$ м	0,42	4,96	14,85	18,87	28,20
$r = 152$ м	3,38	7,82	16,00	19,32	28,20
$r = 240$ м	3,65	8,08	16,04	19,36	28,20
$r = 247$ м	3,66	8,09	16,05	19,37	28,20
ξ_x	0	ξ_B	$\xi_Я$	ξ_A	ξ
		10,0	27,65	35,00	55,30
ΔS_x, м	0	1,75	4,85	6,14	9,70
$\lg r'_{0x}$, м*)	—1,08	—5,42	—13,30	—16,29	—25,12
α_x	0,59	0,57	0,23	0,09	0

*) Расчет r'_{0x} производился по формуле $\lg r'_{0x} = \lg r_0 - \xi_x/2{,}3$.

Теперь величину k_D будем определять по центральной и любой из наблюдательных скважин вместе, т. е. по формуле (2.5.14), используя значение $\xi=55{,}3$. При этом получим ту же величину k_D (табл. 2.3). Это говорит о том, что значение ξ определено верно.

Выше было установлено, что если при определении k_D по данной методике поправка ξ определена ошибочно или вовсе не учитывается ($\xi=0$), то вместо константы k_D мы получаем кажущиеся (весьма заниженные) значения коэффициента фильтрации k_{xr}, которые являются функцией координаты r. Например, если положить $\xi=0$, т. е. отрицать существование пьезометрического разрыва ΔS у стенки центральной скважины, то для значений r, равных 152, 240 и 247 м, величины k_{kr} будут максимально заниженными и соответственно составят 3,38; 3,65 и 3,66 м/сут.

В отечественной литературе разработан ряд методик по оценке величины ξ_x. Поправки ξ_x, определенные для опыта В. Н. Эмиха, согласно рекомендациям Н. Н. Веригина [18, 24], Л. С. Язвина [8], В. С. Алексеева и А. Г. Тесля [4], Ф. М. Бочевера [17] и автора [69—74], составили соответственно $\xi_B=10$, $\xi_Я=27{,}65$, $\xi_Л=35$, $\xi=55{,}3$. Использование этих поправок в формуле (2.5.14) показало (табл. 2.3 и рис. 2.7), что только поправка ξ, определяемая по формулам Алексеева—Бочевера (2.1.1) или автора (2.5.6), отражает все сопротивления возмущающей скважины ΔS и, таким образом, позволяет от понижения S_c выйти на депрессионную поверхность Дюпюи и получить истинное значение коэффициента фильтрации пласта k_D. Поправки на несовершенство ξ_B, $\xi_Я$, $\xi_Л$ компенсируют лишь некоторую часть суммарных потерь напора ΔS. Поэтому рассчитываемые на их основе коэффициенты фильтрации k_{Br}, $k_{Яr}$, k_{Ar} являются кажущимися, подчиняются функции (2.4.9) и значительно (в 1,5—3 раза)

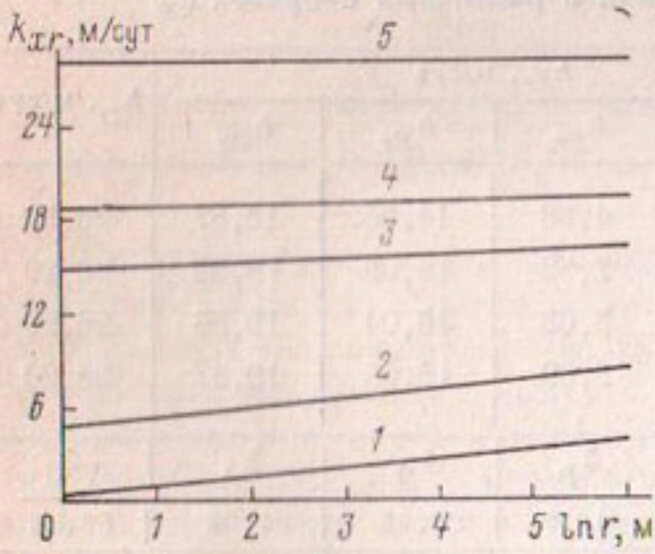


Рис. 2.7. Кривые $k_{xr}=f(\ln r)$ для различных поправок (на несовершенство возмущающей скважины) к формуле Дюпюи ξ_x (построены по данным В. Н. Эмиха): *1* — k_{kr}, $\xi_x=0$; *2* — k_{Br}, $\xi_x=10$; *3* — $k_{Яr}$, $\xi_x=27{,}65$; *4* — k_{Ar}, $\xi_x=35$; *5* — k_D, $\xi_x=55{,}3=\xi$

меньше истинного значения коэффициента фильтрации пласта k_D [53—60, 73, 77]. Поправки на несовершенство артезианских скважин, выведенные из параболической зависимости ΔS от Q [30], могут находить лишь случайное подтверждение на практике и нами не рассматриваются ввиду того, что при установившейся фильтрации функции $\Delta S=f(Q)$ и $\Delta H=f(Q)$ являются прямолинейными.

Рассмотренный способ сравнительной оценки водопроницаемости пластов, определяемой по формуле (2.5.14) с использованием различных поправок ξ_x, может играть важную роль в обратных методах подземной гидродинамики, поскольку он позволяет точно установить, какой параметр — кажущийся или истинный — мы принимаем для проектирования дренажа. К примеру, применение этого способа в работе [110] позволило бы установить, что среднее значение коэффициента фильтрации водоносных пластов Кулундинской степи составляет не 8,0 м/сут, как это определено В. Н. Эмихом с учетом поправки ξ_B, а 28,2 м/сут, т. е. в 3,5 раза больше.

Аналогичная картина имеет место при обработке опытных данных других исследователей. Это говорит о том, что запасы подземных вод, подсчитываемые по кажущимся параметрам k_{kr}, k_{Br}, k_{Ar} и $k_{\text{Я}r}$ [8, 108, 118], не соответствуют действительной проницаемости и водопроводимости водоносных горизонтов, относятся к заниженным категориям и нуждаются в переоценке. Аналогично системы дренажа, проектируемые по кажущимся значениям коэффициента фильтрации, часто приводят к переосушению мелиорируемых земель (из-за большой глубины и густоты сети), поскольку проектируются на менее проницаемую среду, а работают в более (по сравнению с расчетной) проницаемой среде.

§ 2.6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОМЕЖУТКА ВЫСАЧИВАНИЯ И НЕСОВЕРШЕНСТВА ГРУНТОВЫХ СКВАЖИН

В системах вертикального дренажа на Полесье грунтовые скважины найдут широкое применение, поскольку торфяники в большинстве случаев подстилаются песчаными отложениями значительной мощности. При изысканиях и проектировании таких систем первоочередной задачей является оценка несовершенства дренажных скважин и учет этого несовершенства в фильтрационных расчетах и моделировании нормы осушения, а также при определении междренных расстояний и гидрогеологических параметров. Однако в подземной гидро-

динамике эти вопросы изучены крайне недостаточно, ввиду чего оценка несовершенства грунтовых скважин до сих пор производится по параметрам, полученным для артезианских скважин, т. е. без учета существования промежутка высачивания Δh [8, 17, 18, 24, 25]. В результате определение коэффициента фильтрации безнапорных пластов рекомендуется вести по следующим зависимостям (см. [8], формулы 8.4, 8.5, 8.10, 8.11):

для центральной совершенной скважины

$$k = \frac{Q \ln (R/r_0)}{\pi (H^2 - h_c^2)} = \frac{0{,}73Q \lg (R/r_0)}{H^2 - h_c^2}; \qquad (2.6.1)$$

для совершенных центральной и наблюдательных скважин

$$k = \frac{Q \ln (r/r_0)}{\pi (h_r^2 - h_c^2)} = \frac{0{,}73Q \lg (r/r_0)}{h_r^2 - h_c^2}; \qquad (2.6.2)$$

для центральной несовершенной скважины

$$k = \frac{Q [\ln (R/r_0) + 0{,}5\xi_0]}{\pi (H^2 - h_c^2)} = \frac{0{,}73Q [\lg (R/r_0) + 0{,}217\xi_0]}{H^2 - h_c^2}; \qquad (2.6.3)$$

для несовершенных центральной и наблюдательных скважин

$$k = \frac{Q [\ln (r/r_0) + 0{,}5\xi_0]}{\pi (h_r^2 - h_c^2)} = \frac{0{,}73Q [\lg (r/r_0) + 0{,}217\xi_0]}{h_r^2 - h_c^2}, \qquad (2.6.4)$$

где $0{,}5\xi_0 = \xi_B$ — поправка Н. Н. Веригина.

По формулам (2.6.1)—(2.6.4) определена водопроницаемость подстилающих отложений до глубины 10—25 м на большинстве водосборов Белорусского Полесья.

Поэтому важно установить, с какой достоверностью определены значения k, входящие в данные формулы, и разработать такую методику оценки несовершенства грунтовых скважин, в которой параметры обобщенного фильтрационного сопротивления выражались бы через величину промежутка высачивания. Это тем более необходимо, что любая (и совершенная, и несовершенная) грунтовая скважина работает с промежутком высачивания у ее стенки, а связь этого явления с параметрами несовершенства ξ и r_0' до сих пор не рассматривалась [41, 50, 125, 128].

Чтобы решить поставленную задачу, введем для грунтовых скважин, совершенных и несовершенных с незатопленным фильтром, новый параметр — коэффициент эффективно-

сти скважины τ^*. По аналогии с коэффициентом $\tau = S_0/S_c$ он будет определяться равенством [72, 73]

$$\tau^* = (H^2 - h_0^2)/(H^2 - h_c^2) = k_{kR}/k_D = \text{const}, \qquad (2.6.5)$$

вытекающим из формул (2.2.4) и (2.4.12).

Поскольку $S_0 = H - h_0$ и $S_c = H - h_c$, то из (2.6.5) получаем выражение, связывающее коэффициенты τ^* и τ:

$$\tau^* = \tau(2 - \tau S_c/H)/(2 - S_c/H). \qquad (2.6.6)$$

Функциями $\tau^* = f(\tau)$ для различных значений S_c/H удобно пользоваться при переходе от одного коэффициента к другому (рис. 2.8).

Подставляя в (2.6.5) вместо h_0 его значение

$$h_0 = h_c + \Delta h, \qquad (2.6.7)$$

получаем квадратное уравнение

$$\Delta h^2 + 2h_c\Delta h - (1 - \tau^*)(H^2 - h_c^2) = 0. \qquad (2.6.8)$$

Решая (2.6.8) относительно Δh и учитывая, что с физической точки зрения величина потерь напора Δh всегда положительна, получаем формулу для расчета промежутка высачивания [72, 73]

$$\Delta h = \sqrt{H^2 - \tau^*(H^2 - h_c^2)} - h_c. \qquad (2.6.9)$$

В отличие от многих формул по определению Δh, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе [54, 128], равенство (2.6.9) отражает прежде всего зависимость величины Δh от коэффициента эффективности скважины τ^*, эквивалентного суммарному фильтрационному сопротивлению скважины. В этом состоит достоинство формулы (2.6.9). Для удобства пользования ею на рис. 2.9 она представлена в виде графиков функции $\Delta h/H = f(h_c/H)$ для различных значений τ^*.

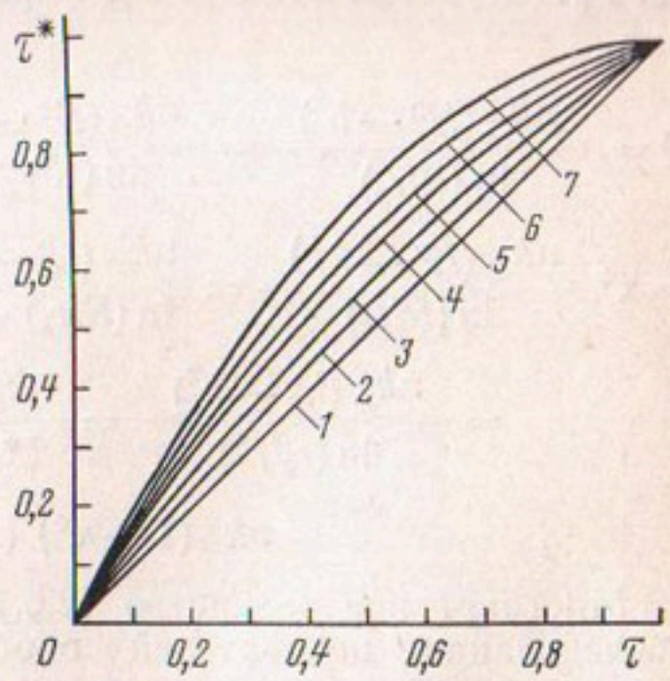


Рис. 2.8. Функция $\tau^* = f(\tau)$ для значений $S_c/H = 0$ (*1*), 0,3 (*2*), 0,5 (*3*), 0,7 (*4*), 0,8 (*5*), 0,9 (*6*), 1,0 (*7*)

Полагая в (2.6.9) $h_c=0$, получаем выражение для определения максимальной величины промежутка высачивания

$$\Delta h_{max} = h_{0min} = H\sqrt{1-\tau^*}. \qquad (2.6.9а)$$

Согласно теории гравитационной фильтрации И. Козени [88], при $S_c=H$, $R=\text{const}$ и $H=\text{const}$ имеет место равенство

$$\Delta h_{max} = h_{0min} = S_{0max} = H/2. \qquad (2.6.10)$$

Подставив в (2.6.9а) вместо Δh_{max} его значение из (2.6.10), получим, что в этом случае $\tau^*=0{,}75$. Из рис. 2.8 находим, что данному значению τ^* при $S_c/H=1$ соответствует $\tau=0{,}5$ или $S_0=S_c/2=H/2$. Это говорит о том, что формула (2.6.9) находится в полном согласии с основными положениями теории гравитационной фильтрации И. Козени и подтверждается экспериментами [53, 64, 73].

Чтобы перейти к другим показателям обобщенного фильтрационного сопротивления грунтовых скважин, депрессионную поверхность Дюпюи, описываемую уравнением (2.2.2), продолжим внутрь возмущающей скважины до пересечения ее с уровнем воды h_c. Точка пересечения поверхности Дюпюи с уровнем h_c будет находиться внутри скважины, лежать на продолженной поверхности Дюпюи и иметь координаты h_c, r_0^*. С учетом этой точки формула Дюпюи (2.2.2) примет вид

$$Q = \frac{\pi k_D (H^2-h_0^2)}{\ln(R/r_0)} = \frac{\pi k_D (H^2-h_c^2)}{\ln(R/r_0^*)} = \frac{\pi k_D (h_r^2-h_c^2)}{\ln(r/r_0^*)} =$$

$$= \tau^* \frac{\pi k_D (H^2-h_c^2)}{\ln(R/r_0)} = \frac{\pi k_D (H^2-h_c^2)}{\ln(R/r_0)+\xi^*} = \frac{\pi k_D (h_r^2-h_c^2)}{\ln(r/r_0)+\xi^*} =$$

$$= \frac{\pi k_D (h_0^2-h_c^2)}{\ln(r_0/r_0^*)} = \frac{\pi k_D}{\xi^*}\Delta h(\Delta h+2h_c) =$$

$$= \pi k_D (1-\tau^*)(H^2-h_c^2)/\xi^*. \qquad (2.6.11)$$

Многократное равенство (2.6.11) играет важную роль в исследовании показателей обобщенного фильтрационного сопротивления грунтовых скважин ξ^*, r_0^*, τ^*, поскольку связывает в единое целое эти показатели с величиной промежутка высачивания, параметрами пласта, скважины и фильтрационного потока. Для вывода этого равенства был применен способ, разработанный нами для построения приведенного

радиуса артезианской скважины r_0' [77, 78]. Поэтому показатели несовершенства грунтовых скважин ξ^*, r_0^*, τ^*, входящие в равенство (2.6.11), играют ту же роль, что и соответствующие показатели несовершенства артезианских скважин ξ, r_0', τ, входящие в формулу (2.5.11). Однако из-за особенностей фильтрации грунтовых вод расчет этих параметров, как мы сейчас убедимся, производится иначе и свидетельствует о том, что закономерности изменения несовершенства грунтовых скважин имеют принципиальные отличия от аналогичных закономерностей при напорной фильтрации. Действительно, из (2.6.11) имеем [72, 73]

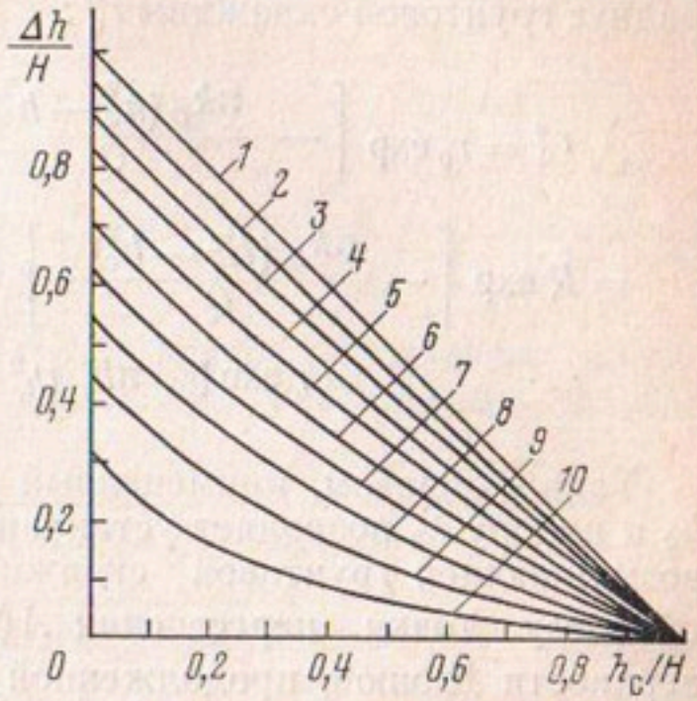


Рис. 2.9. Функция $\Delta h/H=f(h_c/H)$ для значений $\tau^*=0$ (*1*), 0,1 (*2*), 0,2 (*3*), 0,3 (*4*), 0,4 (*5*), 0,5 (*6*), 0,6 (*7*), 0,7 (*8*), 0,8 (*9*), 0,9 (*10*)

$$\xi^* = \frac{\pi k_D}{Q}(h_r^2 - h_c^2) - \ln\frac{r}{r_0} = \frac{\pi k_D}{Q}(H^2 - h_c^2) - \ln\frac{R}{r_0} =$$

$$= \left(\frac{1}{\tau^*} - 1\right)\ln\frac{R}{r_0} = \frac{\pi k_D}{Q}(h_0^2 - h_c^2) = \ln\frac{r_0}{r_0^*} =$$

$$= \frac{\pi k_D}{Q}(1-\tau^*)(H^2 - h_c^2) = (1-\tau^*)\ln\frac{R}{r_0^*}. \quad (2.6.12)$$

Из (2.6.12) следует, что поправка ξ^* на суммарное несовершенство грунтовой скважины представляет собой тангенс угла наклона графика $h_0^2 - h_c^2 = \Delta h(\Delta h + 2h_c) = f(Q)$ к оси Q при $\pi k_D = 1$. Это значит, что при введении ξ^* в формулу Дюпюи осуществляется переход от напора h_c внутри скважины к напору h_0 в пласте по внешней стенке скважины, т. е. определение ξ^* равносильно определению сложного понижения (промежутка высачивания) $h_0^2 - h_c^2$ на стенке скважины. Из

(2.6.11) следует, что эту же роль выполняет и приведенный радиус грунтовой скважины r_0^*:

$$r_0^* = r_0 \exp\left[-\frac{\pi k_D (h_0^2 - h_c^2)}{Q}\right] = r_0 \exp(-\xi^*) =$$

$$= R \exp\left[-\frac{\pi k_D (H^2 - h_c^2)}{Q}\right] = R \exp\left(-\frac{\xi^*}{1-\tau^*}\right) =$$

$$= r \exp[-\pi k_D (h_r^2 - h_c^2)/Q]. \qquad (2.6.13)$$

Таким образом, примененный способ перехода от напора h_c к напору h_0 позволяет установить, что приведенный радиус возмущающей грунтовой скважины r_0^* представляет собой абсциссу точки пересечения $A(r_0^*, h_c)$ депрессионной поверхности Дюпюи, продолженной внутрь скважины, с пониженным напором h_c (рис. 2.10). Следовательно, приведенный радиус r_0^* позволяет искусственно подключить величину гидравлического скачка Δh (или пониженный напор h_c) к уравнению депрессионной поверхности Дюпюи (2.2.2). Этим самым с помощью кольца «пласта», заключенного между радиусами r_0 и r_0^*, мы компенсируем обобщенное фильтрационное сопротивление скважины и потери напора Δh, затрачиваемые потоком на его преодоление.

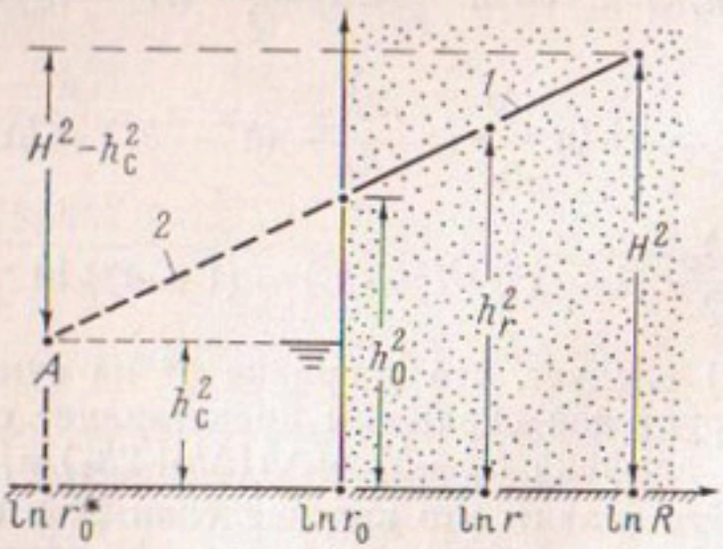


Рис. 2.10. Схема построения приведенного радиуса возмущающей грунтовой скважины радиуса r_0: *1* — поверхность Дюпюи в пласте; *2* — та же поверхность, продолженная внутрь возмущающей скважины

Из (2.6.11)—(2.6.13) получаем выражения для расчета параметра τ^*:

$$\tau^* = \frac{\ln(R/r_0)}{\ln(R/r_0^*)} = 1 - \frac{Q}{\pi k_D (H^2 - h_c^2)} \xi^* =$$

$$= 1 - \frac{\xi^*}{\ln(R/r_0^*)} = 1 \Big/ \left(1 + \frac{h_0^2 - h_c^2)}{H^2 - h_c^2}\right). \qquad (2.6.5а)$$

Подставив в (2.6.9) вместо τ^* другие показатели обобщенного сопротивления, определяемые равенствами (2.6.12) и (2.6.13), получим:

$$\Delta h = \sqrt{h_c^2 + Q\xi^*/\pi k_D} - h_c =$$

$$= \sqrt{h_c^2 + [Q \ln(r_0/r_0^*)]/\pi k_D} - h_c. \qquad (2.6.9а)$$

Формулы (2.6.9) и (2.6.9а) указывают на то, что промежуток высачивания у стенок грунтовых скважин следует определять с учетом коэффициентов суммарного фильтрационного сопротивления этих скважин ξ^*, r_0^*, τ^*. Поэтому есть основания заключить, что при проектировании вертикального дренажа и проведении опытно-фильтрационных работ целесообразно пользоваться выражениями (2.6.9) и (2.6.9а), которые обладают значительно большей точностью по сравнению с известными формулами по расчету Δh, не учитывающими зависимости промежутка высачивания от параметров сопротивления фильтра и призабойной зоны ξ^*, r_0^*, τ^* [53—60].

Итак, мы пришли к выводу, что для реальных грунтовых скважин $h_c = f(\xi^*, r_0^*)$. Это значит, что использование в формулах Дюпюи (2.6.1)—(2.6.4) напора h_c должно сопровождаться одновременным введением в эти формулы поправок ξ^*, r_0^*, τ^* на компенсацию гидравлического скачка Δh. Но поскольку это условие здесь не соблюдено, то расчетные значения коэффициента фильтрации k, получаемые по формулам (2.6.1)—(2.6.4), будут кажущимися и имеют величины соответственно k_{kR}, k_{kr}, k_{BR} и k_{Br}, максимально заниженные по сравнению с истинной водопроницаемостью пласта k_D. Если принять, что грунтовые скважины обладают незакольматированной призабойной зоной и оборудованы фильтром высокой водозахватной способности, то для них параметр τ будет составлять 0,3—0,4. Из рис. 2.8 находим, что в этом случае при небольших понижениях уровня $\tau \approx \tau^*$. Тогда из (2.6.5) полу-

чаем, что формулы (2.6.1)—(2.6.4) могут давать значения k, не превышающие $(0{,}3—0{,}4)k_D$. Это обстоятельство надо иметь в виду при оценке водопроницаемости безнапорных пластов по формулам (2.6.1)—(2.6.4).

Несмотря на весьма невысокую точность определения гидрогеологических параметров по данным откачек из одиночных скважин, этот способ опытно-фильтрационных работ продолжает оставаться одним из основных при проведении гидрогеологических съемок и изысканий. Поэтому и с экономической, и с теоретической точек зрения важно дать такие решения, которые хотя бы в первом приближении позволяли определять значения k_D по данным одиночных откачек. Последнее выражение в многократном равенстве (2.6.11)

$$k_D = \frac{\xi^*}{\pi(1-\tau^*)} \frac{Q}{H^2 - h_c^2} \qquad (2.6.14)$$

в этом отношении представляет известный интерес, поскольку оно показывает, что истинная величина коэффициента фильтрации пласта k_D может быть определена и по данным откачек из одиночных скважин без использования радиуса влияния R, если известны параметры обобщенного сопротивления скважины ξ^* и τ^*.

Воспользуемся понятием удельного дебита грунтовой скважины по А. И. Силину-Бекчурину [116]

$$q_c^* = Q/(H^2 - h_c^2) = Q/[S_c(2H - S_c)] = \text{const}. \qquad (2.6.15)$$

Если обозначить

$$\Delta^* = \xi^*/\pi(1-\tau^*) = \text{const}, \qquad (2.6.16)$$

то с учетом (2.6.15) и (2.6.16) формула (2.6.14) принимает вид

$$k_D = \Delta^* q_c^* = \Delta^* q_c/(2H - S_c) \qquad (2.6.14а)$$

и указывает на то, что истинная величина коэффициента фильтрации k_D равна произведению комплексного показателя сопротивления Δ^* на величину удельного дебита скважины q_c^*. Очевидно, $k_D = q_c^*$ при $\Delta^* = 1$. Здесь $q_c = Q/S_c$.

С другой стороны, из (2.6.14а) следует, что при известном значении k_D с помощью этой формулы по данным одиночной откачки легко определить величину комплексного показателя сопротивления скважины Δ^*.

§ 2.7. УЧЕТ НЕСОВЕРШЕНСТВА СКВАЖИН ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА НА ИНТЕГРАТОРАХ ЭГДА

Методы моделирования вертикального дренажа на интеграторах ЭГДА в последние годы получили закономерное развитие. Особенно значительный вклад в их разработку внесли Н. И. Дружинин, В. М. Шестаков, В. Р. Булдей, Л. Н. Павловская, Д. И. Пересунько, П. В. Фильчаков, В. И. Панчишин, И. Е. Жернов и др. [20, 33, 38, 128]. Несмотря на это, вопрос об учете обобщенного фильтрационного сопротивления скважин на моделях ЭГДА до сих пор не решен, и моделирование реальных фильтрационных полей и, в частности, вертикального дренажа производится путем задания потенциала внутри возмущающих скважин, т. е. без учета скачка уровня (потенциала) у их стенок [20, 33, 38]. Это приводит к определенной погрешности при построении уровня подземных вод, так как при таком способе задания напора на контуре стока моделируется нереальная (фиктивная) депрессионная поверхность во всей области фильтрации [60, 64, 74, 81].

Погрешность исключается заданием напора по внешним стенкам дренажных скважин. В этом случае моделируется реальная депрессионная поверхность и для перехода от понижения уровня внутри скважины S_c к понижению депрессионной поверхности по ее внешней стенке в пласте S_0 необходимо знать величину разрыва напорной функции на стенке скважины.

Выше мы установили, что при определении величин ΔS, Δh и ΔH в натурных условиях наиболее приемлемы зависимости, которые в неявном виде (через параметры ξ, r_0', τ, получаемые при опытных или эксплуатационных откачках) учитывают обобщенные сопротивления фильтров и гидрогеологические условия пласта. Этот вывод был положен в основу нового метода моделирования дренажных скважин, разработанного автором в 1968—1971 гг. [60—69, 77]. Сущность метода заключается в следующем.

Пусть S_{0r} и S_{cr} — установившиеся величины понижения уровня в точке r при моделировании депрессионной поверхности соответственно с учетом гидравлического скачка уровней на контуре дренажной скважины и без его учета. Оценим величину погрешности

$$\Delta = (S_{cr} - S_{0r})/S_{0r}, \qquad (2.7.1)$$

которая будет иметь место, если при моделировании (или фильтрационных расчетах) на контуре дренажной скважины задавать понижение S_c. Для этого разрешим (2.2.1) и (2.4.1) относительно S_{0r} и S_{cr} и подставим их значения в (2.7.1). Учитывая (2.3.6а), получим

$$\Delta = \frac{k_D}{k_{kR}} - 1 = \frac{S_c}{S_0} - 1 = \frac{1}{\tau} - 1 = \text{const}. \quad (2.7.2)$$

В производственных условиях коэффициент эффективности совершенных и несовершенных скважин изменяется от 0,1 до 0,4 [53—60, 74]. В этом случае из (2.7.2) следует, что при моделировании реального фильтрационного поля без учета разрыва напорной функции у стенки возмущающих скважин погрешность в оценке понижения уровня в пласте может достигать 150—900% и при данном τ имеет постоянную величину в каждой точке пласта. Такие погрешности в прогнозировании нормы осушения недопустимы. Поэтому разработанный метод моделирования реальных фильтрационных полей, основанный на учете потерь напора у стенок дренажных скважин и позволяющий избежать указанных погрешностей [64, 74—78], может найти широкое применение при проектировании вертикального дренажа.

Учет дополнительных фильтрационных сопротивлений дренажной скважины (или величины гидравлического скачка у ее стенки) удобнее всего осуществлять путем подключения к модели скважины (игольчатой шине) добавочного электрического сопротивления $R_{\Delta S}$. Аналогичным способом вводится в электрическую схему модели дополнительное электрическое сопротивление $R_{\Delta r}$, возникающее в связи с заменой в масштабе модели малого диаметра электрода, моделирующего скважину, электродом (игольчатой шиной) большего диаметра. Величина $R_{\Delta r}$ рассчитывается по формуле Н. И. Дружинина [20, 33]

$$R_{\Delta r} = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{r_м}{r_0}, \quad (2.7.3)$$

где $R_{\Delta r}$ — добавочное электрическое сопротивление, восполняющее потерю напора в кольце $r_м$—r_0 при замене в масштабе модели реальной скважины радиуса r_0 игольчатой шиной радиуса $r_м$; ρ — общий параметр сопротивления или удельное электрическое сопротивление, определяемое как сопротивление квадратного элемента модели [128].

При построении приведенного радиуса возмущающей скважины r_0' мы установили, что потери напора ΔS, равные пьезометрическому разрыву уровней на стенке скважины, наблюдаются в кольце «пласта» $r_0—r_0'$. Отсюда следует, что электрическое сопротивление $R_{\Delta S}$, эквивалентное потере напора ΔS в кольце $r_0—r_0'$, будет определяться, согласно (2.7.3), по формуле [64, 74—78]

$$R_{\Delta S} = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{r_0}{r_0'} \qquad (2.7.4)$$

или, учитывая (2.5.6),

$$R_{\Delta S} = \frac{\rho}{2\pi} \xi = \rho T_D \frac{\Delta S}{Q} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau} - 1 \right) \ln \frac{R}{r_0} . \qquad (2.7.4а)$$

Складывая $R_{\Delta S}$ и $R_{\Delta r}$, получаем суммарное электрическое сопротивление, компенсирующее потери напора в кольцах $r_0—r_0'$ и $r_м — r_0$ [77, 78]:

$$R_{сум} = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{r_м}{r_0'} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\ln \frac{r_м}{r_0} + \xi \right) =$$

$$= \frac{\rho}{2\pi} \left(\ln \frac{r_м}{r_0} + 2\pi T_D \frac{\Delta S}{Q} \right) . \qquad (2.7.5)$$

Формула (2.7.5) широко применяется при моделировании вертикального дренажа на интеграторах ЭГДА [20].

Глава 3

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСОВЕРШЕНСТВА СКВАЖИН ПРИ РАБОТЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА В НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

Мелиоративные системы на базе вертикального дренажа работают преимущественно в неустановившемся режиме. Поэтому возникает вопрос о закономерностях изменения несовершенства дренажных скважин в условиях переходных процессов [53, 60, 73, 77, 78, 80, 81, 83].

§ 3.1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Изучением дополнительных фильтрационных сопротивлений дренажных и водозаборных скважин, работающих в нестационарных условиях, занимались многие исследователи [3, 15, 17, 19, 23, 25, 104, 105, 120, 122, 124, 126, 128, 131 и др.]. Обобщая результаты этих исследований, А. Я. Олейник приходит к заключению [104, 105], что в условиях неустановившейся фильтрации величины сопротивлений на несовершенство дренажа хотя и зависят от времени, однако они быстро стремятся к своему предельному установившемуся значению. Поэтому в практических расчетах дренажа эти величины можно считать постоянными, найденными из условий установившейся фильтрации.

Если через ξ_1 обозначить несовершенство скважины по степени вскрытия пласта фильтром, то величину ξ_1 А. Л. Хейн представляет в виде разности [124]

$$\xi_1 = \xi_{10} - \xi_{1t}, \tag{3.1.1}$$

где ξ_{10} — величина ξ_1 при установившемся движении; ξ_{1t} — часть этого сопротивления, проявляющаяся при неустановившейся фильтрации и зависящая от времени.

В выражении (3.1.1) величина «временной» поправки ξ_{1t} со временем уменьшается и ею можно за малостью пренебре-

гать уже при $r^2/4at<5\cdot10^{-5}$, т. е. практически во всех случаях, когда определяется понижение уровня непосредственно в скважине или в небольшом удалении от нее. При этом

$$\xi_1=\xi_{10}, \tag{3.1.2}$$

что соответствует значению этого показателя, полученному для установившегося движения [15].

Дальнейшее развитие гипотеза А. Л. Хейна получила в работах В. Н. Щелкачева и С. Н. Назарова, которые представили формулу Ч. В. Тейса для несовершенной скважины в следующем виде [131]:

$$S_{ct}=(Q/4\pi T)[-\mathrm{Ei}(-r_1^2/4at)+2\xi_{щ}], \tag{3.1.3}$$

где $r_1\geqslant m$ — граница зоны пласта $r_0<r<r_1$, в которой поток жидкости в условиях упругого режима (неустановившаяся фильтрация) в каждое мгновение подчиняется тем же законам, что и установившийся поток, с теми же величинами давления на внутренней r_0 и внешней r_1 границах рассматриваемой призабойной области пласта [131].

В последующем разработкой и совершенствованием теории неустановившихся фильтрационных сопротивлений занялся Н. Н. Веригин [23, 25]. Опираясь на исследования М. Маскета, П. Я. Полубариновой-Кочиной, А. Л. Хейна, И. А. Чарного, М. С. Хантуша, В. Н. Щелкачева, он установил, что несовершенство скважин особенно существенно в условиях резко выраженного неустановившегося движения (т. е. при малых t). Вместе с тем абсолютная величина дополнительного сопротивления ξ со временем возрастает и при $t\to\infty$ достигает максимального значения $\xi=\xi_0$. В соответствии с этим коэффициент ξ можно представить в виде разности двух сопротивлений, из которых одно не зависит от времени t:

$$\xi=\xi_0-\xi_t, \tag{3.1.4}$$

где ξ_0 — безразмерное сопротивление, вызванное несовершенством скважины при установившемся движении и не зависящее от времени; ξ — то же сопротивление при неустановившемся движении, зависящее от времени; ξ_t — разность этих сопротивлений [25, с. 12].

Выражения (3.1.1) и (3.1.4) показывают, что если при $t\to\infty$ величина $\xi_1=\xi$ стремится к своему установившемуся (максимальному) значению $\xi_{10}=\xi_0=\xi_\infty$, то $\xi_1=\xi=\xi_t=f(t)$ и формулы (3.1.1) и (3.1.4) принимают вид

$$\xi_t=\xi_\infty-\xi_t^*, \tag{3.1.5}$$

где ξ_t — неустановившееся (текущее) сопротивление на момент времени t; $\xi_t^* = \xi_\infty - \xi_t$ — остаточное неустановившееся сопротивление, которое необходимо преодолеть потоку до наступления установившегося режима.

Таким образом, анализ теории А. Л. Хейна и Н. Н. Веригина приводит к выводу, что при неустановившейся фильтрации несовершенство скважины по степени вскрытия пласта фильтром является функцией времени ξ_t. Отсюда следует, что необходимо раскрыть математическую структуру этой функции и выяснить возможность ее распространения на обобщенное сопротивление возмущающей скважины.

Идеи А. Л. Хейна, Н. Н. Веригина и В. Н. Щелкачева получили дальнейшее развитие в работах Ф. М. Бочевера, который ввел в формулу Ч. В. Тейса поправку-константу $\xi = \text{const}$ на обобщенное сопротивление возмущающей скважины [17, 18]

$$S_{ct} = \frac{Q}{4\pi T}\left[-\text{Ei}\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right)+2\xi\right] \qquad (3.1.6)$$

или

$$\overline{S}_t = \frac{2\pi T}{Q} S_{ct} = \xi + \frac{1}{2}\left[-\text{Ei}\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right)\right]. \qquad (3.1.6а)$$

Формулы (3.1.3) и (3.1.6) имеют полное математическое подобие. Отличие состоит лишь в том, что если поправка В. Н. Щелкачева $2\xi_{щ}$ отражает фильтрационное сопротивление межзональной области пласта $r_0 < r < r_1$, то поправка Ф. М. Бочевера компенсирует суммарное фильтрационное сопротивление в точке r_0, т. е. на стенке возмущающей скважины. В этом состоит достоинство формулы (3.1.6).

Ф. М. Бочевер считает, что для учета всей совокупности опытных данных целесообразно при определении ξ по формуле (3.1.6а) наносить точки фактических наблюдений на график в координатах

$$\overline{S}_t = f\left[-\frac{1}{2}\,\text{Ei}\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right)\right].$$

В таких координатах опытные данные должны укладываться на прямую, отсекающую на оси ординат, т. е. на оси $\overline{S}_t$, отрезок, равный ξ. Здесь величины T и a уже известны по определениям, сделанным на основе замеров уровней в наблюдательных скважинах [17].

Опыт определения ξ по данной методике описывается в работе [18], где Ф. М. Бочевер и К. Ф. Орфаниди пишут:

«Значения ξ имеют разный знак — в одних скважинах отрицательный, в других положительный...»

Вслед за работами Ф. М. Бочевера и Н. Н. Веригина, посвященными изучению неустановившегося несовершенства скважин, в 1969 г. появляется статья автора по этому же вопросу [73]. Здесь было получено следующее выражение для определения поправки-функции ξ_t, отражающей в формуле Ч. В. Тейса суммарное фильтрационное сопротивление (или несовершенство) возмущающей скважины на момент времени t:

$$\xi_t = \frac{4\pi T}{Q}\,\Delta S_t = \left(\frac{1}{\tau_t} - 1\right) \ln \frac{2{,}25\,at}{r_0^2}, \qquad (3.1.7)$$

где $\Delta S_t = S_{ct} - S_{0t}$ — величина пьезометрического разрыва (скачка) уровней на стенке возмущающей скважины в момент времени t после пуска скважины в работу; S_{0t} — понижение пьезометрической поверхности в пласте по внешней стенке скважины на момент времени t; S_{ct} — понижение уровня внутри скважины радиуса r_0 на момент времени t при данном дебите $Q = \text{const}$; $\tau_t = S_{0t}/S_{ct}$ — величина неустановившегося коэффициента эффективности скважины на момент времени t.

Формула (3.1.7) устанавливает физический смысл функции ξ_t, поскольку показывает, что на любой момент времени величина ξ_t прямо пропорциональна величине пьезометрического скачка ΔS_t, а график $\xi_t = f(\Delta S_t)$ представляет собой прямую с угловым коэффициентом $4\pi T/Q$, исходящую из начала координат. Это говорит о том, что существование функции ξ_t связано с наличием неустановившегося разрыва уровней (потерь напора) ΔS_t на стенке возмущающей скважины. Основным свойством этих функций является то, что их отношение $\Delta S_t/\xi_t$ всегда сохраняет одно и то же значение $Q/4\pi T$. Следовательно, характер изменения ΔS_t отражает закономерности изменения обобщенных фильтрационных сопротивлений скважины. Этот вывод позволяет записать, что любой вид неустановившегося несовершенства (в том числе по степени вскрытия пласта фильтром) ξ_{xt} измеряется соответствующей величиной разрыва уровней (потерь напора) на стенке скважины ΔS_{xt}:

$$\xi_t = \xi_{1t} + \xi_{2t} + \cdots + \xi_{xt} =$$

$$= \frac{4\pi T}{Q}(\Delta S_{1t} + \Delta S_{2t} + \cdots + \Delta S_{xt}). \qquad (3.1.7а)$$

Таким образом, значение формулы (3.1.7) состоит в том, что с ее помощью впервые было доказано наличие прямой связи между показателем неустановившегося несовершенства скважины ξ_t и неустановившейся величиной пьезометрического разрыва ΔS_t. Кроме того, из формулы (3.1.7) следует, что для реальных возмущающих скважин всегда $\xi_t \gg 0$, поскольку $\Delta S_t \gg 0$. Это значит, что опытные значения ξ_t имеют только положительный знак и вводятся в формулу Ч. В. Тейса для перехода от понижения S_{ct} к понижению S_{0t}, т. е. для компенсации потерь напора ΔS_t.

Итак, проведенный анализ развития теории неустановившихся фильтрационных сопротивлений показывает, что в настоящее время эта теория находится в стадии формирования и содержит как достоверные, так и гипотетические положения, еще не проверенные на физических моделях или в натурных условиях. Главным недостатком этой теории, если не считать предлагаемой модели, является то, что несовершенство скважин не ставится в зависимость от закономерностей изменения во времени промежутка высачивания Δh_t или пьезометрического разрыва уровней ΔS_t и фактически не исследовано, поскольку принимается постоянным и рассчитывается по формулам стационарной фильтрации. Поэтому крайне важно получить новые, и прежде всего экспериментальные, данные по неустановившимся фильтрационным сопротивлениям и тем самым расширить наши познания об этом интереснейшем явлении физики неустановившегося движения подземных вод к дренам.

§ 3.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ НЕСОВЕРШЕНСТВА СКВАЖИН

Современные методы гидрогеологических расчетов и моделирования дренажных скважин основаны на допущении, что их несовершенство (или обобщенное фильтрационное сопротивление) при неустановившейся фильтрации практически не изменяется во времени и равно сопротивлению скважины при установившейся фильтрации [15, 17, 25, 95, 125, 128]. На этом основании несовершенство скважин в условиях установившейся и неустановившейся фильтрации оценивается с помощью одних и тех же констант. Наиболее распространенными из этих констант являются приведенный радиус r_0', показатель обобщенного сопротивления (или поправка-константа к формуле Дюпюи) ξ и коэффициент

эффективности (или КПД) возмущающей скважины τ. Физический и геометрический смысл данных параметров выяснен в работах [60, 73, 77, 80]. Здесь же установлено, что несовершенство скважин измеряется величиной разрыва уровней ΔS у их стенок, а константы r_0', ξ, τ, характеризующие это несовершенство, выполняют роль мостика между понижениями S_c и S_0, т. е. применяются для преодоления (компенсации) величины ΔS.

При неустановившейся фильтрации величина ΔS является функцией времени, т. е. $\Delta S = \Delta S_t = f(t)$ [53, 73, 78, 80]. Отсюда вытекает, что обобщенное фильтрационное сопротивление скважины изменяется во времени идентично изменению ΔS_t и, следовательно, характеризуется функциями r_{t0}', ξ_t и τ_t. Для выяснения характера этих функций воспользуемся формулой Ч. В. Тейса—М. Маскета [15, 17, 111, 125, 128]

$$S_{rt} = \frac{Q}{4\pi T}\left[-\mathrm{Ei}\left(-\frac{r^2}{4at}\right)\right] \approx i \ln \frac{2{,}25\,at}{r^2}, \quad (3.2.1)$$

где

$$i = \frac{Q}{4\pi T} = \frac{S_{rt_2} - S_{rt_1}}{\ln (t_2/t_1)} = \mathrm{const} \quad (3.2.2)$$

или

$$i^* = 2{,}3\, i = \frac{0{,}183Q}{T} = \frac{S_{rt_2} - S_{rt_1}}{\lg (t_2/t_1)} \quad (3.2.3)$$

—тангенс угла наклона графика временного прослеживания уровня $S_{rt} = f(\ln t)$ или $S_{rt} = f(\lg t)$ к оси $\ln t$ или $\lg t$ в точке r; a — коэффициент пьезопроводности; S_{rt} — понижение уровня в точке r на момент времени t при данном дебите скважины $Q = \mathrm{const}$. Величина a в точке r рассчитывается по формуле

$$\ln a_r = S_{rt}/i + 2 \ln r - \ln 2{,}25t \quad (3.2.4)$$

или

$$\lg a_r = S_{rt}/i^* + 2 \lg r - \lg t - 0{,}352 \quad (3.2.5)$$

с использованием понижений S_{rt} в наблюдательных скважинах r; T — проводимость пласта по Тейсу, определяемая по изменению уровня в наблюдательных скважинах

$$T = Q/4\,\pi i = 0{,}183\, Q/i^*. \quad (3.2.6)$$

График интегральной показательной функции $W(x) = -\mathrm{Ei}(-x) = f(\lg x)$ приведен на рис. 3.1 и показывает, что при значениях аргумента $x \leqslant 0{,}08$ с погрешностью, не превышаю-

щей 3% (рис. 3.2), данная функция аппроксимируется логарифмической функцией

$$W(x) \approx W^*(x) = -0{,}56 - 2{,}3 \lg x. \qquad (3.2.7)$$

Погрешность этой аппроксимации

$$\Delta = [W(x) - W^*(x)]\, 100/W(x), \ \% \qquad (3.2.8)$$

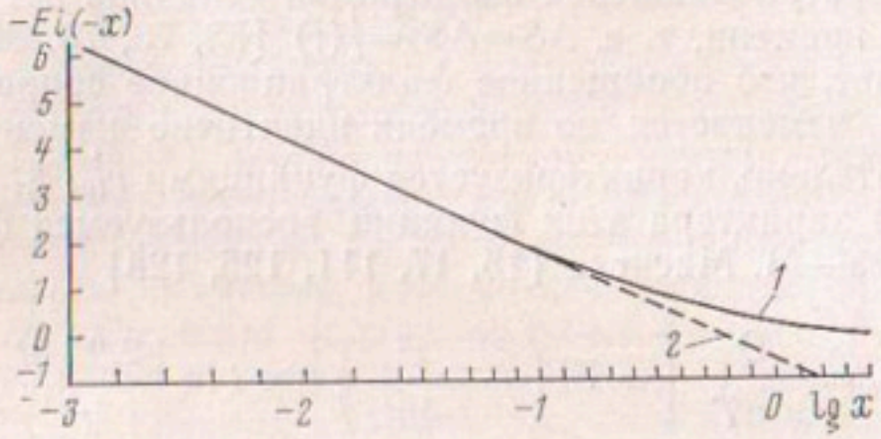


Рис. 3.1. Функции: 1—[Ei(—x)]=f(lg x); 2—$W^*(x)$=—0,56—2,3 lg x

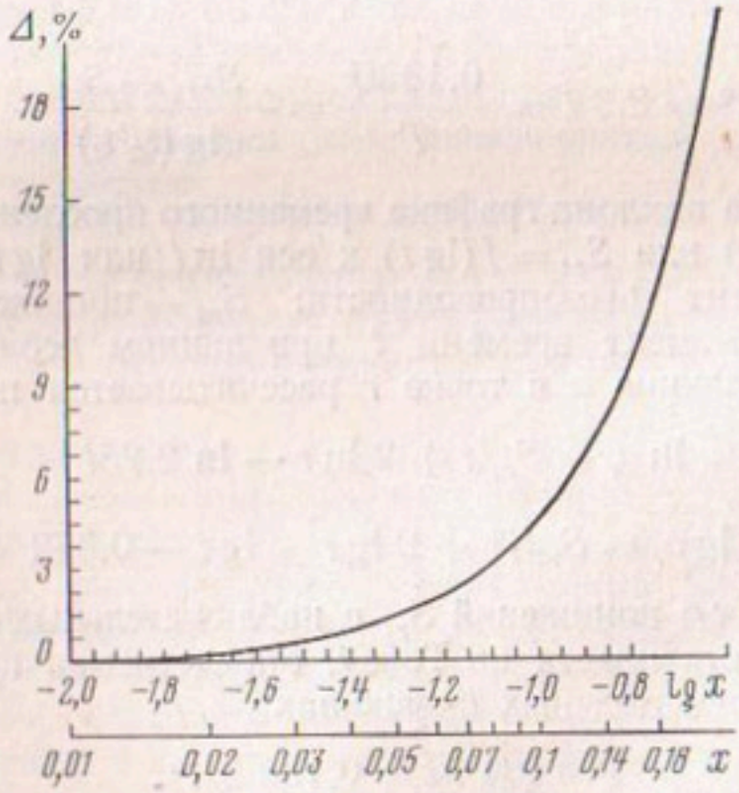


Рис. 3.2. Изменение точности аппроксимации интегральной показательной функции —Ei(—x) функцией логарифмической $W^*(x)$=—0,56—2,3 lg x в зависимости от величины аргумента x

существенно возрастает с увеличением x, начиная со значения $x=0{,}08$ (рис. 3.2).

Понижение пьезометрической поверхности в пласте по внешней стенке возмущающей скважины радиуса r_0 на момент времени t составит

$$S_{0t} = i \ln \frac{2{,}25\, at}{r_0^2}. \qquad (3.2.9)$$

К этому времени понижение уровня воды внутри возмущающей скважины будет равно

$$S_{ct} = \frac{Q}{4\pi T_c} \ln \frac{2{,}25\, a_c t}{r_0^2} = i_c \ln \frac{2{,}25\, a_c t}{r_0^2}, \qquad (3.2.10)$$

где

$$i_c = \frac{Q}{4\pi T_c} = \frac{S_{ct_2} - S_{ct_1}}{\ln (t_2/t_1)} \qquad (3.2.11)$$

или

$$i_c^* = 2{,}3\, i_c = \frac{0{,}183\, Q}{T_c} = \frac{S_{ct_2} - S_{ct_1}}{\lg (t_2/t_1)} \qquad (3.2.12)$$

— тангенс угла наклона графика $S_{ct} = f(\ln t)$ или $S_{ct} = f(\lg t)$ к оси $\ln t$ или $\lg t$;

$$T_c = k_c h_{эф} = \frac{Q}{4\pi i_c} = \frac{0{,}183\, Q}{i_c^*}; \qquad (3.2.13)$$

$$\ln a_c = S_{ct}/i_c + 2 \ln r_0 - \ln 2{,}25\, t. \qquad (3.2.14)$$

Следуя В. Н. Щелкачеву, параметры T_c и a_c по аналогии с коэффициентами T_{kR} или T_{kr} будем называть соответственно кажущейся проводимостью и пьезопроводностью возмущающей скважины, поскольку они рассчитываются по графику временного прослеживания уровня $S_{ct}=f(\ln t)$ внутри возмущающей скважины с использованием действительного радиуса скважины r_0. На этом основании параметры T_c и a_c являются функциями обобщенного сопротивления скважины, т. е. дают весьма искаженное значение проводимости и пьезопроводности пласта, и получаются при проведении одиночных откачек [53, 60, 73, 77, 78, 80, 81]. Это вносит существенные погрешности в оценку истинных значений параметров пласта T и a при определении их по данным одиночных откачек при неустановившейся фильтрации. Совершенно очевидно, что переход от кажущихся значений параметров T_c и a_c к действительным T и a необходимо осуществлять путем введения в формулу Ч. В. Тейса для возмущающей скважины

(3.2.10) соответствующих поправок, исключающих (или компенсирующих) влияние обобщенного фильтрационного сопротивления скважины. Точность решения этой задачи определяет точность оценки гидрогеологических параметров по данным одиночных откачек и, следовательно, достоверность проектных расчетов междренных расстояний, нормы осушения и т. д. Приступим к решению этой задачи.

Вычитая (3.2.9) из (3.2.10), находим неустановившуюся величину пьезометрического разрыва уровней (потерь напора) $\Delta S_t = S_{ct} - S_{0t}$ у стенки возмущающей скважины на момент времени t [53, 73, 77, 78]

$$\Delta S_t = \Delta S_t^0 + \sigma \ln t, \qquad (3.2.15)$$

где ΔS_t^0 — отрезок оси ΔS_t, отсекаемый графиком $\Delta S_t = f(\ln t)$; $\sigma = i_c - i$ — тангенс угла наклона графика $\Delta S_t = f(\ln t)$ к оси $\ln t$.

Зависимость (3.2.15) показывает, что при неустановившейся фильтрации обобщенное сопротивление Φ_t не стремится к нулю после наложения возмущения на поток, а, наоборот, в начальный момент возмущения резко возрастает. При этом функция $\Phi_t = f(t)$ не разделяется на две части, одна из которых была бы функцией времени и быстро стремилась к нулю, а другая сохранялась бы постоянной, равной фильтрационному сопротивлению при установившейся фильтрации Φ. Действительно, учитывая (3.2.15), получаем закон изменения во времени неустановившегося фильтрационного сопротивления [80]

$$\Phi_t = \Delta S_t / Q = \Phi_t^0 + p \ln t, \qquad (3.2.16)$$

где $\Phi_t^0 = \Delta S_t^0 / Q$; $p = \sigma / Q$.

Формула (3.2.16) показывает, что возможны три случая изменения неустановившихся фильтрационных сопротивлений: 1) $p > 0$, величина Φ_t возрастает от нуля при $t = 0$ до максимального значения Φ при установившейся фильтрации; 2) $p = 0$, тогда $\Phi_t = \Phi_t^0 = \Phi$, т. е. установившиеся величины разрыва уровней ΔS и фильтрационного сопротивления Φ достигаются скачком практически мгновенно после пуска скважины в работу; это происходит благодаря тому, что скорости снижения (восстановления) уровней S_{ct} и S_{0t} в данном случае совпадают ($i_c = i$); 3) $p < 0$ (или $i_c < i$), величины ΔS_t и Φ_t непрерывно уменьшаются от некоторых максимальных значений в начальный период работы скважины до значений ΔS и Φ при установившейся фильтрации. На практике чаще наблюдаются первый и второй законы изменения Φ_t и ΔS_t.

Из формул (3.2.10) и (3.2.11) следует, что снижение уровня внутри возмущающей скважины происходит таким образом, как будто скважина состоит из пористой среды с параметрами i_c, T_c и a_c. Рассмотрим общий случай, когда $i_c \neq i$. Тогда различие между параметрами скважины (i_c, T_c, a_c) и пласта (i, T, a) приведет к тому, что $\Delta S_t = f(t)$ и скорости снижения пьезометрической поверхности S_{0t} и уровня внутри скважины S_{ct} будут различны. Учитывая это обстоятельство, для перехода от понижения S_{ct} к понижению S_{0t} воспользуемся методом, разработанным в [77, 78, 80, 81] для построения и исследования установившейся величины приведенного радиуса возмущающей скважины r'_0.

Следуя указанному методу, неустановившуюся пьезометрическую поверхность Ч. В. Тейса продолжим внутрь возмущающей скважины до пересечения ее с уровнем воды S_{ct} (рис. 3.3). Ввиду различия скоростей движения уровня S_{ct} и поверхности S_{0t} точка пересечения (r'_{0t}, S_{ct}) поверхности Ч. В. Тейса с уровнем S_{ct} будет перемещаться к началу координат от положения (r_0, 0) в начальный момент времени ($t=0$, $\Delta S_t=0$) до положения (r'_0, S_c) при установившейся фильтрации ($t=\infty$, $\Delta S_t=\Delta S$). Тем самым область фильтрации с параметрами i, T, a будет непрерывно распространяться к началу координат до точек (r'_{0t}, S_{ct}). В этой (расширяющейся) области фильтрации понижение S_{ct} будет соот-

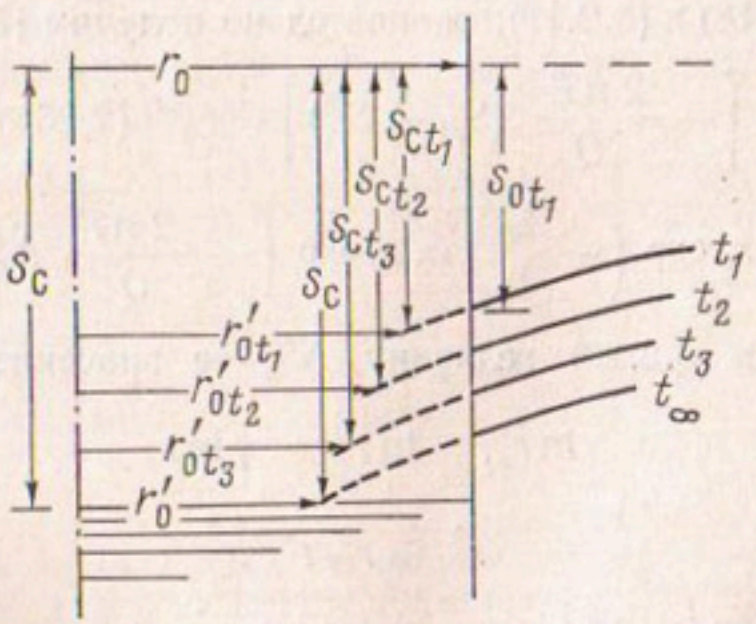


Рис. 3.3. К построению приведенных радиусов возмущающей скважины, работающей в условиях нестационарной фильтрации

ветствовать переменной ординате депрессионной поверхности, имеющей переменную абсциссу r'_{0t}.

Построенная таким образом движущаяся точка (r'_{0t}, S_{ct}) все время принадлежит неустановившейся поверхности Ч. В. Тейса. Поэтому координаты данной точки будут удовлетворять уравнению Ч. В. Тейса [77, 78, 80, 81]

$$Q = \frac{4\pi T S_{rt}}{\ln \frac{2{,}25\,at}{r^2}} = \frac{4\pi T S_{0t}}{\ln \frac{2{,}25\,at}{r_0^2}} = \frac{4\pi T S_{ct}}{\ln \frac{2{,}25\,at}{(r'_{0t})^2}}. \quad (3.2.17)$$

Полагая

$$\xi_t = 2 \ln (r_0/r'_{0t}), \quad (3.2.18)$$

перепишем уравнение (3.2.17):

$$Q = \frac{4\pi T S_{0t}}{\ln \frac{2{,}25\,at}{r_0^2}} = \frac{4\pi T S_{ct}}{\ln \frac{2{,}25\,at}{r_0^2} + \xi_t}. \quad (3.2.19)$$

Из (3.2.17) и (3.2.19) видим, что r'_{0t} — неустановившийся приведенный радиус возмущающей скважины на момент времени t. Из способа построения точки пересечения (r'_{0t}, S_{ct}) следует, что неустановившийся (r'_{0t}) и установившийся (r'_0) приведенные радиусы имеют одинаковый физический и геометрический смысл. Для определения r'_{0t} из (3.2.17) найдем величину S_{ct} и подставим ее в равенство $\Delta S_t = S_{ct} - S_{0t}$. Учитывая (3.2.9), (3.2.18) и (3.2.19), окончательно получим [78, 80, 81, 83]

$$r'_{0t} = r \exp\left[-\frac{2\pi T}{Q}(S_{ct} - S_{rt})\right] = r_0^{1/\tau_t} (2{,}25\,at)^{(\tau_t - 1)/2\tau_t} =$$

$$= r_0 \exp\left(-\frac{\xi_t}{2}\right) = r_0 \exp\left(-\frac{2\pi T}{Q}\Delta S_t\right). \quad (3.2.20)$$

Заменяя в (3.2.20) величину ΔS_t ее значением из (3.2.15), имеем

$$\ln r'_{0t} = \ln r^0_{0t} - \gamma \ln t \quad (3.2.21)$$

или

$$r'_{0t} = r^0_{0t}\, t^{-\gamma}, \quad (3.2.22)$$

где $r^0_{0t} = r_0 \exp(-\Delta S^0_t / 2i)$ — величина r'_{0t} на момент времени $t = 1$ или, иначе, $\ln r^0_{0t}$ — отрезок оси $\ln r'_{0t}$, отсекаемый графиком $\ln r'_{0t} = f(\ln t)$;

$$\gamma = \frac{\sigma}{2i} = \sigma \frac{2\pi T}{Q} = \frac{1}{2}\left(\frac{T}{T_c} - 1\right) \qquad (3.2.23)$$

— тангенс угла наклона графика $\ln r'_{0t} = f(\ln t)$ к оси $\ln t$.

Входящая в выражения (3.2.18) и (3.2.19) функция ξ_t также представляет собой поправку к формуле Ч. В. Тейса на неустановившееся несовершенство возмущающей скважины. Величина ξ_t рассчитывается по формуле (3.1.7), вытекающей из равенств (3.2.17)—(3.2.19). С учетом зависимости (3.2.20) формула (3.1.7) принимает вид [73, 78, 80, 81, 83]

$$\xi_t = 2\ln(r_0/r) + \frac{4\pi T}{Q}(S_{ct} - S_{rt}) = 2\ln(r_0/r'_{0t}) =$$

$$= \frac{4\pi T}{Q}\Delta S_t = \left(\frac{1}{\tau_t} - 1\right)\ln\frac{2{,}25\,at}{r_0^2} \qquad (3.2.24)$$

или, учитывая (3.2.15),

$$\xi_t = \xi_t^0 + \beta \ln t, \qquad (3.2.25)$$

где $\xi_t^0 = \Delta S_t^0 / i$—отрезок оси ξ_t, отсекаемый графиком $\xi_t = f(\ln t)$;

$$\beta = \frac{\sigma}{i} = 2\gamma = \frac{T}{T_c} - 1 \qquad (3.2.26)$$

— тангенс угла наклона графика $\xi_t = f(\ln t)$ к оси $\ln t$.

Таким образом, заменяя в формуле Ч. В. Тейса для пласта (3.2.1) понижение S_{rt} или S_{0t} понижением S_{ct}, получаем многократное равенство, справедливое для совершенных и несовершенных реальных скважин [80, 81, 83]:

$$Q = \frac{4\pi T S_{0t}}{\ln\frac{2{,}25\,at}{r_0^2}} = \tau_t \frac{4\pi T S_{ct}}{\ln\frac{2{,}25\,at}{r_0^2}} = \frac{4\pi T S_{ct}}{\ln\frac{2{,}25\,at}{(r'_{0t})^2}} =$$

$$= \frac{4\pi T S_{ct}}{\ln\frac{2{,}25\,at}{r_0^2} + \xi_t} = \frac{2\pi T \Delta S_t}{\ln(r_0/r'_{0t})} = 4\pi T \frac{\Delta S_t}{\xi_t}. \qquad (3.2.27)$$

Полученные зависимости характеризуют закономерности изменения во времени неустановившихся обобщенных сопротивлений возмущающих скважин и обладают точностью, присущей логарифмической аппроксимации интегральной показательной функции (см. рис. 3.2), т. е. справедливы для

большинства практически решаемых задач. Это подтвердилось при обработке данных многочисленных опытных кустовых откачек, выполненных в условиях неустановившейся фильтрации (см. рис. 3.4 и работы [53, 78, 83]).

Характер изменения неустановившихся фильтрационных сопротивлений удобнее всего изучать на скважинах, коэффи-

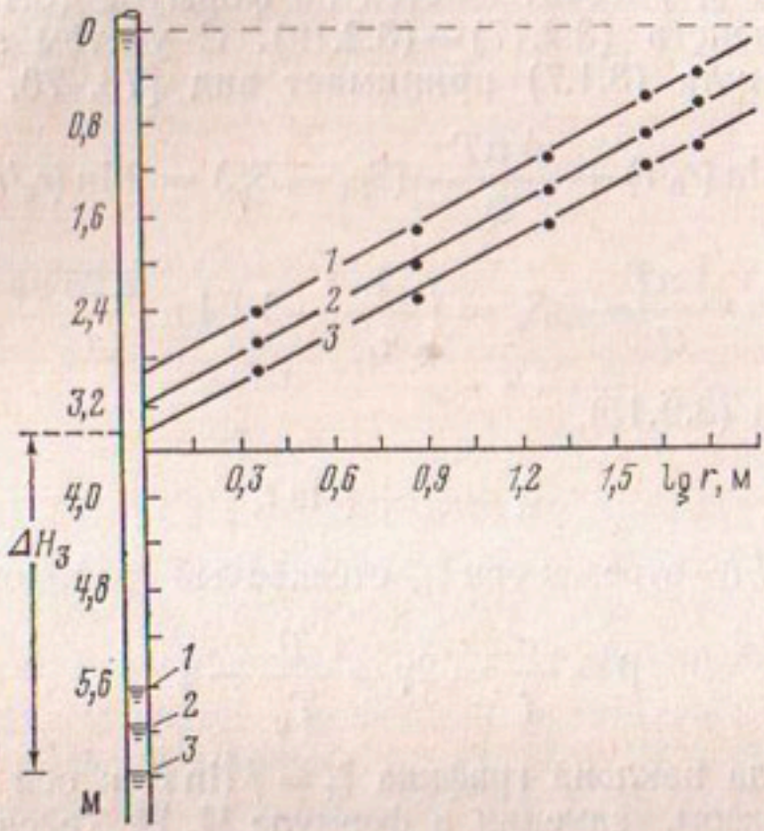


Рис. 3.4. Положение неустановившейся депрессионной поверхности и уровня воды внутри дренажной скв. 7 на различные моменты времени после пуска скважины в работу с дебитом 140 м³/ч (опыт 49): через 0,5 (*1*), 3 (*2*) и 48 ч (*3*) после включения насоса

циент эффективности которых $\tau<0{,}1$ (сюда относятся все разведочные и нефтяные скважины, а также большинство водопонижающих и водозаборных скважин глубиной более 70 м).

§ 3.3. ВЛИЯНИЕ НЕСОВЕРШЕНСТВА ВОЗМУЩАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПЬЕЗОПРОВОДНОСТИ И ПРОВОДИМОСТИ

Основным видом опытно-фильтрационных работ при гидрогеологических изысканиях и съемках являются опытные откачки из одиночных скважин. В этих случаях, как мы

установили выше, вместо действительных параметров пласта T и a получаются кажущиеся (т. е. искаженные величиной разрыва напорной функции ΔS_t на стенке скважины) значения проводимости T_c и уровнепроводности a_c, которые зависят от суммарного несовершенства опытной скважины и в 2—3 раза и более отличаются от истинной проводимости и уровнепроводности водоносного горизонта. В то же время известно, что основные параметры мелиоративной сети (междренные расстояния, модуль дренажного стока, глубина каналов, продолжительность дренирования и др.) находятся в прямой зависимости от величин T и a. Отсюда следует, что вопрос о достоверности определения гидрогеологических параметров по данным одиночных откачек имеет большое практическое и теоретическое значение. Известные решения в этой области построены на неизменяемости обобщенных сопротивлений опытных скважин при неустановившейся фильтрации и поэтому не всегда обладают достаточной точностью.

Для оценки влияния обобщенных сопротивлений опытной скважины на точность определения параметров T и a из (3.2.9) и (3.2.10) находим, что действительная a и кажущаяся a_c пьезопроводности пласта связаны между собой соотношением

$$a = a_c \exp\left[\frac{S_{rt}}{i} - \frac{S_{ct}}{i_c} + \ln\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right] = a_c \exp\left[-\left(\frac{S_{ct}}{i_c} - \frac{S_{0t}}{i}\right)\right]. \quad (3.3.1)$$

Обозначим

$$\xi^* = \frac{S_{ct}}{i_c} - \frac{S_{rt}}{i} - \ln\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 = \frac{S_{ct}}{i_c} - \frac{S_{0t}}{i} = \text{const}. \quad (3.3.2)$$

Из (3.3.1) и (3.3.2) находим

$$\xi^* = \ln a_c - \ln a. \quad (3.3.3)$$

Учитывая значение $\ln a_c$ из (3.2.14), окончательно имеем

$$\ln a = \frac{S_{ct}}{i_c} - \ln\frac{2{,}25\,t}{r_0^2} - \xi^* \quad (3.3.4)$$

или

$$S_{ct} = \frac{Q}{4\pi T_c}\left(\ln\frac{2{,}25\,at}{r_0^2} + \xi^*\right). \quad (3.3.5)$$

Из выражений (3.3.1)—(3.3.5) видно, что поправка-константа ξ^* переводит кажущуюся пьезопроводность a_c в истинную a. При этом величина проводимости T_c, также определяемая по возмущающей скважине, продолжает оставаться кажущейся. Это говорит о том, что коэффициент ξ^* можно назвать поправкой на пьезопроводность.

Из (3.3.2) и (3.3.3) следует, что только для идеальной совершенной скважины, работающей при условии $S_{ct}=S_{0t}$ или $\xi^*=0$, мы имеем $a_c=a$. Иначе говоря, только при отсутствии потерь напора (гидравлического скачка уровней) на стенке возмущающей скважины мы получаем одинаковые значения гидрогеологических параметров как по возмущающей (центральной), так и по наблюдательным скважинам. Следовательно, условие $\Delta S_t=0$ является необходимым и достаточным для того, чтобы сохранялись равенства: $a_c=a$ и $T_c=T$.

Таким образом, если мы имеем данные опытной откачки из одиночной несовершенной скважины, то истинную пьезопроводность пласта a необходимо рассчитывать по формуле (3.3.4), используя поправку ξ^* и значение кажущейся пьезопроводности a_c. При учете поправки на пьезопроводность ξ^* компенсируется разность между неустановившимся обобщенным сопротивлением скважины ξ_t и неустановившимся сопротивлением ξ_t^*, обусловленным несоответствием между скоростями снижения уровня в пласте и внутри возмущающей скважины. Это приводит к тому, что при введении в формулу Ч. В. Тейса для возмущающей скважины поправки-константы ξ^* кажущаяся пьезопроводность a_c переходит в истинную пьезопроводность пласта a.

Положим $i_c=i$. Тогда из (3.2.15) и (3.3.2) получим

$$\xi^* = \xi_t^0 = \frac{\Delta S_t^0}{i} = \frac{4\pi T}{Q}\Delta S_t^0. \qquad (3.3.6)$$

С учетом (3.3.6) формула (3.3.3) принимает вид

$$a = a_c \exp(-\xi_t^0) = a_c \exp\left(-\frac{4\pi T}{Q}\Delta S_t^0\right). \qquad (3.3.7)$$

Выражение (3.3.7) показывает, что при откачках из одиночных скважин иногда (при $i_c=i$) можно получить истинное значение проводимости пласта T, но никогда нельзя получить истинной величины коэффициента пьезопроводности пласта a. Это значит, что в строгой постановке определение a необходимо вести только по наблюдательным скважинам.

Отмеченное явление постоянного несовпадения пьезопроводностей ($a_c \neq a$) и возможного совпадения или несовпадения проводимостей ($T_c = T$ или $T_c \neq T$) при откачках из одиночных скважин имеет место из-за возникновения разности между неустановившимся обобщенным сопротивлением ξ_t, обусловленным изменением величины ΔS_t на стенке скважины, и неустановившимся фильтрационным сопротивлением ξ_t^*, обусловленным различными скоростями снижения уровня в пласте и внутри возмущающей скважины. Установим связь между указанными сопротивлениями. Для этого значение $\ln a$ из (3.2.19) подставим в (3.3.4). Тогда получим

$$\xi_t = \xi^* + S_{ct}\left(\frac{1}{i} - \frac{1}{i_c}\right) = \xi^* + \xi_t^*, \qquad (3.3.8)$$

где

$$\xi_t^* = S_{ct}\left(\frac{1}{i} - \frac{1}{i_c}\right) = \frac{4\pi(T - T_c)}{Q} S_{ct}. \qquad (3.3.9)$$

Из (3.3.8) и (3.3.9) следует, что неустановившаяся составляющая суммарного сопротивления ξ_t^* не возникает только при $i_c = i$, т. е. при одинаковых скоростях снижения уровней S_{ct} и S_{0t}. В этом случае неустановившееся обобщенное сопротивление ξ_t переходит в константу $\xi_t = \xi^* = \xi_t^0 = \xi$, сохраняющую свое значение и при установившемся режиме фильтрации.

Из (3.3.9) получаем зависимость для перехода от кажущейся проводимости T_c к истинной T при одиночных опытных откачках:

$$T = T_c + \frac{Q}{4\pi}\frac{\xi_t^*}{S_{ct}} = T_c + \frac{\psi}{4\pi}, \qquad (3.3.10)$$

где

$$\psi = Q(\xi_t^*/S_{ct}) = \text{const}. \qquad (3.3.11)$$

Выражение (3.3.10) показывает, что роль мостика между параметрами T_c и T выполняет коэффициент неустановившегося сопротивления ξ_t^*. На этом основании функцию ξ_t^* можно назвать поправкой на проводимость. Использование ее в формуле Ч. В. Тейса для возмущающей скважины (3.2.10) позволяет вместо кажущейся проводимости T_c получить истинную проводимость пласта T:

$$S_{ct} = \frac{Q}{4\pi T}\left(\ln\frac{2{,}25\,a_c t}{r_0^2} + \xi_t^*\right). \qquad (3.3.12)$$

Из формулы (3.3.12) видно, что перевод кажущейся пьезопроводности a_c в истинную a поправка ξ_t^* не осуществляет. Эту операцию, как показывает равенство (3.3.5), выполняет поправка-константа ξ^*. Вместе взятые, поправки ξ^* и ξ_t^* выполняют ту же роль, что и функция ξ_t. Чтобы убедиться в этом, из формул (3.2.19), (3.3.5), (3.3.8) и (3.3.12) построим многократное равенство

$$S_{ct} = \frac{Q}{4\pi T}\left(\ln\frac{2{,}25\,at}{r_0^2} + \xi_t\right) = \frac{Q}{4\pi T_c}\left(\ln\frac{2{,}25\,at}{r_0^2} + \xi^*\right) =$$

$$= \frac{Q}{4\pi T}\left(\ln\frac{2{,}25\,a_c t}{r_0^2} + \xi_t^*\right) = \frac{Q}{4\pi T_c}\ln\frac{2{,}25\,a_c t}{r_0^2}. \quad (3.3.13)$$

Полученное равенство отражает структуру неустановившегося обобщенного сопротивления ξ_t и раскрывает роль каждой составляющей этого сопротивления. Оно показывает, что существование двух составляющих общего сопротивления (ξ^* и ξ_t^*) обусловлено тем, что перераспределение давления в неустановившемся фильтрационном потоке характеризуется двумя параметрами — пьезопроводностью и проводимостью. Если учесть, что пьезопроводность в свою очередь является функцией упругоемкости пласта, то мы приходим к выводу о необходимости дальнейшего изучения физики неустановившихся фильтрационных сопротивлений. Полученные зависимости, и в частности формула (3.3.13), могут служить точкой отправления в этих исследованиях.

§ 3.4. УЧЕТ НЕСОВЕРШЕНСТВА СКВАЖИН ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА В УСЛОВИЯХ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ

В § 2.7 мы рассмотрели вопрос об учете несовершенства дренажных скважин при моделировании вертикального дренажа на интеграторах ЭГДА. Было доказано, что при учете несовершенства скважин в виде дополнительного электрического сопротивления осуществляется переход от понижения уровня воды внутри дренажной скважины S_c к понижению УГВ в пласте по внешней стенке скважины S_0, т. е. преодолевается величина пьезометрического разрыва (промежутка высачивания) на стенке скважины и тем самым значительно повышается точность прогнозирования нормы осушения на осушаемом массиве.

Эту же задачу необходимо решать и при моделировании дренажных, водозаборных и водопонижающих скважин в условиях неустановившейся фильтрации. Приведем результаты наших исследований по данному вопросу [74, 81].

Поставленная задача решается путем использования многократного равенства (3.2.27) и геометрического смысла приведенного радиуса возмущающей скважины r'_{0t}. Действительно, если построенная нами точка пересечения неустановившейся поверхности Ч. В. Тейса с изменяющимся уровнем S_{ct} внутри возмущающей скважины (r'_{0t}, S_{ct}) принадлежит уравнению Ч. В. Тейса, то потери напора в расширяющейся (к началу координат) области «пласта» $r_0 - r'_{0t}$ можно заменить временными электрическими сопротивлениями $R_{\Delta S_t}$, эквивалентными потерям напора ΔS_t. В этом случае, применяя метод Н. И. Дружинина [77], из (3.2.27) получим выражение для расчета дополнительного электрического сопротивления $R_{\Delta S_t}$, восполняющего потери напора в расширяющемся кольце $r_0 - r'_{0t}$:

$$R_{\Delta S_t} = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{r_0}{r'_{0t}} = \frac{\rho}{4\pi} \xi_t = \frac{\rho T}{Q} \Delta S_t \qquad (3.4.1)$$

или, учитывая (3.2.15),

$$R_{\Delta S_t} = R^0_{\Delta S_t} + p \ln t, \qquad (3.4.2)$$

где $R_{\Delta S_t}$ — дополнительное электрическое сопротивление, восполняющее потери напора (величину пьезометрического разрыва) ΔS_t в кольце $r_0 - r'_{ct}$ на момент времени t; $R^0_{\Delta S_t} = \rho T \Delta S^0_t / Q$ — то же, на момент времени $t = 1$; $p = \rho T \sigma / Q$ — тангенс угла наклона графика $R_{\Delta S_t} = f(\ln t)$ к оси $\ln t$; ρ — удельное электрическое сопротивление модели.

Глава 4

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА ПРИ РАБОТЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Изучению физики неустановившегося движения грунтовых вод большое внимание уделяется в СССР и за рубежом [2, 12, 36, 49, 52, 58, 59, 73, 85, 92, 102, 119, 134, 137 и др.]. Несмотря на достигнутые успехи, многие стороны этого движения до сих пор не исследованы. К примеру, не раскрыта роль силы тяжести (вертикальной составляющей неустановившейся скорости фильтрации) и начального градиента напора в формировании неустановившейся депрессионной поверхности; не выяснен характер связи между коэффициентом фильтрации и неустановившейся водоотдачей, между законом Дарси и конечной скоростью распространения возмущений в пласте.

Нуждаются в совершенствовании и дальнейшем развитии модели Ж. Буссинеска, Е. С. Маркова, О. Н. Носовой, Н. С. Боултона, В. М. Шестакова и других исследователей о структуре и закономерностях изменения водоотдачи как в капиллярной зоне, так и внутри грунтового потока. В начальной стадии изучения находятся фильтрационные потоки подземных вод с переменным вдоль пути движения расходом, характеризующиеся необычными для классической подземной гидродинамики свойствами: различием в величинах проводимости, определенных при установившейся T_D и неустановившейся T фильтрации; ростом проводимости с увеличением интенсивности возмущения пласта; закономерным изменением коэффициента пьезопроводности (или емкости) пласта по радиусу депрессионной воронки при постоянстве проводимости в этой зоне; зависимостью радиуса влияния от интенсивности возмущения и т. д. [57, 76, 82]. По-прежнему нет решений основной задачи теории нелинейной фильтрации — задачи о математическом представлении, физическом смысле и методологии определения фильтрационных свойств нелинейных сред при установившемся и неустановившемся движении.

В работах [73, 82, 87] показано, что при наличии нелинейного закона фильтрации, который может быть аппроксимирован, к примеру, аналитическим полиномом n-й степени

$$V = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + \cdots + a_n I^n,$$

существующие представления о коэффициенте фильтрации и методике его определения уже не применимы. В этих случаях понятие о гидрогеологических параметрах связано с коэффициентами данного полинома и пока не определено.

Приведенный перечень нераскрытых закономерностей динамики грунтовых вод далеко не полон. Однако и он показывает, что неустановившаяся гравитационная фильтрация носит весьма сложный характер и в физическом отношении изучена недостаточно. По этой причине возникшие теории движения грунтовых вод в основном гипотетичны и описывают реальный поток лишь в каком-то диапазоне пространства и времени, т. е. частично. Наиболее известны из них теории Ж. Дюпюи, Ж. Буссинеска, И. Козени, Н. С. Боултона, Р. де Виста, Н. Ф. Бондаренко — С. В. Нерпина, В. М. Шестакова — Т. Д. Стрельцовой, Н. Н. Веригина, Ш. П. Неймана. Обобщением теорий Дюпюи и Козени является полуэмпирическая модель движения грунтовых вод к дренам, разработанная автором [58, 59, 73].

Основной недостаток названных теорий — отсутствие в них каких-либо критериев, которые описывали бы характер взаимодействия силы тяжести с градиентом напора в неустановившемся фильтрационном потоке. Кроме этого, данные теории отличаются различным толкованием физического смысла коэффициента уровнепроводности $a = T/\mu$ и емкости (упругой водоотдачи) пласта μ. К примеру, если теория Буссинеска основана на водоотдаче как константе пласта, сохраняющей одно и то же значение в течение неустановившейся и установившейся фильтрации, то теория Н. С. Боултона построена на допущении, что при неустановившейся фильтрации водоотдача состоит из двух частей: постоянной упругой и неустановившейся гравитационной $\mu_t = f(t)$ [119, 129, 134].

Такой набор теорий (в ряде случаев построенных на противоположных физических предпосылках) для описания одного и того же переходного процесса говорит о необходимости дальнейшего изучения физики движения грунтовых вод в различных гидрогеологических и гидродинамических условиях. По этой причине натурные исследования неустановившейся безнапорной фильтрации всегда будут представлять большой практический и теоретический интерес. Накопление

и анализ таких данных позволят оценить достоверность и границы применимости существующих гипотез и могут оказаться полезными при дальнейшем изучении физики неустановившегося движения грунтовых вод к дренам, а также при совершенствовании известных и построении новых моделей и теорий этого движения.

Среди факторов, определяющих достоверность гидрогеологических прогнозов водного режима осушаемых и прилегающих к ним территорий, главную роль играют два: устойчивость гидрогеологических параметров и соответствие реальных граничных условий водоносных пластов и комплексов их математическим и модельным аналогам. Именно по этой причине в последние годы большое внимание уделяется изучению неустойчивости расчетных гидрогеологических параметров при изменении интенсивности и продолжительности дренирования пласта или водосбора [7, 12, 21, 32, 34, 57, 76, 82, 85].

§ 4.1. ЗАВИСИМОСТЬ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ВОЗМУЩЕНИЯ ПЛАСТА

Анализ работы дренажных скважин показывает, что при проектировании вертикального дренажа на заболоченных землях основное внимание следует уделять гидрогеологическим расчетам формы депрессионной поверхности, прогнозированию скорости, дальности и продолжительности ее распространения в предпосевной, посевной и летний периоды при работе системы в различных режимах и в различные по водности годы. Второй задачей является оценка суммарной величины дренажного стока, отводимого с осушаемого массива для поддержания оптимальной нормы осушения или используемого для орошения.

Выполнение такого проекта осложняется тем, что в процессе дренирования режим водного питания массива, граничные условия пластов и величины гидрогеологических параметров не остаются постоянными (т. е. такими, какими они были в естественном состоянии до эксплуатации водоносной толщи) и изменяются в зависимости от интенсивности, масштабов и продолжительности осушения. В частности, с течением времени возникает перетекание из смежных водоносных горизонтов в возмущенный, претерпевает изменение характер гидравлической связи дренируемой толщи с источниками питания. Кроме того, при осушении безнапорных пластов имеют место и более сложные явления, которые в неменьшей

степени влияют на форму депрессионной поверхности и характер ее развития. Эти явления пока изучены недостаточно. Они относятся к области физики неустановившейся гравитационной фильтрации и являются результатом воздействия на движение воды силы тяжести, начального градиента напора (или начального градиента фильтрации) I_0 и капиллярной каймы с переменной (неустановившейся) водоотдачей. Эти факторы приводят к тому, что фактические показатели работы дренажа становятся отличными от тех, которые предусматриваются проектом.

На существование зависимости расчетных значений гидрогеологических параметров от интенсивности возмущения пласта Q указывали А. Т. Горбунов, Г. И. Баренблатт, Ю. П. Желтов, В. М. Рыжик, Р. Скавиньски, Ю. Б. Челидзе, Ю. Л. Аветикян, В. А. Мироненко, Р. В. Стельман, А. Улияpик, Т. Маддок, автор и др. В результате для физического и гидродинамического объяснения зависимостей $k=f(Q)$ и $T=f(Q)$ разработан ряд гипотез [7, 12, 21, 32, 34, 49, 52, 76, 82, 85].

Н. В. Демин, Ю. П. Кисляков и В. Т. Морозова считают [32], что при малых градиентах напора в скважину поступает жидкость только из наиболее проницаемых зон пласта; с увеличением интенсивности отбора в процесс фильтрации включаются и малопроницаемые пропластки, в результате чего проницаемость пласта возрастает. Эта гипотеза нашла убедительное подтверждение при обследовании скважин глубинными дебитометрами.

Гипотеза К. Я. Коробова и Ю. В. Антипина более полная [52]. Она основана на предположении, что при малых градиентах давления в наиболее мелких порах жидкость неподвижна. С увеличением градиента давления, когда гидродинамические силы становятся больше сил молекулярного взаимодействия между поверхностью пористой среды и жидкостью, последняя начинает двигаться и в наиболее мелких порах. Вовлечение мелких пор в процесс фильтрации при увеличении градиента давления вызывает соответствующее увеличение проницаемости пористой среды. На этом основании авторы считают, что наличие пор различных размеров в пласте, иначе говоря его микронеоднородность, является основной причиной изменения параметров пласта при различных режимах работы скважин. Эта гипотеза обстоятельно подтверждена в лабораторных условиях на искусственно сцементированных образцах песчаника, однородного по проницаемости. В этих образцах не было пропластков различ-

ной проницаемости, однако опыты показали, что и в макрооднородных пористых средах величина конечной нефтеотдачи зависит от скорости фильтрации, величина которой определяется градиентом давления (опыты Ф. И. Котяхова, Ш. К. Гиматудинова, Н. С. Гудок, И. Г. Пермякова и др.).

Аналогичные результаты получены Ф. А. Требиным при исследовании фильтрации нефти в песках. Было доказано, что и в макрооднородной пористой среде существует зависимость между градиентом давления и величиной проницаемости [32, 52].

В литературе по подземной гидравлике приводится большое количество данных лабораторных и натурных опытов, указывающих на то, что такие гидродинамические характеристики пласта, как гидропроводность, проницаемость (коэффициент фильтрации) и эффективная (расчетная) мощность пласта, изменяются при изменении режима работы скважин. Опираясь на эти исследования, В. М. Ентов [34] разработал новую модель осредненного движения жидкостей в тонких слоистых пластах. В основу этой модели положен кусочно-линейный закон фильтрации, являющийся естественным обобщением закона Дарси. Модель В. М. Ентова позволяет описать важное для практики движение в слоистом пласте с изменением эффективной мощности пласта при изменении градиента давления. Действительно, кусочно-линейная связь между скоростью фильтрации и градиентом показывает, в какой части мощности пласта движение происходит, а в какой нет. Отсюда В. М. Ентовым сделан важный вывод о том, что «эффективная гидропроводность пласта, определенная по кривым изменения давления, должна зависеть от дебита по степенному закону» [34].

Таким образом, согласно современным представлениям, неустойчивость гидрогеологических параметров объясняется как чисто физическими условиями движения жидкостей в пористых средах (микронеоднородность пласта, наличие малопроницаемых пропластков и т. д.), так и существованием начального градиента напора и вытекающего из него обобщенного закона Дарси.

Анализ литературы по начальному градиенту фильтрации показывает, что имеют место как позитивные, так и негативные выводы о реальном проявлении этого параметра и его величинах [12, 34, 36, 73, 82, 102, 109, 128].

Существование начального градиента напора и вытекающего из него обобщенного закона Дарси приводит к тому, что скорости снижения уровня и роста неустановившегося ра-

диуса влияния носят затухающий характер. По этой причине радиус влияния скважин всегда имеет конечную величину (практически весьма небольшую) и является функцией дебита скважины [76, 82]. Аналогично параметры пласта, определяемые по формулам теории линейной фильтрации (например, по формулам Дюпюи и Тейса), при наличии I_0 также являются функциями дебита скважины [73, 82, 102, 123]. В связи с этим и возникает вопрос о том, в каких средах фильтрация воды подчиняется закону Дарси и теории линейной фильтрации, а в каких возникает начальный градиент напора и движение воды описывается обобщенным законом Дарси и вытекающей из него теорией квазилинейной фильтрации.

Для изучения этого вопроса были проведены лабораторные опыты на фильтрационной трубке длиной 1 м и сечением 100 см² [73]. Пьезометрическая поверхность замерялась многочисленными пьезометрами, расположенными вдоль трубки. За градиент напорного установившегося потока I принимался уклон прямолинейного участка пьезометрической поверхности, находящегося в центральной части трубки (вблизи торцов трубки пьезометрическая поверхность изгибается, поэтому показания торцевых пьезометров в расчет не принимались). Пористой средой служили фракции песка диаметром частиц 0,5—1,0 мм (коэффициент фильтрации этой фракции равен 80 м/сут) и 2,0—3,0 мм (коэффициент фильтрации этой фракции равен 393 м/сут). Трубка располагалась под разными углами к вертикали. Направление фильтрации менялось.

Данными опытами установлено, что движение воды в средне- и крупнозернистых песках происходит также при наличии начального градиента фильтрации I_0. Причем в одной и той же пористой среде величина I_0 может быть различной в зависимости от интенсивности и характера потока. Отсюда следует, что практически во всех водоносных горизонтах движение подземных вод будет происходить с возникновением начального градиента фильтрации [73]. Согласно же представлениям других исследователей, начальный градиент напора *) возникает только в малопроницаемых средах (глины, суглинки, бетон).

Покажем, что наличие различных точек зрения о начальном градиенте напора и области его проявления связано с

*) Под величиной начального градиента напора I_0 здесь и далее понимается расчетная его величина или аппроксимационная константа, равная отрезку оси I, отсекаемому продолжением прямолинейного участка графика $V=f(I)$.

методологией определения этого параметра и объясняется прежде всего тем, что в качестве градиента напора фильтрационного потока до сих пор принимался внешний градиент напора I^* и не было известно о существовании внутреннего градиента напора I и четырех новых разновидностей граничных условий 1-го рода, оказывающих различное влияние на формирование величины внутреннего и начального градиентов напора. Эти факторы порождаются осложняющими граничными сопротивлениями и отражают закономерности их изменения. Тем самым задача о начальном градиенте напора в определенных условиях сводится к задаче о закономерностях проявления граничных сопротивлений или концевых эффектов, возникающих в приборах Дарси. Изучение этой связи показало [87], что фильтрационные потоки обладают рядом удивительных свойств, среди которых наибольший интерес представляет свойство неустойчивости потока, когда при одном и том же внутреннем градиенте напора I, но различных граничных условиях и величинах I^* скорость фильтрации V (а следовательно, и гидрогеологические параметры) принимает различные числовые значения. Рассмотрим это явление более подробно.

§ 4.2. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ НЬЮТОНОВСКИХ И АНОМАЛЬНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ПРИБОРАХ ДАРСИ

Известно, что наличие дестабилизирующего сопротивления может явиться причиной возникновения гидродинамической неустойчивости сплошной среды. Будем предполагать, что такие сопротивления присущи фильтрационным потокам и изучим особенности их проявления в приборах Дарси (пермеаметрах) [87].

Вопросы неустойчивости фильтрационных потоков в подземной гидродинамике еще не изучались. Поэтому широкое распространение получил принцип устойчивости законов фильтрации $V=f(I)$ относительно градиента напора I. Согласно этому принципу, график $V=f(I)$ занимает в поле $V—I$ одно и то же устойчивое положение и, следовательно, пористая среда характеризуется только одним значением проницаемости и начального градиента напора независимо от направленности фильтрационного потока и состояния его граничных условий. В то же время Е. А. Замариным, А. В. Николаевым, А. Д. Дубахом, В. Зигелем, Г. А. Андрущенко,

Н. М. Герсевановым и др. установлено [21], что для одной и той же жидкости и пористой среды получаются различные значения указанных параметров. Отсюда можно заключить, что в определенных условиях устойчивость графика $V=f(I)$ нарушается.

Выполнив специальные опыты с целью изучения этих вопросов и уточнения «закона направленности фильтрационного потока», А. М. Васильев писал [21]: «Вполне уместно обратить внимание на то обстоятельство, что различными исследователями получены противоположные по своему характеру отклонения от закона Дарси. По опытам одних исследователей значение коэффициента фильтрации с увеличением градиента уменьшается. По опытам же других исследователей при том же условии значение коэффициента фильтрации с увеличением градиента увеличивается. Н. М. Герсеванов объясняет эти отклонения исключительно условиями производства самих опытов». Впоследствии В. А. Флорин установил [123], что увеличение или уменьшение коэффициента фильтрации по Дарси при возрастании расхода потока связано с наличием начального градиента напора.

Идеи названных исследователей получили дальнейшее развитие в опытах Ю. Л. Аветикяна. Изучая влияние градиента на характер изменения величины коэффициента фильтрации песчаных грунтов, он пришел к выводу, что противоречивые результаты, полученные отдельными исследователями, в большинстве случаев отражают только определенную методику экспериментирования, но не естественные закономерности движения грунтовых вод. Им было установлено, что коэффициент фильтрации k_i с увеличением градиента I увеличивается неза-

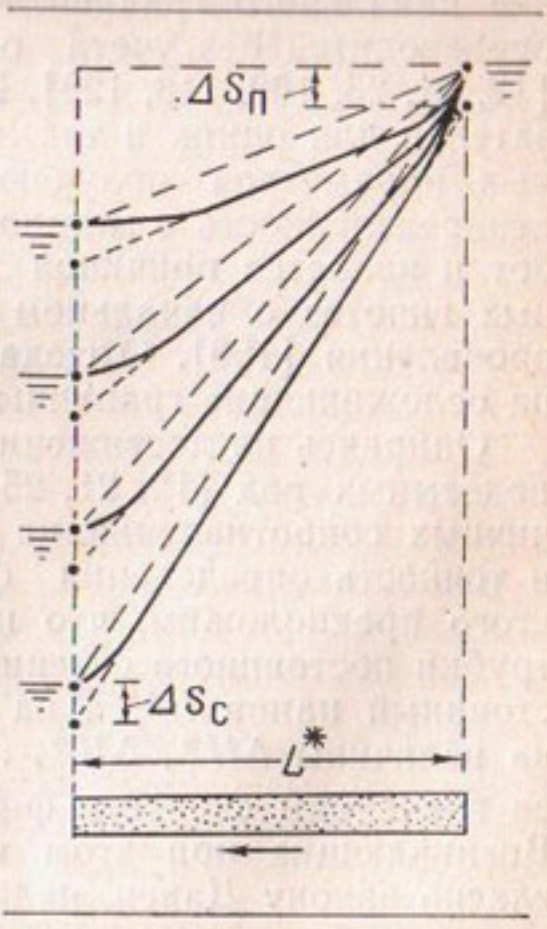


Рис. 4.1. Характер установившихся пьезометрических поверхностей (сплошные линии), формирующихся в пермеаметре при граничном условии R_0, когда величина потерь напора на входе в трубку равна величине восстановления напора на выходе из трубки: $I^*=I$, $|-\Delta S_c|=|\Delta S_п|$

висимо от направления фильтрации. Поэтому Ю. Л. Аветикян считает, что в общем случае величина $k_i = V/I$ не является физической константой данного грунта и меняется с изменением градиента напора [2].

Несмотря на эти исследования и обилие экспериментального материала, по-прежнему применялась гипотеза об устойчивости закона Дарси, согласно которой водопроницаемость грунта характеризуется только одним значением коэффициента фильтрации и начального градиента напора. По этой причине не было ответа на вопрос о том, почему для одной и той же пористой среды получаются различные значения указанных параметров.

Следуя Н. М. Герсеванову и В. А. Флорину, ответ будем искать в лабораторных методах определения коэффициента фильтрации и начального градиента напора. Эти методы основаны на применении различных моделей приборов Дарси (пермеаметров), состоящих из фильтрационной трубки, заполненной пористой средой [12, 21, 25]. При движении жидкости через трубку на ее торцах возникают входные и выходные эффекты, приводящие к дополнительным потерям напора и резкой деформации пьезометрической поверхности фильтрационного потока вблизи торцов трубки [87].

Указанные явления совершенно не изучены, и определение начального градиента напора и проницаемости грунтов производится без учета осложняющих концевых эффектов [12, 21, 25, 102, 118, 128]. В результате у различных исследователей для одних и тех же грунтов величины фильтрационных параметров получаются неодинаковыми. Это вносит неопределенность в методологию опытно-фильтрационных работ и является причиной возникновения множества различных гипотез о начальном градиенте напора и условиях его проявления [128]. Отсюда следует, что задача о поправках на осложняющие граничные эффекты исключительно сложна.

Опираясь на достижения реодинамики и физики движения подземных вод [12, 21, 25, 36, 102], исследуем влияние граничных сопротивлений на устойчивость закона Дарси $V = kI$ и точность определения фильтрационных параметров. Для этого предположим, что на входном торце фильтрационной трубки постоянного сечения и длиной L^* поддерживается постоянный напор H^*, а на выходном торце напор снижается на величины ΔH_1^*, ΔH_2^*, ..., соответствующие установившимся значениям скорости фильтрации V_1, V_2, ... (рис. 4.1, 4.2). Возникающие при этом пьезометрические поверхности, согласно закону Дарси, являются прямыми линиями с уклона-

ми (градиентами напора) $I^*=\Delta H^*/L^*=\mathrm{tg}\beta$, пропорциональными скоростям фильтрации

$$k^*=V/I^*=VL^*/\Delta H^*=\mathrm{const}\neq f(V), \qquad (4.2.1)$$

где k^* — коэффициент фильтрации по Дарси относительно внешнего градиента напора I^*, формирующего движение жидкости по всей трубе, включая и ее торцы. Параметр k^* искажен влиянием граничных сопротивлений и является приборным (или кажущимся по В. Н. Щелкачеву) значением коэффициента фильтрации.

При наличии закона (4.2.1) пьезометрические поверхности исходят из одной и той же точки (контура питания) $R_0(L^*, 0)$,

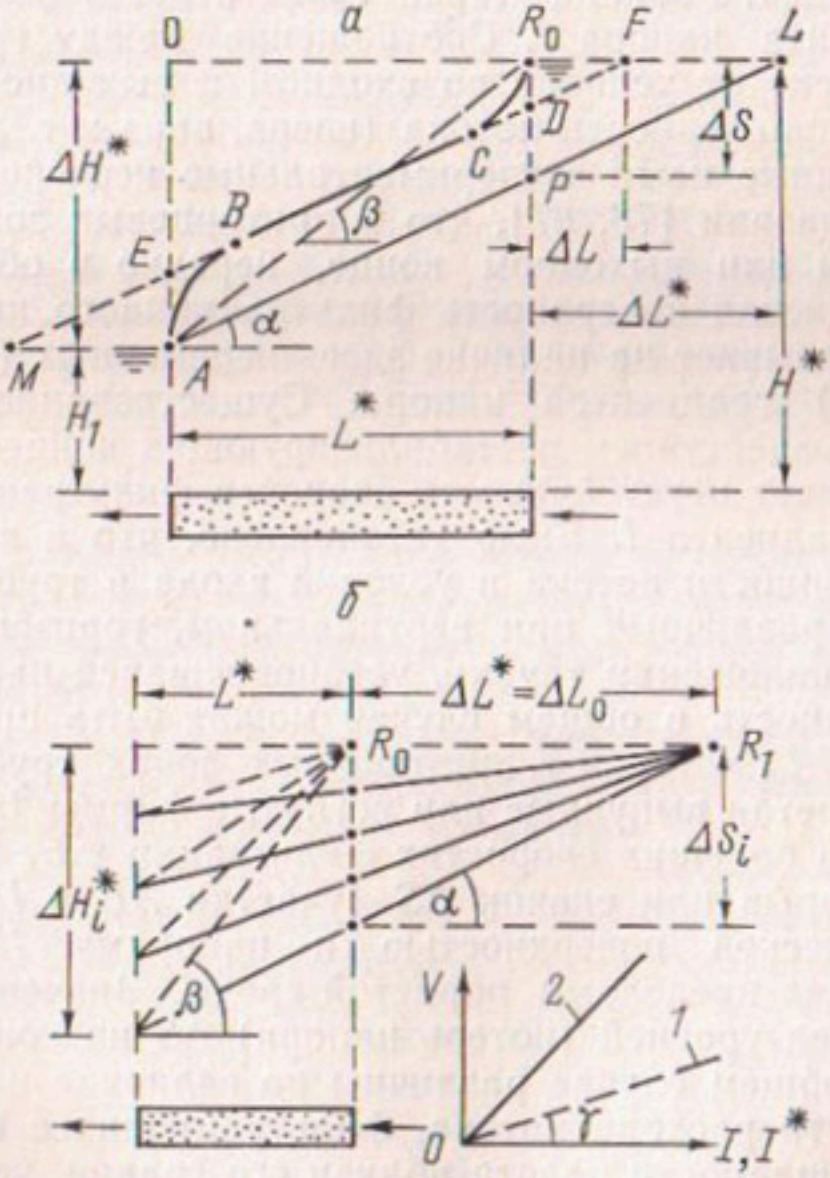


Рис. 4.2. Схема к расчету внутреннего ($I=\mathrm{tg}\alpha$) и внешнего ($I^*=\mathrm{tg}\beta$) градиентов давления при движении ньютоновских и аномальных жидкостей в приборе Дарси (*а*) и изображение устойчивых граничных условий R_0 и R_1 и соответствующих им законов Дарси (*б*): *1* — $V=f(I^*)$; *2* — $V=f(I)$

а потери напора Δh^* в любом сечении потока $x = \text{const}$ пропорциональны V: $\Delta h^* = c^* V$ или $\Delta H^* = cV$, где $c^* = (L^* - x)/k^*$, $c = L^*/k^*$ — константы. Это говорит о том, что графики $\Delta h^* = f(V)$ образуют веер прямых, исходящих из начала координат.

Границу области потока, состоящую из точек $R_0(L^*, 0)$, будем называть совершенным и устойчивым контуром питания. На физических моделях и в натурных условиях такие границы встречаются крайне редко, поскольку реальные контуры питания, как правило, несовершенны по характеру или степени вскрытия пласта и характеризуются неустойчивостью координат при изменении интенсивности и продолжительности возмущения пласта [68]. Выясним закономерности проявления этой неустойчивости в пермеаметре и оценим ее влияние на поведение закона Дарси $V = kI$ относительно внутреннего градиента напора I. Соотношение между градиентами I^* и I зависит от условий во входном и выходном сечениях трубы и направленности потока (вверх, вниз и т. д.).

Проведенные нами экспериментальные исследования этих явлений показали [73, 87], что в приторцевых зонах трубки (во входном или выходном конце, нередко в обоих сразу) пьезометрическая поверхность фильтрационного потока изгибается и указывает на наличие здесь переменных (вдоль пути фильтрации) градиентов напора. Существование этих зон связано с воздействием дестабилизирующих концевых эффектов и вызывает неустойчивость скорости фильтрации V относительно градиента I. Было установлено, что в зависимости от направленности потока и условий входа в трубку и выхода из нее, различных при вертикальном, горизонтальном и наклонном положении трубки, установившаяся пьезометрическая поверхность в общем случае может быть представлена кривой $ABCR_0$, которая в приторцевых зонах трубки изгибается, приобретая выпуклые или вогнутые формы (участки AB и CR_0). При больших скоростях фильтрации этот изгиб переходит в разрыв или скачок ΔS (участки AE и DR_0) между пьезометрической поверхностью и напорами H_1 и $H^* = H_1 + \Delta H^*$ за пределами пористой среды. Значения указанных разрывов уровней (потерь напора) ΔS на контурах $x = 0$ и $x = L^*$ в общем случае различны по величине и зависят от интенсивности расхода потока, фильтрационного сопротивления и проницаемости пласта вблизи его границ, устойчивости контура питания $R_0(L^*, 0)$ и расстояния L^* до этого контура. С помощью величин ΔS производится оценка обобщенных фильтрационных сопротивлений, возникающих на границах области фильтрации [60, 73, 77, 128].

В центральной части фильтрационной трубки пьезометрическая кривая $ABCR_0$ имеет прямолинейный участок BC с постоянным уклоном $I=\operatorname{tg}\alpha$, что говорит о сохранении здесь линейного закона фильтрации. Чтобы установить вид этого закона, величину коэффициента фильтрации по Дарси $k=V/I$ будем рассчитывать с использованием уклона I прямой BC. Тогда положение пьезометрической поверхности за пределами участка BC, прогнозируемое по значениям k, будет соответствовать прямолинейным отрезкам BEM и CDF, получаемым путем продолжения прямой BC до границ области фильтрации и за их пределы. Пересечение прямой $MEBCDF$ со статическим уровнем H^* дает нам новый (расчетный, или эффективный) контур питания F. Этот контур аналогичен величине формального сдвига берега водоема (контура питания) $R_0(L^*, 0)$ на расстояние ΔL, эквивалентное фильтрационному сопротивлению ложа водоема и равное значению фактора перетекания в этом месте [128].

Для оценки расстояния до контура $F(L^*+\Delta L, 0)$, согласно теории В. М. Шестакова [128], необходимо использовать фактор перетекания, который обычно неизвестен и трудно определим. Чтобы избежать учета этого параметра, из точки $A(0, \Delta H^*)$ проведем прямую APL, параллельную пьезометрической поверхности BC. Тогда уклон прямой APL будет равен

$$I = V/k = \Delta H^*/(L^* + \Delta L^*) = \operatorname{tg}\alpha, \qquad (4.2.2)$$

где $\Delta L^* = R_0L = 0L - L^*$ — приращение приведенного контура питания $L(L^* + \Delta L^*, 0)$, равное величине формального сдвига действительного контура питания $R_0(L^*, 0)$ при использовании поверхности APL.

Из точки $R_0(L^*, 0)$ проведем перпендикуляр на прямую APL. Учитывая длину этого перпендикуляра, выраженную через отрезок $AR_0 = \Delta H^*/\sin\beta$, определим

$$\Delta L^* = \Delta H^* \frac{\sin(\beta-\alpha)}{\sin\alpha\sin\beta} = \Delta H^* \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{I^*}\right). \qquad (4.2.3)$$

Поскольку $R_0L = \Delta L^*$, $R_0F = \Delta L$, $MA = FL$, $AE = \Delta S_c$ и $DR_0 = \Delta S_п$, то из треугольников AME и DR_0F находим: $\Delta L^* - \Delta L = \Delta S_c \operatorname{ctg}\alpha$ и $\Delta L = \Delta S_п \operatorname{ctg}\alpha$. Отсюда имеем

$$\Delta L^* = (\Delta S_c + \Delta S_п)/I = \Delta S/I. \qquad (4.2.3а)$$

Пользуясь выражениями (4.2.1) и (4.2.2), определим соотношение между параметрами k и ΔL^*:

$$k = V/I = k^*(1 + \Delta L^*/L^*). \qquad (4.2.4)$$

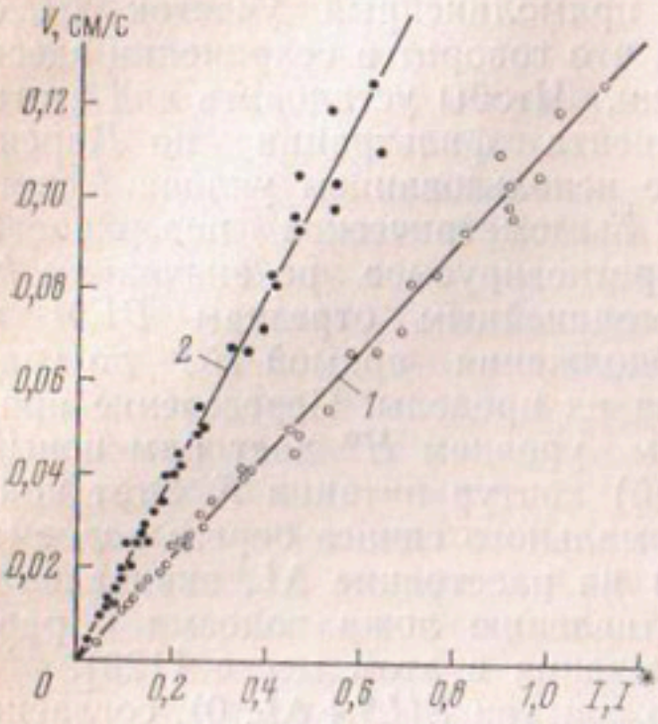


Рис. 4.3. Кривые $V=f(I^*, I)$ при вертикальном расположении фильтрационной трубки и движении воды сверху вниз (граничные условия R_1): 1 — $V=0{,}001125\,I^*$, м/с; 2 — $V=0{,}001985\,I$, м/с

Из (4.2.3а) и (4.2.4) следует, что характер изменения величины коэффициента фильтрации k зависит прежде всего от устойчивости приращения контура питания ΔL^* и определяется закономерностями изменения граничных потерь напора ΔS_c и $\Delta S_п$. Это значит, что величина ΔL^* является интегральной характеристикой граничных сопротивлений прибора (пласта), эквивалентных суммарным потерям напора $\Delta S=\Delta S_c+\Delta S_п$ на входе в пористую среду ($\Delta S_п$) и на выходе из нее (ΔS_c). На этом основании приращение ΔL^* можно считать критерием устойчивости закона Дарси (4.2.2) относительно градиента I.

Практика опытно-фильтрационных работ показывает, что граничные сопротивления на физических моделях и в пластовых условиях могут изменяться по различным законам. Нередки случаи, когда в пермеаметрах потери напора ΔS возрастают линейно с увеличением градиента I (рис. 4.2, *б*). В этом случае пьезометрические поверхности APL пересекаются в одной и той же точке $R_1(L^*+\Delta L_0, 0)$ и имеют место соотношения

$$R_1(L^*+\Delta L_0,\ 0)\rightarrow\left\{\begin{array}{l}\Delta S=\Delta S_i=\Delta L_0 I,\\ \Delta L^*=\Delta L_0=\text{const.}\end{array}\right\} \qquad (4.2.5)$$

При граничных условиях (4.2.5) формула (4.2.4) принимает вид

$$V=k^*(1+\Delta L_0/L^*)\,I=(k^*+\Delta k^*)\,I=kI, \qquad (4.2.6)$$

где $\Delta k^*=k^*\Delta I^*$—отклонение истинной величины коэффициента фильтрации k от его приборного значения k^*;

$$\Delta I^*=\Delta L^*/L^*=\Delta L_0/L^*=\text{const.} \qquad (4.2.7)$$

Поправка Δk^* принимает различные значения для различных грунтов и в различных пермеаметрах. На рис. 4.3 приведены результаты определения k^* и k для фракции песка диаметром 0,0005—0,001 м на фильтрационной трубке длиной $L^*=1$ м и сечением 0,01 м² [73]. Опыты показали, что при граничных условиях (4.2.5) величины истинной и приборной водопроницаемости имеют различные постоянные значения, удовлетворяющие графикам соответственно $V=kI$ и $V=k^*I^*$: $k=0{,}001985$ м/с; $k^*=0{,}001125$ м/с; $\Delta I^*=0{,}7644$; $\Delta L^*=0{,}7644\ L^*$; $\Delta k^*=0{,}00086$ м/с. Отсюда следует, что фильтрационные трубки должны иметь соответствующие длины L^*, позволяющие устанавливать ряд пьезометров или датчиков давления (манометров) вдоль пути фильтрации для измерения уклона I.

Большой интерес представляет случай, когда пьезометрические поверхности APL пересекаются в неподвижной точке $R_2(L^*, \Delta S_0)$, расположенной на границе пористой среды (рис. 4.4, *а*). В этом случае, как показывает выражение (4.2.3а), граничные условия имеют вид

$$R_2(L^*,\ \Delta S_0)\to\left\{\begin{array}{l}\Delta S=\Delta S_0=\text{const},\\ \Delta L^*=\Delta L_i^*=\Delta S_0/I.\end{array}\right\} \qquad (4.2.8)$$

Подставляя (4.2.8) в (4.2.4), получаем зависимость

$$k=k_i=V/I=k^*(1+I_0/I), \qquad (4.2.9)$$

характеризующую изменение величины коэффициента фильтрации по Дарси k_i при существовании начального градиента напора I_0. Здесь

$$I_0=\Delta S_0/L^*=I^*-I=\text{const}, \qquad (4.2.10)$$

поскольку, согласно рис. 4.2, *а* и формулам (4.2.1) и (4.2.2),

$$I=\Delta S_0/\Delta L^*=(\Delta H^*-\Delta S_0)/L^*=I^*-\Delta S_0/L^*. \qquad (4.2.11)$$

Зависимость (4.2.9) показывает, что значения k_i при увеличении скорости фильтрации асимптотически стремятся к постоянной величине k^*. Графики функции $k_i=f(I)$ для различных значений I_0 приведены в работе [73].

При замене знака + на знак — перед слагаемым I_0/I зависимость (4.2.9) становится идентичной известной формуле В. А. Флорина, в которой параметр I_0 является физической характеристикой грунта, т. е. представляет собой истинную или действительную величину начального градиента напора [123].

Умножая (4.2.9) на I, приходим к выводу, что если движение ньютоновской жидкости относительно внешнего градиента I^* подчиняется закону Дарси (4.2.1), то относительно внутреннего градиента напора I движение этой жидкости при граничных условиях (4.2.8) характеризуется уже другим законом линейной фильтрации — обобщенным законом Дарси

$$V = k^*(I + I_0), \qquad (4.2.12)$$

где I_0 — отрезок оси градиентов, отсекаемый продолжением прямолинейного участка графика $V=f(I)$.

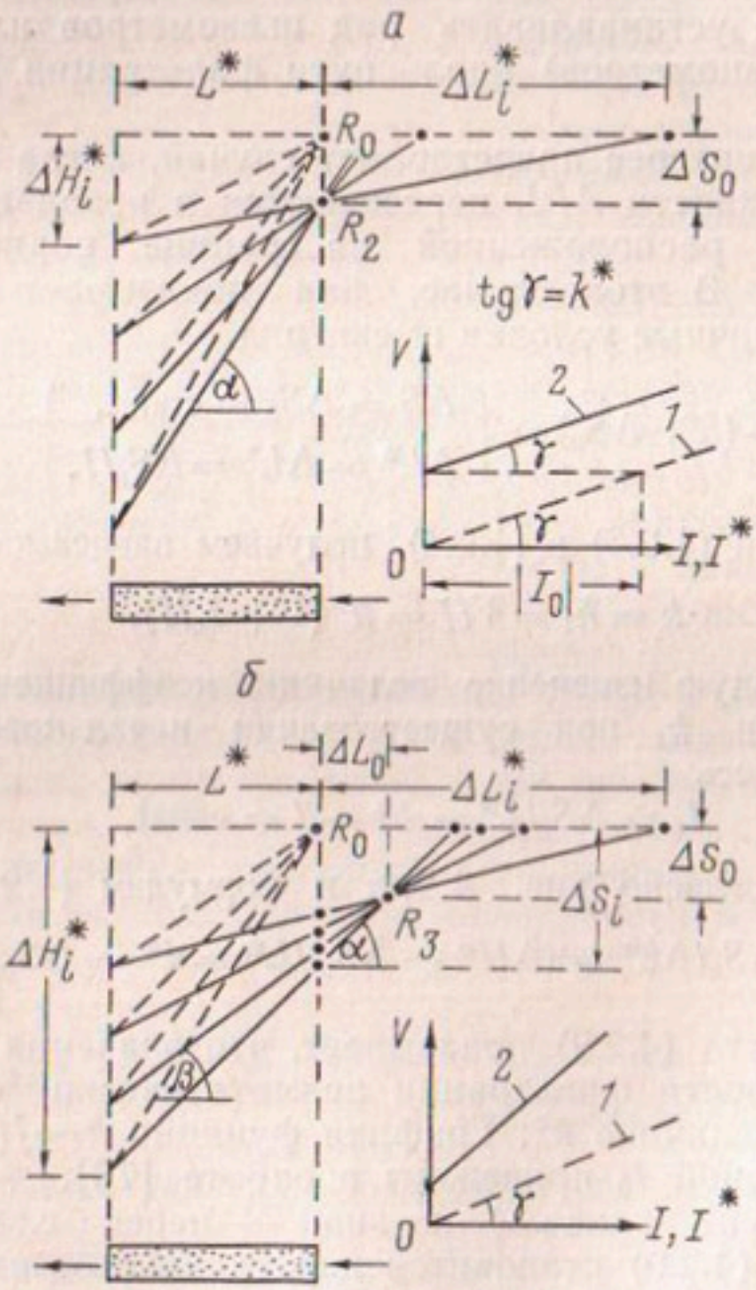


Рис. 4.4. Изображение устойчивых граничных условий R_0 и R_2 и соответствующих им кривых (*а*); то же для граничных условий R_0 и R_3 (*б*): $1 - V = f(I^*)$; $2 - V = f(I)$

Угловые коэффициенты прямых (4.2.1) и (4.2.12) одинаковы и равны k^*. Это говорит о том, что прямые $V=f(I^*)$ и $V=f(I)$, подчиняющиеся зависимости (4.2.1) и (4.2.12), параллельны друг другу и сдвинуты по оси градиентов на величину $\pm I_0$ (рис. 4.4, *а*). При этом, однако, нельзя отождествлять значения k^* в (4.2.1) и (4.2.12). Если в (4.2.1) $k^*=V/I^*$, то в (4.2.12) $k^*=(V_2-V_1)/(I_2-I_1)=V/(I+I_0)$. Отсюда следует, что при наличии обобщенного закона Дарси для оценки «коэффициента фильтрации» в натурных условиях необходимо производить не менее двух откачек из одной и той же скважины. Только в этом случае мы будем иметь не менее двух значений I и V в каждой точке пласта и, таким образом, создадим условия для определения водопроницаемости по формулам, основанным на линейных законах типа (4.2.12) [73, 82].

Естественным обобщением граничных условий (4.2.5) и (4.2.8) будут условия, когда наблюдается закономерное изменение как приращения ΔL^*, так и суммарных потерь напора ΔS. В этом случае пьезометрические поверхности APL пересекаются в неподвижной точке $R_3(L^*+\Delta L_0, \Delta S_0)$. С учетом координат этой точки уклон реальной пьезометрической поверхности определяется выражением (рис. 4.4, *б*)

$$I=\frac{\Delta S-\Delta S_0}{\Delta L_0}=\frac{\Delta S_0}{\Delta L^*-\Delta L_0}=\frac{\Delta H^*-\Delta S_0}{L^*+\Delta L_0}. \quad (4.2.13)$$

Из (4.2.13) находим, что при возникновении точки R_3 граничные условия потока принимают вид

$$R_3(L^*+\Delta L_0,\ \Delta S_0)\rightarrow\left\{\begin{array}{l}\Delta S=\Delta S_i=\Delta S_0+\Delta L_0 I,\\ \Delta L^*=\Delta L_i^*=\Delta L_0+\Delta S_0/I.\end{array}\right\} \quad (4.2.14)$$

Подставив в (4.2.4) вместо ΔL^* его значение из (4.2.14) и умножив полученную функцию

$$k_i=V/I=k(1+I_{01}/I)=f(I) \quad (4.2.15)$$

на I, придем к выводу, что при граничных условиях (4.2.14) движение ньютоновской жидкости относительно внутреннего градиента напора I также подчиняется обобщенному закону Дарси

$$V=k(I+I_{01}), \quad (4.2.16)$$

но характеризуется при этом другими величинами углового коэффициента k и начального отрезка I_{01} на оси градиентов прямой $V=f(I)$ (рис. 4.4, *б*). Здесь

$$k = k^*(1 + \Delta I^*) = \text{const}, \tag{4.2.17}$$

$$I_{01} = \Delta S_0/(L^* + \Delta L_0) = \text{const}. \tag{4.2.18}$$

В приборах Дарси нередко возникают граничные условия R_{-3}, представляющие собой зеркальное отражение граничных условий R_3 в горизонтальной плоскости $\Delta H^* = \Delta S = 0$. При условиях R_{-3} пьезометрические поверхности APL пересекаются в неподвижной точке $R_{-3}(L^* + \Delta L_0, -\Delta S_0)$, сохраняющей свое положение (устойчивость) при изменении скорости фильтрации V. В этом случае на торцах пермеаметра формируются условия

$$R_{-3}(L^* + \Delta L_0, -\Delta S_0) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Delta S = \Delta S_i = -\Delta S_i + \Delta L_0 I, \\ \Delta L^* = \Delta L_i^* = \Delta L_0 - \Delta S_0/I \end{array} \right\} \tag{4.2.14а}$$

и формула (4.2.16) принимает вид

$$V = k(I - I_{01}). \tag{4.2.16а}$$

Обнаруженное явление неустойчивости скорости фильтрации V относительно внутреннего градиента напора I, вызываемое закономерностями изменения граничных сопротивлений, будем называть эффектом неустойчивости фильтрационного потока [87]. Данный эффект приводит к тому, что в зависимости от вида устойчивых граничных условий на торцах пермеаметра в одной и той же пористой среде прямые $V = f(I)$ могут иметь два различных значения углового коэффициента (k^*, k) и четыре различных значения начального отрезка на оси градиентов (0, I_0, $+I_{01}$, $-I_{01}$). Это значит, что для одного и того же грунта и для одной и той же ньютоновской жидкости в приборах Дарси можно получать два различных значения коэффициента фильтрации и четыре различных значения (в том числе и нулевое) начального градиента напора. Иначе говоря, эффект неустойчивости проявляется в перемещении графика $V = f(I)$ по полю $V—I$ таким образом, что каждому виду устойчивых граничных условий R_1, R_2 или $R_{\pm 3}$ соответствует одно единственное положение прямой $V = f(I)$, характеризующейся своими величинами углового коэффициента и начального отрезка на оси градиентов. Изменение вида граничных условий тут же приводит к соответствующему перемещению графика $V = f(I)$. Отсюда следует, что с позиций обнаруженного эффекта наличие противоположных (как позитивных — для условий R_2 и $R_{\pm 3}$, так и негативных — для условий R_0 и R_1) выводов о существовании начального градиента

напора и его величинах [12, 36, 109, 128] вполне закономерно и объяснимо.

В рассмотренных опытах движение жидкости относительно внешнего градиента напора I^* подчинялось закону Дарси (4.2.1) и, таким образом, изучались условия проявления нелинейных эффектов относительно градиента напора I при фильтрации ньютоновских жидкостей. Теперь исследуем влияние эффекта неустойчивости на поведение аномальных или неньютоновских жидкостей, движение которых, начиная с некоторого внешнего градиента напора, подчиняется обобщенному закону Дарси [7, 36, 102, 109, 118, 123, 128]

$$V = k_0^*(I^* - I_0^*), \tag{4.2.19}$$

где I_0^* — отрезок оси I^*, отсекаемый продолжением прямолинейного участка графика $V = f(I^*)$; k_0^* — угловой коэффициент этого графика.

Пользуясь значениями I и V, определяемыми формулами (4.2.2) и (4.2.19), найдем [87]

$$k_i = \frac{V}{I} = k_0^*\left[1 + \frac{\Delta L^*}{L^*} - I_0^*\left(\frac{1}{I^*} + \frac{\Delta L^*}{\Delta H^*}\right)\right]$$

или, учитывая величину $\Delta L^*/\Delta H^*$ из (4.2.3),

$$k_i = k_0^*[1 + (\Delta L^*/L^*) - (I_0^*/I)]. \tag{4.2.20}$$

Подставляя в (4.2.20) значения ΔL^* из граничных условий R_1, R_2 и R_3, получаем соответствующие закономерности $k_i = f(I)$. Умножив эти закономерности на I, перейдем к графикам $V = f(I)$. Таким методом легко доказать, что при граничных условиях R_1, R_2 и R_3 движение неньютоновской жидкости (4.2.19) сохраняет свойства неньютоновского движения, но подчиняется при этом новым линейным законам:

$$R_1(L^* + \Delta L^*,\ 0) \to V = k_{02}(I - I_{02}); \tag{4.2.21}$$

$$R_2(L^*,\ \Delta S_0) \to V = k_0^*(I + I_{03}); \tag{4.2.22}$$

$$R_3(L^* + \Delta L_0,\ \Delta S_0) \to V = k_{02}(I + I_{04}), \tag{4.2.23}$$

каждый из которых характеризуется своим постоянным значением углового коэффициента и начального градиента напора:

$$\begin{gathered} k_{02} = k_0^*(1 + \Delta I^*);\quad I_{02} = I_0^*/(1 + \Delta I^*); \\ I_{03} = \Delta S_0/L^* - I_0^* = I_0 - I_0^*; \\ I_{04} = (\Delta S_0/L^* - I_0^*)/(1 + \Delta I^*) = I_{03}/(1 + \Delta I^*). \end{gathered} \tag{4.2.24}$$

При условиях R_{-3} установившаяся фильтрация неньютоновской жидкости (4.2.19) относительно градиента I подчиняется закону

$$R_{-3}(L^* + \Delta L_0, -\Delta S_0) \to V = k_{02}(I - I_{03}), \qquad (4.2.25)$$

где

$$I_{03} = [(\Delta S_0/L^*) + I_0^*]/(1 + \Delta I^*) = (I_0 + I_0^*)/(1 + \Delta I^*). \qquad (4.2.26)$$

Выражения (4.2.19)—(4.2.26) указывают на ряд удивительных свойств фильтрации неньютоновских жидкостей. Одно из них следует из (4.2.19) и (4.2.22) и состоит в том, что при граничных условиях R_2 движение этих жидкостей относительно градиентов I^* и I характеризуется одной и той же проницаемостью k_0^*, но различными величинами начального градиента напора (соответственно I_0^* и I_{03}). Выше мы видели, что в данных гидродинамических условиях аналогичная метаморфоза происходит и с движением ньютоновских жидкостей (см. формулы (4.2.1) и (4.2.12) и рис. 4.4, *а*).

При граничных условиях R_1 и $R_{\pm 3}$ это свойство проявляется относительно только внутреннего градиента напора I. Действительно, выражения (4.2.21) и (4.2.23) показывают, что графики $V=f(I)$ в обоих случаях параллельны и сдвинуты по оси I на величины

$$\begin{aligned} &(I_0 - 2I_0^*)/(1 + \Delta I^*), \quad \text{если} \quad I_0^* > 0; \\ &I_0/(1 + \Delta I^*), \quad \text{если} \quad I_0^* < 0, \end{aligned} \qquad (4.2.27)$$

зависящие исключительно от осложняющих концевых эффектов, т. е. от длины фильтрационной трубки и дестабилизирующего состояния ее граничных сопротивлений.

Зависимости (4.2.21)—(4.2.25) являются следствием существования эффекта неустойчивости фильтрационного потока неньютоновских жидкостей и, как правило, имели место в экспериментах, выполненных отечественными и зарубежными исследователями для установления структуры реологических уравнений нелинейной фильтрации в капиллярнопористых телах (опыты С. А. Роза, М. П. Воларовича, Н. В. Чураева, Б. В. Дерягина, П. А. Ребиндера, А. Х. Мирзаджанзаде, И. П. Амаглобели, С. В. Нерпина, Н. Ф. Бондаренко, В. М. Павилонского и др.).

Проведенные исследования показывают, что при движении ньютоновских и аномальных жидкостей в фильтрационной трубе следует различать два градиента давления: внутренний

I, характеризующий перераспределение напора за пределами приторцевых зон, где линейность движения не искажается концевыми сопротивлениями, и внешний I^*, формирующий движение жидкости по всей трубе, включая и ее торцы. Из-за влияния граничных сопротивлений между величинами указанных градиентов появляется значительная разница, которая при изменении скорости фильтрации может принимать как постоянные (при условиях R_0 и R_2), так и переменные (при условиях R_1 и $R_{\pm 3}$) значения. В результате возникает неустойчивость движения жидкостей относительно градиента I.

Из выражений (4.2.4) и (4.2.20) следует, что неустойчивость фильтрационного потока не возникает только при $\Delta I^* \to 0$, т. е. в двух случаях: 1) при наличии совершенной разновидности граничных условий 1-го рода $R_0(L^*, 0)$, когда величина потерь напора на входе в трубку $(+\Delta S_{\text{п}})$ равна величине восстановления напора на выходе из трубки $(-\Delta S_{\text{с}})$, а суммарные потери напора $\Delta S = 0$ (рис. 4.1) и 2) в приборах (пластах) бесконечно большой протяженности $(L^* \to \infty)$. Очевидно, в обоих случаях имеют место пределы: $I \to I^*$; $(I_0, I_{01}) \to 0$; $(I_{02}, I_{03}, I_{04}, I_{05}) \to I_0^*$; $k \to k^*$; $k_{02} \to k_0^*$. К примеру, в опытах, представленных на рис. 4.3, влияние фильтрационных сопротивлений, возникающих на торцах пермеаметра, практически не ощущалось бы при длине трубки $L^* \geqslant 500$ м, так как в

Таблица 4.1

Влияние внутренних граничных условий на поведение законов линейной фильтрации ньютоновской и аномальной жидкостей в приборах Дарси

Закон фильтрации относительно градиента I^*	Относительно градиента I			
	Внутренние граничные условия	Закон фильтрации	Проницаемость	Начальный градиент напора
$V = k^* I^*$	R_0	$V = k^* I$	k^*	—
	R_1	$V = kI$	k	—
	R_2	$V = k^*(I + I_0)$	k^*	$-I_0$
	R_3	$V = k(I + I_{01})$	k	$-I_{01}$
	R_{-3}	$V = k(I - I_{01})$	k	$+I_{01}$
$V = k_0^*(I^* - I_0^*)$	R_0	$V = k_0^*(I - I_0^*)$	k_0^*	$+I_0^*$
	R_1	$V = k_{02}(I - I_{02})$	k_{02}	$+I_{02}$
	R_2	$V = k_0^*(I + I_{03})$	k_0^*	$-I_{03}$
	R_3	$V = k_{02}(I + I_{04})$	k_{02}	$-I_{04}$
	R_{-3}	$V = k_{02}(I - I_{05})$	k_{02}	$+I_{05}$

этом случае имели бы $\Delta I^* \leqslant 0{,}0015$ и $I \approx I^*$. Отсюда следует, что фильтрационные параметры, получаемые в приборах Дарси, всегда подвержены воздействию эффекта неустойчивости. Это приводит к тому, что в одной и той же пористой среде в зависимости от условий на торцах пермеаметра в поле $V—I$ график $V=f(I)$ становится неустойчивым и перемещается, приобретая различные начальные отрезки и угловые коэффициенты. Из табл. 4.1 видно, что как для ньютоновских, так и для аномальных жидкостей таких положений графика $V=f(I)$ может быть не более пяти, поскольку существует только пять видов устойчивых граничных условий 1-го рода: R_0, R_1, R_2, $R_{\pm 3}$. Очевидно, при возникновении неустойчивости закона Дарси относительно внешнего градиента напора I^* установленные зависимости будут накладываться друг на друга и процесс примет более сложный характер [87].

Возникновение рассмотренных разновидностей устойчивых граничных условий 1-го рода связано с различными закономерностями формирования гидродинамических сил и фильтрационных сопротивлений на торцах пермеаметра при движении жидкости сверху вниз, снизу вверх, в горизонтальном и других направлениях. Это значит, что неустойчивость линейной фильтрации в приборах Дарси — следствие существования дестабилизирующих граничных сопротивлений и закона направленности фильтрационного потока [21]. Интенсивность и характер ее проявления существенно зависят также от вида грунта и степени взаимодействия гидродинамических условий во входном и выходном сечениях конечной трубы. Опыты подтверждают эти выводы и показывают, что при движении потока сверху вниз (нисходящая фильтрация) одна и та же скорость фильтрации достигается при меньших градиентах напора, нежели при движении жидкости снизу вверх (восходящая фильтрация). В результате графики $V=f(I)$ для потоков сверху вниз располагаются круче и выше аналогичных графиков для других направлений потока.

В литературе имеется множество графиков зависимости коэффициента фильтрации по Дарси k_i от градиента напора I при устойчивых граничных условиях [12, 21, 102]. Все графики подчиняются обобщенным уравнениям (4.2.4) или (4.2.20) и тем самым подтверждают их достоверность. На этом основании зависимости $k_i=f(I)$ можно использовать в качестве признака существования эффекта неустойчивости.

В натурных условиях неподвижные и устойчивые контуры питания встречаются крайне редко [68, 121]. Поэтому при изменении интенсивности и продолжительности возмущения

пласта функция $k_i=f(I)$ может принимать как закономерный (при устойчивых граничных условиях), так и случайный (при неустойчивом питании пласта) характер. В первом случае графики $k_i=f(I)$ аппроксимируются формулами (4.2.4) и (4.2.20), а также линейными или экспоненциальными зависимостями. Это говорит о том, что в натурных условиях эффект неустойчивости проявляется по-разному в зависимости от состояния и характера изменения граничных условий в процессе эксплуатации пласта. Отсюда следует, что установление рода граничных условий водонефтяных пластов и изучение закономерностей проявления эффекта неустойчивости в натурных условиях должно стать первостепенной задачей подземной гидродинамики.

Необходимо оговорить, что приведенные выводы о влиянии граничных условий на неустойчивость фильтрационного потока справедливы и для случаев, когда геометрия порового пространства, действующие силы и реологические свойства жидкости изменяются в ходе опыта. Однако в этих случаях интенсивность проявления эффекта неустойчивости фильтрационного потока может усиливаться или ослабляться в зависимости от направленности изменения указанных факторов. Влияние последних на неустойчивость фильтрационного потока наиболее полно исследовано Н. Ф. Бондаренко [12].

§ 4.3. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДСТИЛАЮЩИХ ПЕСКОВ ПОЛЕСЬЯ

В условиях Полесья, где водоносные горизонты четвертичной и меловой толщ гидравлически взаимосвязаны, вопрос о неустойчивости расчетных значений гидрогеологических параметров при изменении интенсивности дренирования безнапорных пластов имеет принципиальное значение [85]. Поэтому обобщим результаты исследований влияния дебита откачек на устойчивость расчетных значений коэффициента фильтрации подстилающих песчаных отложений Белорусского Полесья. На существование такого влияния указывали прежде всего теоретические исследования, а также многолетние наблюдения за работой водозаборов подземных вод и осушительным действием водопонижающих и дренажных скважин.

Ввиду принципиального значения этого вывода для дальнейшего развития теории фильтрационных расчетов вертикального дренажа было проанализировано более 400 опытных

откачек, выполненных при проведении комплексных гидрогеологических съемок масштаба 1 : 50000 и 1 : 100000 на водосборах Бобрика, Ясельды, Щары и др. Анализ производился дифференцированно для песков крупно-, средне- и мелкозернистых, подстилающих торфяники, с целью выяснения характера зависимости коэффициента фильтрации k, рассчитанного по данным откачек из этих отложений, от величины дебита Q и удельного дебита скважины $q_c = Q/S_c$, где S_c — установившееся понижение уровня внутри опытной скважины. Для примера на рис. 4.5 приведены характерные графики функций $k=f(q_c)$ и $k=f(Q)$, построенные по данным 69 опытных откачек из мелкозернистых песков, подстилающих болотные образования междуречья Днепра и Припяти (водосборы Брагинки и Вити). Откачки проводились из несовершенных скважин глубиной 10—15 м, оборудованных сетчатыми фильтрами диаметром 89 мм и длиной 1,7—2,2 м. Фильтры устанавливались под УГВ в интервале глубин от 4 до 11 м. Значения k рассчитывались по формулам Н. К. Гиринского и В. Д. Бабушкина. Площадь съемки 5046 км².

Аналогичные закономерности для функций $k=f(q_c, Q)$ получены при обработке данных опытных откачек и по остальным водосборам (рис. 4.6). Это говорит о том, что в зоне Полесья расчетные значения коэффициента фильтрации подстилающих песков с увеличением интенсивности возмущения безнапорного пласта возрастают по линейной зависимости [85]. Учитывая эти данные, а также результаты других опытов, можем записать

$$k_Q = k_0 + cQ, \qquad (4.3.1)$$

где k_0, c — аппроксимационные константы графика $k=f(Q)$.

Опытные откачки при гидрогеологических съемках выполнены при небольших значениях дебита скважин и, естественно, не характерны для эксплуатационных режимов работы дренажных скважин. Поэтому важно установить закономерности изменения гидрогеологических параметров при работе вертикального дренажа. С этой целью приведем результаты опытных кустовых откачек из грунтовых скважин опытно-производственного участка вертикального дренажа, расположенного в центральной части Полесья на территории Полесской опытно-мелиоративной станции (низовье Бобрика).

На опытном участке принята площадная система размещения дренажных скважин, позволяющая исследовать их работу в различных сочетаниях, достаточно изученных в подземной гидродинамике. Эта система представляет собой большой

квадрат со сторонами в 1 км (скв. 4, 7, 10, 11), малый квадрат со сторонами в 0,5 км (скв. 2, 8, 9, 12), равносторонние треугольники и т. д. [100, 101].

Для наблюдения за УГВ проложено 12 створов, оборудованных 130 наблюдательными скважинами. Глубина дренажных скважин составляет 30—35 м. Оборудованы скважины проволочными и щелевыми фильтрами диаметром 12—14 дюймов и длиной 20—25 м. По всей длине фильтров создана устойчивая гравийная обсыпка. Скважины обладают в большинстве случаев высокими удельными дебитами (~10—17 м³/ч на 1 м понижения). При снижении уровня в дренажных скважинах на 6—9 м их дебиты достигают 140—175 м³/ч.

Поверхность участка характеризуется обилием микропо-

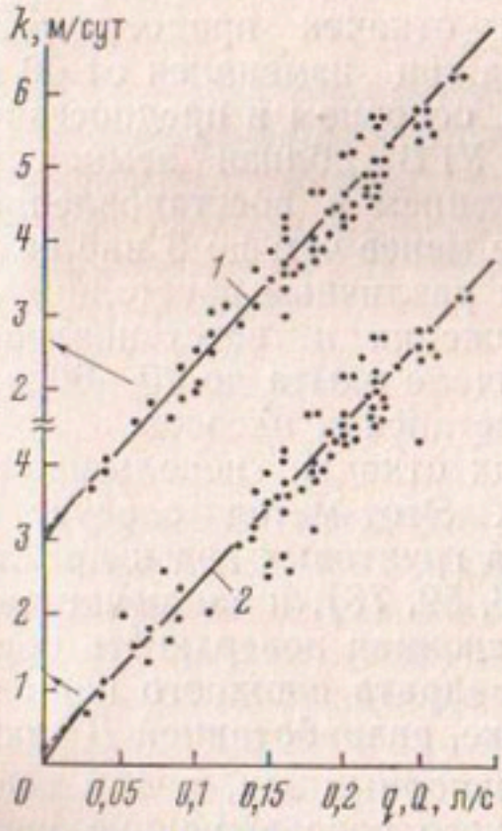


Рис. 4.5. Влияние дебита Q и удельного дебита q_c скважин на изменение расчетной величины коэффициента фильтрации мелкозернистых песков междуречья Днепра и Припяти: *1* — $k=f(q_c)$; *2* — $k=f(Q)$

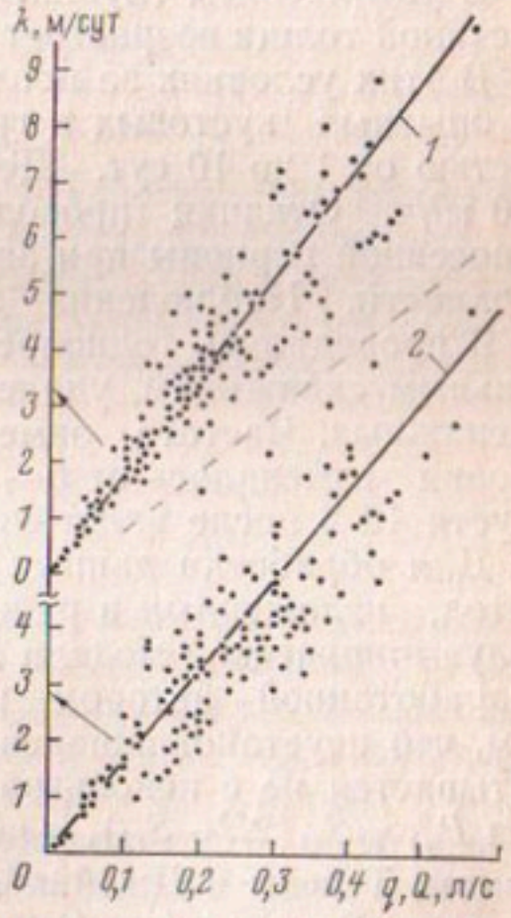


Рис. 4.6. Характер взаимосвязи между дебитом и удельным дебитом скважин и величиной коэффициента фильтрации мелкозернистых песков междуречья Цны и Лани (по данным 129 опытных и пробных откачек из скважин глубиной 10—15 м): *1* — $k=f(q_c)$; *2* — $k=f(Q)$

нижений и представляет собой низинное болото с мелкозалежным торфяником глубиной 0,2—0,8 м. Торф тростниково-осоковый, со степенью разложения 20—25%, подстилается мелко- и среднезернистыми песками мощностью 50—53 м. В подстилающей толще песков имеется несколько прослоев и линз глины мощностью от 1 до 5 м и более. Коэффициенты фильтрации этих песков, рассчитанные по их гранулометрическому составу с использованием эмпирических формул А. Хазена (k_X) и И. И. Зауербрея ($k_З$), в интервале глубин 1—20 м составляют 8—15 м/сут и связаны между собой соотношением

$$k_X = 1{,}3k_З. \tag{4.3.2}$$

Результатам опытных кустовых откачек более соответствуют значения k_X.

С увеличением глубины от 22 до 29 м водопроницаемость песчаной толщи возрастает до 30—45 м/сут и более.

В этих условиях за последние 5 лет было выполнено более 80 опытных кустовых и групповых откачек продолжительностью от 1 до 10 сут. Дебит скважин изменялся от 40 до 210 м³/ч. Откачки проводились в основном в предпосевной и посевной периоды при залегании УГВ вблизи земной поверхности. Наблюдения за снижением и восстановлением УГВ проводились одновременно не менее чем по 5 наблюдательным скважинам, удаленным на различные расстояния от дренажных. Частота замеров снижения и восстановления уровня изменялась от 5—10 с в начале опыта до 30—60 мин спустя 10 ч после включения или остановки насосов.

Для обработки данных опытных откачек использовался метод, изложенный в работе [62]. Этот метод следует из полуэмпирической модели движения грунтовых вод к дренам, разработанной автором ранее [58, 59, 73], и заключается в том, что неустановившаяся депрессионная поверхность обрабатывается не с использованием квадрата сложного понижения $P_{rt}^2 = S_{rt}(2H - S_{rt})$, а по методике, разработанной Дюпюи, Тимом, Тейсом и Джейкобом для напорных вод, т. е. в координатах S_{rt}—$\lg t$ (графики временного прослеживания уровня) и S_{rt}—$\lg r$ (графики площадного прослеживания уровня). Величина S_{rt} выражается через сложное понижение P_{rt} по формуле

$$S_{rt} = H - \sqrt{H^2 - P_{rt}^2}, \tag{4.3.3}$$

где H — мощность грунтового потока до начала откачки; S_{rt} — приведенное, т. е. отсчитанное от одной абсолютной от-

метки во всех наблюдательных скважинах (точках пласта) r понижение уровня на момент времени t при данном дебите скважины $Q=\text{const}$. Необходимость использования только приведенных значений S_{rt} для обработки результатов опытных кустовых откачек доказана в работе [53].

Исследования показали [62], что графики $P_{rt}^2 = f(\lg t)$ и $S_{rt} = f(\lg t)$ параллельны друг другу и, следовательно, дают одинаковые значения водопроводимости и уровнепроводности. Поэтому и в вычислительном отношении предпочтительнее графики $S_{rt} = f(\lg t)$ и $S_{rt} = f(\lg r)$.

Возможность применения методов напорной фильтрации к изучению движения грунтовых вод следует из гипотезы [58, 59], что это движение в определенных пределах аналогично движению напорных вод и подчиняется линеаризованному уравнению Буссинеска

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial S}{\partial r} = \frac{1}{a}\frac{\partial S}{\partial t}, \qquad (4.3.4)$$

где S — понижение уровня; $a=T/\mu$ — коэффициент уровнепроводности пласта по Буссинеску; μ — упругая водоотдача, или коэффициент емкости (запаса) пласта; $T=kh_{эф}$ — водопроводимость пласта; $h_{эф}=\text{const}$ — эффективная мощность потока.

Уравнение (4.3.4) получается из нелинейного уравнения Буссинеска [128]

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial h^2}{\partial r} = \frac{2\mu}{k}\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (4.3.5)$$

при допущении, что водопроводимость безнапорного потока остается постоянной ($T=kh_{rt}=k(H-S_{rt})=kh_{эф}=\text{const}$), несмотря на изменение его мощности h_{rt} во времени и по площади пласта. Это допущение находится в мнимом противоречии с теорией установившейся безнапорной фильтрации Дюпюи, согласно которой величина водопроводимости потока $T_{rt}=kh_{rt}=f(r, t)$ должна изменяться идентично изменению неустановившегося напора h_{rt}. Действительно, натурные опыты показывают (рис. 1.1, 1.7, 1.8, 1.10, 3.4), что при неустановившейся фильтрации в зоне регулярного режима (например, при пуске скважины с постоянным дебитом) расчетная водопроводимость неустановившегося безнапорного потока остается постоянной ($T=\text{const}$, $T_D=\text{const}$), несмотря на изменение его мощности h_{rt} во времени и по радиусу депрессионной воронки. Это явление, лежащее в основе первого способа линеаризации уравнения (4.3.5), можно назвать эффектом постоянной во-

допроводимости неустановившегося потока грунтовых вод. Существование данного эффекта в неустановившемся гравитационном потоке подтверждается тем, что экспериментальные графики площадного $S_{rt}=f(\lg r)$ и временного $S_{rt}=f(\lg t)$ прослеживания изменения УГВ в зоне регулярного режима образуют семейства параллельных прямых и, таким образом, поток характеризуется постоянными величинами водопроводимости, определяемыми соответственно по формуле Ж. Дюпюи

$$T_D = Q/2\pi i_D = 0{,}366Q/i_D^* \qquad (4.3.6)$$

и формуле Ч. В. Тейса (3.2.6). Здесь i_D и i_D^* — угловые коэффициенты прямых соответственно $S_{rt}=f(\ln r)$ и $S_{rt}=f(\lg r)$; T_D и T — величины водопроводимости пласта соответственно по Дюпюи и Тейсу. В этом случае коэффициент уровнепроводности a рассчитывается с использованием фиксированных значений S_{rt}, i^* по известной формуле (3.2.5).

Применение приведенных формул Ч. В. Тейса и Ж. Дюпюи для описания неустановившейся безнапорной фильтрации правомерно в том случае, если в координатах S_{rt}—$\lg r$ и S_{rt}—$\lg t$ опытные значения S_{rt} аппроксимируются прямыми линиями. Точность этой аппроксимации и определяет точность расчетов фильтрационных параметров по формулам (3.2.5), (3.2.6) и (4.3.6). Следует отметить, что для изучения неустойчивости гидрогеологических параметров и особенностей перераспределения напоров в зоне регулярного режима использовались только опыты, в которых измеренные величины S_{rt} удовлетворяли указанному условию, т. е. в координатах S_{rt}—$\lg r$ и S_{rt}—$\lg t$ образовывали семейства параллельных прямых. Результаты некоторых из них приведены в приложении.

Анализ выполненных опытов показал [76, 82, 85], что расчетные значения T, определенные по графикам временного прослеживания снижения и восстановления УГВ в зоне регулярного режима, с увеличением Q возрастают практически по линейному закону. В частности, при увеличении дебита дренажных скважин от 40 до 150 м³/ч указанные величины T при снижении УГВ возрастают соответственно от 40—50 до 100—130 м²/ч по зависимости (рис. 4.7, 4.8 и 4.9)

$$T_Q = 20{,}0 + (0{,}60 \div 0{,}75)\,Q, \text{ м}^2/\text{ч}. \qquad (4.3.7)$$

Аналогичный вид имеют функции $i^*=f(Q)$, определенные по кривым временного прослеживания восстановления УГВ (рис. 4.10).

Влияние Q на поведение коэффициента уровнепроводности

a носит более сложный характер. Натурные опыты показали, что с ростом Q функция $\lg a_r = f(Q)$ от прямолинейно-возрастающей вблизи дренажной скважины (на расстоянии до 20—40 м) переходит в константу $a_r = 10^4 — 10^5$ м²/ч в удаленных точках депрессионной воронки r (рис. 1.12, 1.13). Эта закономерность наблюдается также и при восстановлении УГВ.

В отличие от рассмотренных параметров коэффициент упругой водоотдачи безнапорного пласта $\mu_r = T/a_r$ с увеличением интенсивности дренирования существенно уменьшается вблизи дренажной скважины (на расстоянии до 30—35 м) и сохраняет свое значение $\mu_r = 0{,}10—0{,}01$ в краевых зонах депрессионной воронки (рис. 4.11).

Увеличение расчетной водопроводимости пласта с возрастанием интенсивности его дренирования следует объяснять не только физикой движения подземных вод в слоистых и

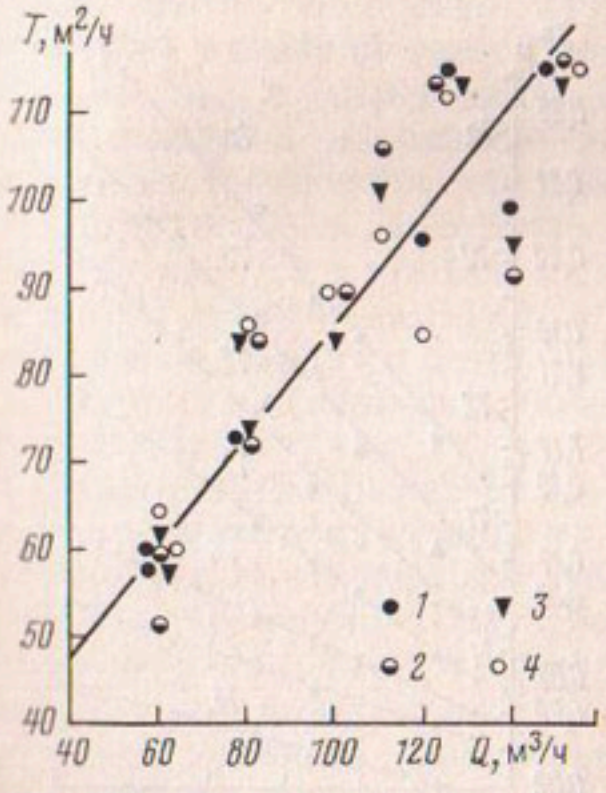


Рис. 4.7. Влияние интенсивности дренирования на устойчивость коэффициента водопроводимости, определенного по кривым временного прослеживания снижения УГВ в наблюдательных скв. 7а (*1*), 30 (*2*), 31 (*3*), 32 (*4*) при пуске дренажной скв. 7 в работу с различными дебитами

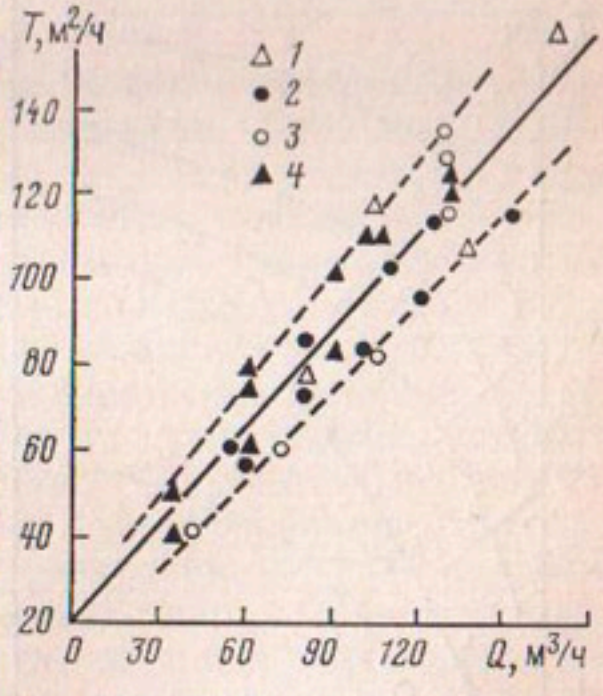


Рис. 4.8. Обобщенный график влияния интенсивности возмущения на устойчивость расчетных значений водопроводимости, определенной по кривым временного прослеживания снижения УГВ при опытных откачках из дренажных скв. 1, 7, 8, 12. Наблюдательные скв. 1а, 72, 73 (*1*), 7а, 30, 31 (*2*), 8а, 36, 37 (*3*), 12а, 92, 93 (*4*)

микронеоднородных средах. Наши опыты показывают, что функции $T=f(Q)$ и $k=f(Q)$ имеют место также из-за неустойчивости режима водного питания пласта (или граничных условий потока в общем случае) при изменении интенсивности и масштабов осушения болотных массивов. Выражения (4.3.1) и (4.3.7) как раз и указывают на то, что радиус влияния депрессионной воронки R, входящий в формулу Ж. Дюпюи, возрастает с увеличением Q по закону [85]

$$R = f(Q) = \exp(A + BQ), \qquad (4.3.8)$$

где A, B — константы, определяемые по данным опытных кустовых откачек.

В противном случае, т. е. при $R=\text{const}\neq f(Q)$, величины проводимости и коэффициента фильтрации, определяемые по формулам Ж. Дюпюи и Ч. В. Тейса, сохраняли бы одно и то же постоянное значение при изменении Q. Наличие деста-

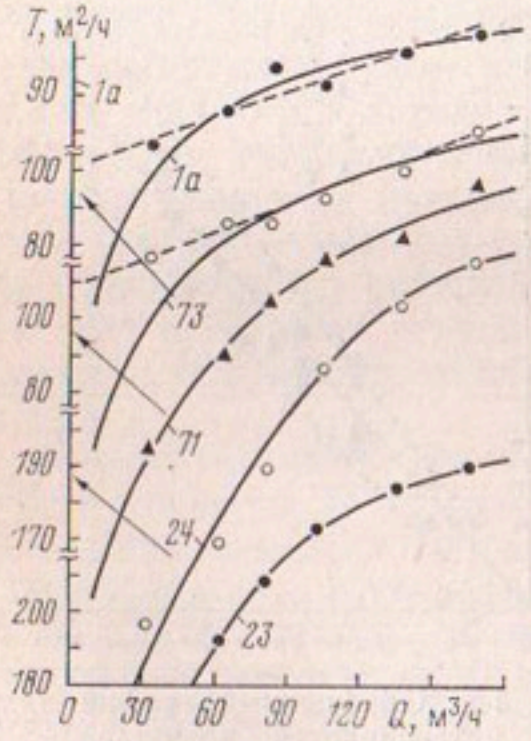


Рис. 4.9. Кривые $T=f(Q)$, построенные по данным восстановления УГВ в наблюдательных скв. 1а, 73, 71, 24, 23 после остановок дренажной скв. 1 (опыты 66—71)

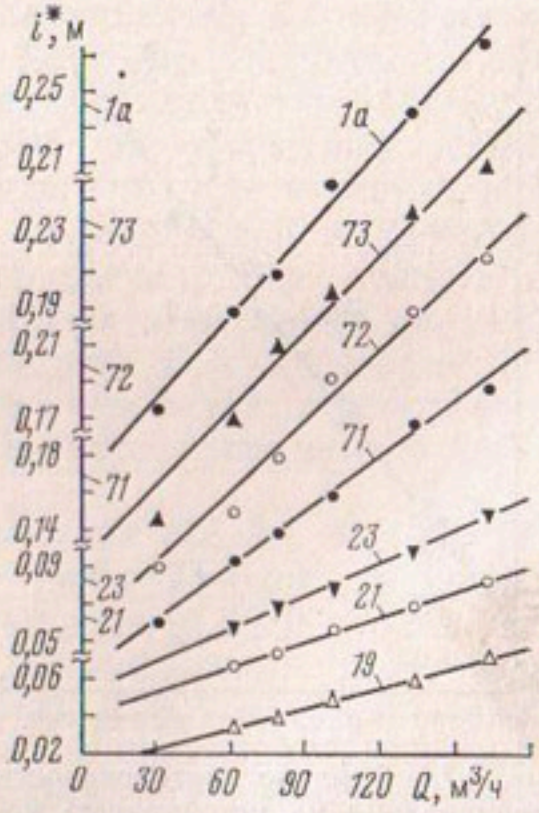


Рис. 4.10. Влияние интенсивности возмущения на характер изменения параметра $i^*=0{,}183\ Q/T$ в наблюдательных скв. 1а, 73, 72, 71, 23, 21, 19 (по данным восстановления УГВ после остановок дренажной скв. 1, опыты 66—71)

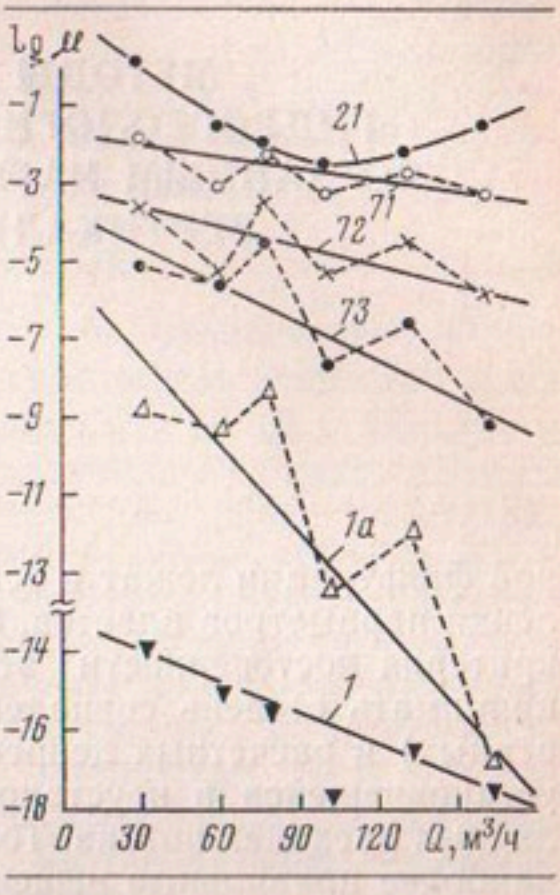


Рис. 4.11. Влияние интенсивности дренирования на устойчивость упругой водоотдачи пласта $\lg\mu=\lg(T/a)$ при снижении УГВ в процессе опытных откачек из дренажной скв. 1. Цифры у кривых означают номера скважин створа А—А

билизирующих граничных сопротивлений и неустойчивости потока подземных вод усложняет этот процесс.

Наряду с отмеченным увеличением радиуса влияния депрессионной воронки R и приращением контура питания ΔL^* при увеличении Q начинают расти мощность (или глубина) активной зоны фильтрации $h_{эф}$ и перетекание из подстилающих и смежных водоносных горизонтов, усиливается инфильтрационный приток из поверхностных водотоков и водоемов. Данные факторы не учитываются в исходных формулах или учитываются в виде констант, не зависимых от интенсивности и масштабов осушения. Это приводит к тому, что расчетные гидрогеологические параметры в неявном виде отражают указанные явления и становятся зависимыми от них. Использование таких параметров в фильтрационных расчетах, основанных на линейной теории движения грунтовых вод, позволяет существенно повысить достоверность проектных решений. Следовательно, при неустойчивых граничных условиях проектирование дренажа целесообразно вести по дифференцированным (или «плавающим») значениям гидрогеологических параметров, соответствующим принятой интенсивности дренирования пласта или водосбора.

Таким образом, при проектировании мелких (до 1000 га), средних (до 5000 га), крупных (до 10—15 тыс. га) и сверхкрупных (более 20 тыс. га) мелиоративных систем исходные гидрогеологические параметры для расчета и моделирования дренажа во многих случаях целесообразно принимать неодинаковыми и переменными исходя из неустойчивости и различной изменяемости режима водного питания осушаемой территории под действием дренажных систем указанных масштабов.

Глава 5

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

Обратные задачи теории линейной фильтрации лежат в основе современных методов определения параметров пластов. Опыты показывают, что в качестве критерия достоверности этих задач и методов необходимо принимать степень совпадения натурных (фактически замеренных) и расчетных депрессионных поверхностей в условиях установившейся и неустановившейся фильтрации и при различных расходах потока. Только таким путем удается выявить наиболее правильные решения и получить истинное представление о свойствах и поведении неустановившегося фильтрационного потока в натурных условиях. В этом смысле результаты опытных кустовых откачек и являются тем эталоном, с помощью которого можно проверить различные теоретические модели и оценить имеющиеся представления о коэффициенте пьезопроводности, проводимости и водоотдаче (упругой емкости) пласта — основных параметрах теории линейной неустановившейся фильтрации. Опираясь на материалы таких опытов, выполненных отечественными и зарубежными исследователями, а также учитывая неустойчивость граничных условий подземных потоков, произведем сравнительную оценку наиболее известных методов определения гидрогеологических параметров и выберем оптимальные.

§ 5.1. СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ГРАВИТАЦИОННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

В последние годы теории и практике опытных кустовых откачек из безнапорных пластов стали уделять особое внимание.

Анализ выполненных исследований показывает, что применяемые методы прогноза развития депрессионной поверхности, базирующиеся на решениях линеаризованного уравнения

Буссинеска, дают значительные погрешности как по площади пласта, так и во времени. Особенно велики эти погрешности при оценке влияния интенсивности возмущения (дебита скважин) Q на характер формирования депрессионной поверхности и скорость распространения радиуса влияния

$$R_t = 1{,}5\sqrt{at} \neq f(Q), \qquad (5.1.1)$$

величина которого по этой теории не зависит от Q [130]. К примеру, согласно (5.1.1) и зависимостям подобного типа $R_t = c\sqrt{t}$ (где c — константа, не зависимая от Q), на один и тот же момент времени $t=1$ сут величина R_t будет иметь в пласте с уровнепроводностью $a=10^6$ м²/сут одно и то же значение $R_t=1500$ м при дебите скважины $Q_1=1$, $Q_2=10$, $Q_3=100$ м³/сут и т. д. Между тем результаты натурных опытов показывают, что всегда $R_t=f(Q)$. По этой причине в инженерной практике широкое распространение получили эмпирические формулы В. Зихардта, И. П. Кусакина, Е. Е. Керкиса, В. В. Куриленко, И. Козени, Ф. С. Бояринцева, М. Е. Альтовского, А. А. Краснопольского, П. А. Киселева, П. П. Климентова, В. В. Котульского и других исследователей, отражающие существование зависимости $R_t=f(Q)$.

Анализу этого явления уделяется недостаточно внимания. На наш взгляд, погрешности формул типа (5.1.1) вытекают

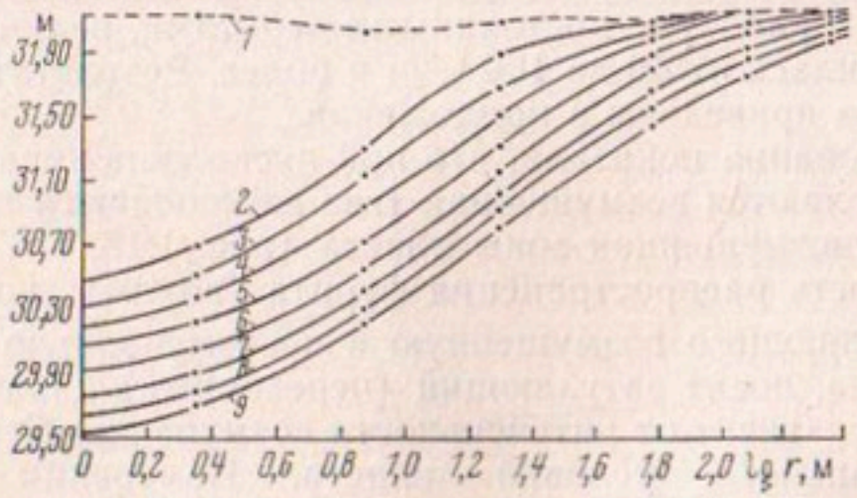


Рис. 5.1. Положение неустановившейся депрессионной поверхности грунтовых вод в координатах S_{rt}—lg$r$ на различные моменты времени после пуска дренажной скв. 7 в работу с дебитом 125 м³/ч (опыт 22): положение статического уровня (*1*) и депрессионной поверхности спустя 1 (*2*), 2 (*3*), 4 (*4*), 10 (*5*), 20 (*6*), 60 (*7*), 180 (*8*) и 600 мин (*9*) после включения насоса в работу

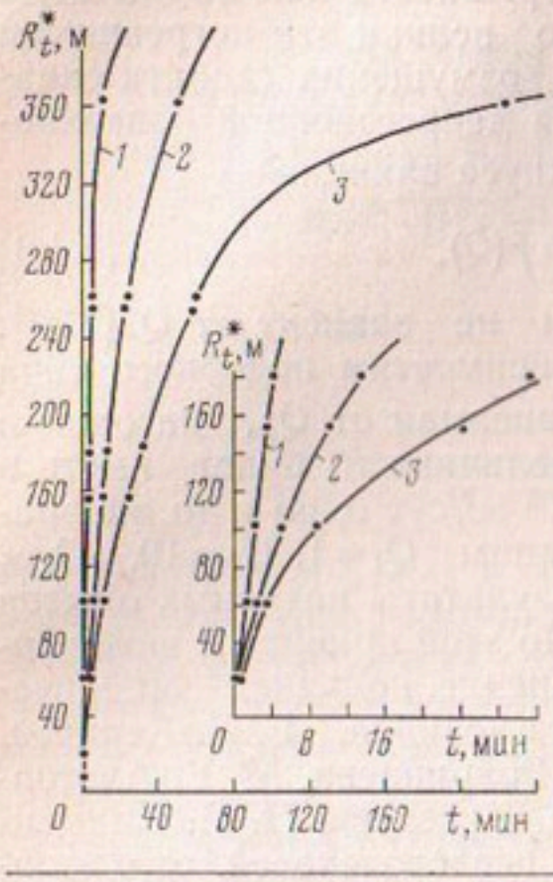


Рис. 5.2. Развитие во времени условных радиусов влияния зоны начавшегося снижения УГВ при пуске дренажной скв. 8 в работу с дебитом 100 м³/ч (опыт 42). Цифры у кривых означают следующие величины снижения УГВ на границе зоны R_t^*: *1*—0; *2* — 2 см; *3* — 5 см

прежде всего из предпосылки о бесконечной скорости распространения возмущений в пласте, лежащей в основе уравнений параболического типа. В этой связи на участках вертикального дренажа в зоне Полесья были выполнены опыты по изучению скорости распространения волны возмущения различной интенсивности (0, 1, 2, 3, 4 см и т. д.) в безнапорном горизонте, подстилающем торфяно-болотные почвы и сложенном мелко- и среднезернистыми песками. Величины понижения и восстановления УГВ замерялись с большой частотой одновременно по 7—10 и более наблюдательным скважинам, расположенным в одном створе на различных расстояниях от опытной (дренажной) скважины. Скважины пускались в работу с постоянными дебитами, величина которых изменялась от 40 до 160 м³/ч и более. Результаты некоторых опытов приведены в приложении.

Исследования показали, что при пуске скважины в работу четко выделяются возмущенная (где наблюдаются понижения УГВ) и невозмущенная зоны пласта (рис. 1.15, 5.1, 5.2). При этом скорость распространения фронта (волны) возмущения R_t^*, разделяющего возмущенную и невозмущенную зоны, незначительна, носит затухающий (переходный) характер и существенно зависит от интенсивности возмущения Q и устойчивости граничных условий пласта. Измерения скорости распространения фронта возмущения $\partial R_t^*/\partial t$ показали, что в первые 5—10 мин работы скважины величина $\partial R_t^*/\partial t$ составляет 0,2—1,0 м/с при дебитах 40—160 м³/ч и с течением времени быстро затухает (рис. 5.2, 5.3). Уже на вторые-третьи сутки работы скважины, когда наступает стабилизация депрессионной воронки, практически $\partial R_t^*/\partial t = 0$ (рис. 5.4, 5.5).

Аналогичные закономерности характеризуют процесс восстановления УГВ после остановок дренажных скважин (рис. 5.4, 5.5). Восстановление (поднятие) динамического уровня сначала начинается вблизи дренажной скважины и быстро распространяется в сторону контура питания (края депрессионной воронки), т. е. также имеет место четкая граница R_t^*, отделяющая зону начавшегося восстановления УГВ от зоны, где пониженный (динамический) уровень продолжает оставаться неподвижным и занимает положение, которое наблюдалось в момент остановки скважины (рис. 5.3—5.7).

Вторая причина расхождений решений линеаризованных уравнений типа (4.3.4) с данными натурных опытов — несоответствие между действительной и модельной картинами перераспределения скоростей, давления, линий тока и водоотдачи (упругой емкости) в неустановившемся гравитационном потоке. Действие некоторых из этих факторов в неявном виде проявляется через один обобщенный параметр — коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности) $a=T/\mu$.

Для расчета коэффициента упругоемкости (или упругой водоотдачи) пласта μ имеется множество формул, вытекающих из соответствующих гипотез Буссинеска, В. Херста — М. Маскета, С. Е. Джейкоба—Ч. В. Тейса, В. Н. Щелкачева, Г. И. Баренблатта — А. П. Крылова, В. Н. Николаевского, Н. Н. Веригина, Р. де Уиста, Е. С. Маркова, О. Н. Носовой, В. М. Шестакова — Т. Д. Стрельцовой, Н. С. Боултона, О. В.

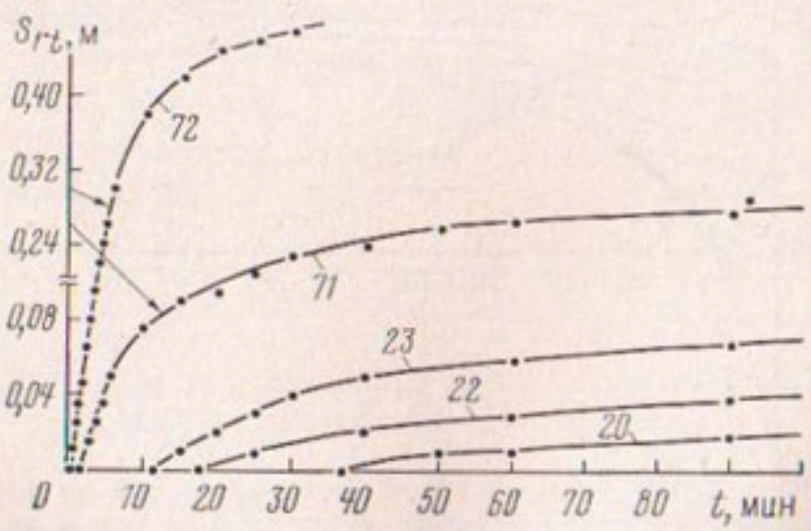


Рис. 5.3. Последовательность начала восстановления УГВ в различных наблюдательных скважинах после остановки дренажной скв. 1, работавшей до остановки 24 ч с дебитом 80 м³/ч (опыт 68). Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

Голубевой, С. Н. Нумерова, Ш. П. Неймана, М. Г. Алишаева — А. Х. Мирзаджанзаде и других исследователей [6, 17, 28, 98, 109, 128, 130, 137]. Эти гипотезы построены на различных (и нередко противоположных) представлениях о характере взаимодействия и проявления массовых (гравитационных) и поверхностных сил в неустановившемся фильтрационном (и прежде всего свободном) потоке. Кроме того, в них содержатся различные толкования физической сущности водоотдачи (емкости) μ и пьезопроводности a. В то же время эти гипотезы в большинстве своем приводят к одной и той же модели — линейному уравнению параболического типа. Это обстоятельство явилось причиной того, что в теории фильтрации возникло несколько принципиально различных методов определения коэффициента пьезопроводности.

Лабораторные методы, развитые В. Херстом, Т. В. Муром, Р. Дж. Шилсюизом, М. Маскетом, С. Е. Джейкобом, В. Н. Щелкачевым и другими [5, 7, 11, 34, 40, 51], основаны на предположении, что при опытных откачках происходит изменение объемов пласта и пластовой жидкости. Поэтому в данных методах коэффициент пьезопроводности определяется путем сжатия образцов породы и пластовой жидкости в пределах деформаций, подчиняющихся закону Гука. Если полагать, что при опытных откачках пласт и жидкость не подвергаются деформациям (сжатию или расширению), то в этом

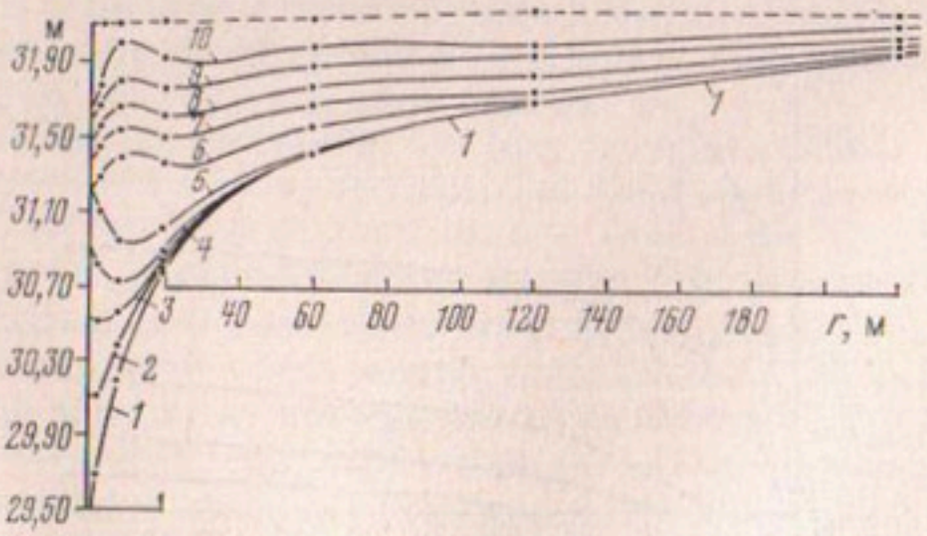


Рис. 5.4. Положение депрессионной поверхности в координатах S_{rt}—r на различные моменты времени после остановки дренажной скв. 7, работавшей до остановки 24 ч с дебитом 125 м³/ч (опыт 22): характер поверхности в момент остановки (*1*) и спустя 1/3 (*2*), 1/2 (*3*), 2/3 (*4*), 1 (*5*), 6 (*6*), 20 (*7*), 60 (*8*), 180 (*9*) и 420 мин (*10*) после остановки скважины

случае пласт превращается в абсолютно несжимаемое тело, в котором перераспределение давления происходит с бесконечно большой скоростью, т. е. мгновенно. В действительности, однако, при опытных откачках в напорных и безнапорных пластах изменения объема пласта и пластовой жидкости практически не наблюдается, поскольку перепады напора в пределах депрессионной поверхности весьма незначительны и составляют тысячные доли порога давления, с которого начинается деформация воды и твердого скелета грунта. Опыты показывают, что и в этих условиях неустановившаяся фильтрация на значительных интервалах пространства и времени также характеризуется уравнениями параболического типа. Отсюда следует, что для обоснования применимости уравнений параболического типа в рассматриваемых условиях необходимы более реальные критерии, нежели те, что справедливы для упругих сред, непрерывно деформируемых под воздействием неустановившихся фильтрационных потоков.

В этой связи Н. Н. Веригин отмечал, что при неустановившихся течениях подземных вод, имеющих свободную поверхность, *главную роль играют силы тяжести.* Поэтому неустановившееся течение безнапорных вод он предлагает называть гравитационным [98].

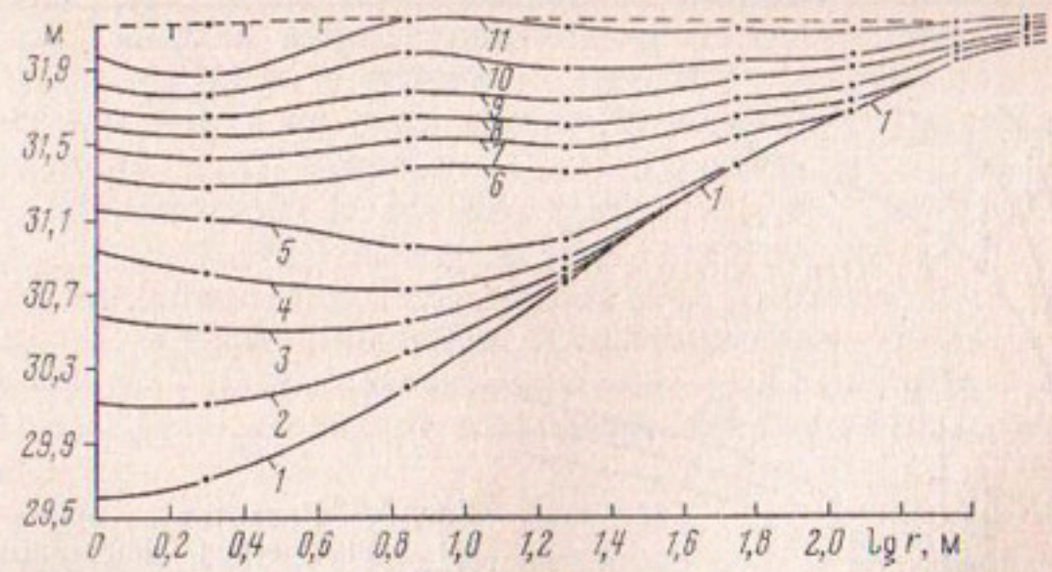


Рис. 5.5. Характер восстановления депрессионной поверхности в координатах S_{rt}—lg$r$ на различные моменты времени после прекращения откачки из скв. 7, работавшей до остановки 24 ч с дебитом 125 м³/ч (опыт 22): характер поверхности в момент остановки скважины (*1*) и спустя 1/3 (*2*), 1/2 (*3*), 2/3 (*4*), 1 (*5*), 6 (*6*), 20 (*7*), 60 (*8*), 180 (*9*), 420 (*10*) и 1320 мин (*11*) после остановки скважины

Таким образом, в строгой постановке данная задача может быть решена после того, как экспериментально или теоретически будет получено математическое выражение, характеризующее закон неустановившейся гравитационной фильтрации

$$V_t = f\,[(\partial S/\partial x)_t,\ t,\ g,\ P,\ t_r] \qquad (5.1.2)$$

или

$$\partial V_t/\partial t = f_{\text{т}t} + f_{\text{д}t} - f_{\text{с}t}, \qquad (5.1.3)$$

где V_t — неустановившаяся скорость фильтрации при неустановившемся градиенте напора $(\partial S/\partial x)_t$ на момент времени t после начала возмущения; g — ускорение силы тяжести; P — факторы, отражающие водно-физические свойства грунта, фильтрационного потока и капиллярной каймы; t_r — время релаксации неустановившегося фильтрационного потока; $\partial V_t/\partial t$ — изменение неустановившейся скорости фильтрации под действием силы тяжести $f_{\text{т}}$, силы гидродинамического давления $f_{\text{д}}$ и силы сопротивления $f_{\text{с}}$ в момент времени t для единицы массы фильтрационного потока.

Необходимо отметить, что роль внутренних $f_{\text{т}}$ и внешних $f_{\text{д}}$ сил в развитии неустановившегося гравитационного потока изменчива во времени и неодинакова, так как условия для максимального проявления этих сил возникают разновременно. В начале возмущения главную роль играют массовые

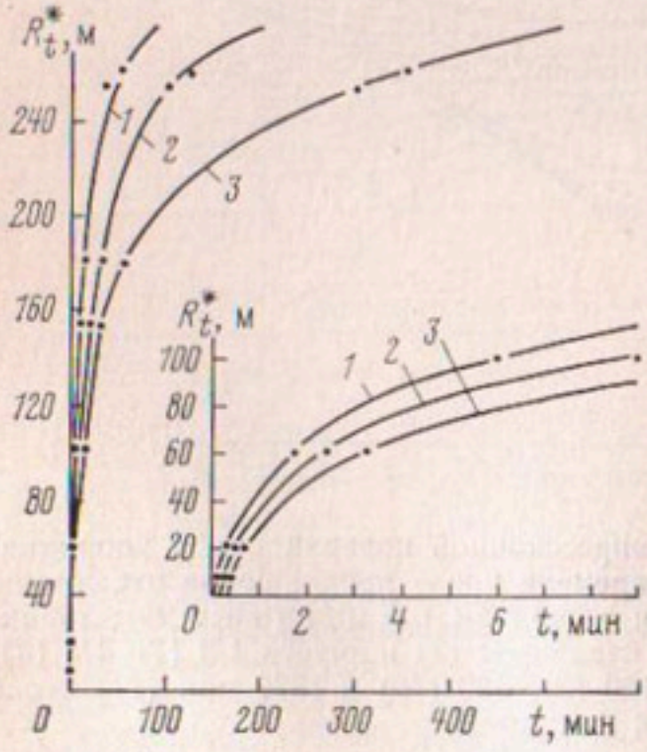


Рис. 5.6. Развитие во времени зоны начавшегося восстановления УГВ после остановки дренажной скв. 8, работавшей до остановки 22 ч с дебитом 82 м³/ч (опыт 41). Цифры у кривых означают следующие величины восстановления УГВ на расстоянии R^*_t : *1* — 0; *2* — 2 см; *3* — 5 см

силы. По мере стабилизации потока интенсивность их воздействия непрерывно ослабевает, поскольку кинетическая энергия, развиваемая силой тяжести, постепенно переходит в потенциальную из-за того, что объем потока уменьшается и к моменту стабилизации принимает постоянное значение. К этому времени условия для проявления сил тяжести не возникают и главенствующими в потоке становятся силы гидродинамического давления.

Если t_y — время стабилизации фильтрационного потока, то при $t \to t_y$ имеем $V_t \to V_\infty$, $f_{\tau t} \to 0$ и закономерности (5.1.2) и (5.1.3) должны переходить в закон Дарси для стационарного напорного потока.

Построению моделей типа (5.1.2) или (5.1.3) много внимания уделили А. В. Лыков, О. В. Голубева, М. Г. Алишаев, А. Х. Мирзаджанзаде, Ш. П. Нейман, Р. де Уист и др. [6, 28, 97, 98, 137].

Попытку решить эту задачу иным путем предпринял Н. С. Боултон [134]. Согласно его модели, перераспределение УГВ и положение неустановившейся депрессионной поверхности при прочих равных условиях зависят от интенсивности поступления (стекания) гравитационной воды из переменной зоны аэрации (и в частности, капиллярной каймы), т. е. от величины неустановившейся гравитационной водоотдачи μ_t. Этот процесс можно рассматривать как перетекание из верхнего водоносного горизонта в нижний (возмущенный) или как наличие инфильтрационного питания сверху. Величина этого питания в общем неизвестна и неравномерна как во времени, так и по пути движения, поскольку, согласно исследованиям Е. С. Маркова, О. Н. Носовой, Б. М. Живовой, Р. А. Брудастовой, В. М. Шестакова и др., $\mu_t = f(\partial S/\partial t) = f(Q, r, t, S_{rt})$. Это значит, что в строгой постановке учет переменной гравитационной водоотдачи μ_t равносилен выводу уравнения неустановившейся гравитационной фильтрации с переменным (присоединяющимся или отделяющимся) расходом вдоль пути и пока не выполним ввиду неопределенности функции μ_t.

В этой связи необходимо отметить, что линейная модель Буссинеска и вытекающая из нее формула Ч. В. Тейса характеризуют процесс перераспределения давления в свободном фильтрационном потоке, т. е. в затопленной части пласта, и никакого отношения к движению влаги и формированию гравитационной водоотдачи в зоне аэрации не имеют. Гравитационная водоотдача μ_t — это параметр незатопленной части пласта. Поэтому переменная гравитационная водоотдача

$\mu_t = f(S_{rt}, r, t)$ в моделях неустановившейся безнапорной фильтрации должна рассматриваться как соответствующая «временная» поправка к ним, не изменяющая существующих представлений о гидрогеологических параметрах a и T и справедливая лишь для начальных промежутков времени $t_н$ после пуска дрен в работу, когда на скорости снижения УГВ сказывается влияние поступления воды из капиллярной каймы. В безнапорных пластах Полесья величина этого промежутка при опытных откачках не превышает 30—40 мин и может не учитываться при проектировании дренажа и в практике гидрогеологических изысканий.

Изучая данные процессы, В. М. Шестаков и Т. Д. Стрельцова обнаружили [119, 128, 129], что на графиках временного прослеживания снижения УГВ при опытных откачках выделяется три этапа (периода) с различными законами снижения уровня. Для каждого из этих этапов рекомендована своя методика расчета гидрогеологических параметров и положения кривой депрессии. Например, начальную часть первого этапа графика прослеживания уровня рекомендуется описывать уравнением Ч. В. Тейса для *напорного* пласта при отсутствии перетекания; последующие части (средняя и конечная) этого этапа — уравнением Джейкоба—Хантуша опять же для *напорного* пласта с наличием перетекания из соседних горизонтов. Аналогично расчет второго этапа неустано-

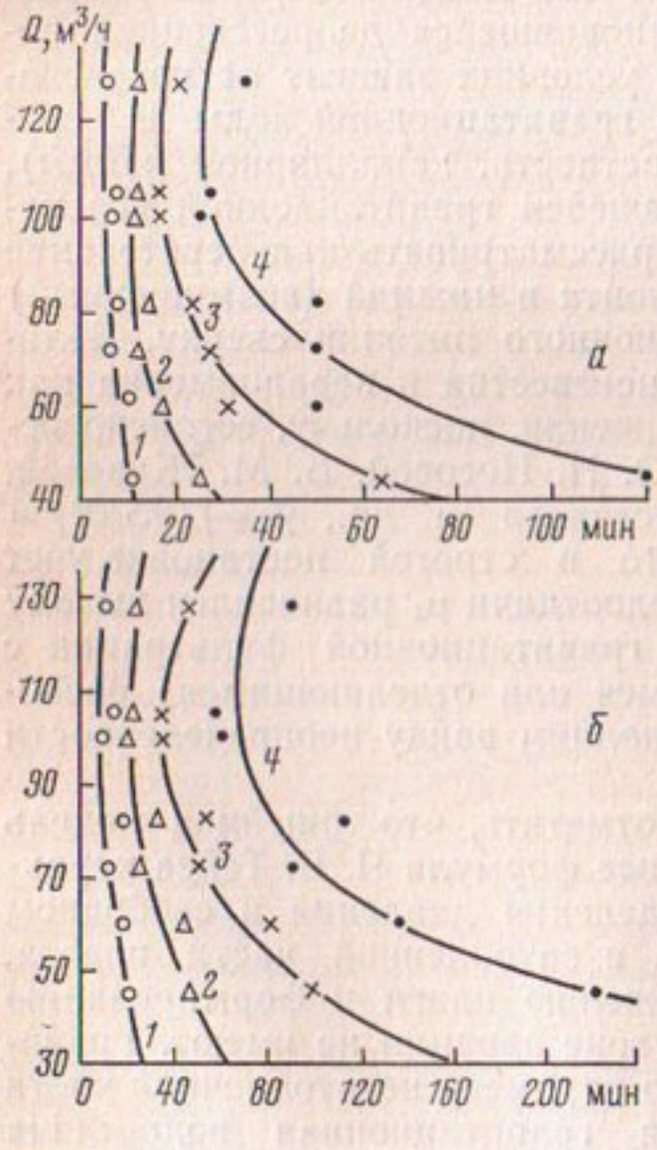


Рис. 5.7. Влияние дебита на время добегания волны восстановления УГВ интенсивностью 0 (*а*) и 2 см (*б*) до различных точек пласта r после остановок дренажной скв. 8 при r, равном 140 (*1*), 180 (*2*), 220 (*3*) и 260 м (*4*)

вившейся безнапорной фильтрации рекомендуется вести по формуле Ж. Дюпюи для *напорной* фильтрации, а расчет третьего этапа — по формулам Боултона и Тейса.

Из данного анализа следует, что перераспределение уровней в неустановившемся «безнапорном» потоке на всех этапах его развития происходит практически так же, как и в напорном потоке. Но в этом случае возникает принципиальный вопрос о том, является ли свободная поверхность грунтового потока (депрессионная поверхность) линией тока. В. В. Ведерников считал [22], что только при установившемся движении и то лишь в тех случаях, когда нормальная к свободной поверхности составляющая скорости $V_n=0$, свободная поверхность является поверхностью тока. Таким образом, случаи, когда свободная поверхность грунтового потока является поверхностью тока, встречаются крайне редко даже при установившемся движении.

Эти выводы нашли дальнейшее развитие в работах [53, 58, 59, 73]. Экспериментами было установлено, что депрессионная поверхность грунтового потока имеет полную аналогию с пьезометрической поверхностью напорного потока и не является линией тока [58]. Положения, вытекающие из этой гипотезы, нашли подтверждение не только в модели Боултона — Стрельцовой — Шестакова, но и в первой теории гравитационной фильтрации И. Козени и в последующих экспериментальных исследованиях безнапорной фильтрации. Однако для более глубокого выяснения структуры неустановившегося безнапорного потока и изучения физической сущности рассматриваемых явлений необходимы дальнейшие опыты.

Существование закономерностей типа (5.1.2) следует прежде всего из конечной скорости перераспределения (распространения) возмущений в неустановившемся гравитационном потоке (под возмущением будем понимать понижение УГВ и деформацию вектора неустановившейся скорости фильтрации). В то же время применение закона Дарси

$$k_\infty = V_{1\infty}/(\partial S/\partial x)_{1\infty} = V_{2\infty}/(\partial S/\partial x)_{2\infty} = \cdots = \text{const} \quad (5.1.4)$$

для описания неустановившейся фильтрации основано на допущении о бесконечной скорости распространения понижений уровня (разности напоров) в этих потоках (здесь k_∞ — коэффициент фильтрации в смысле Дарси).

Закон (5.1.4) получен из экспериментов в условиях установившейся напорной фильтрации и показывает, что скорость установившегося напорного потока V_∞ прямо пропорциональ-

на установившемуся градиенту напора $(\partial S/\partial x)_\infty$. Поэтому, строго говоря, закон Дарси справедлив только для стационарных напорных потоков. Применение его для описания неустановившейся фильтрации основано на допущении, что в любой момент времени t неустановившаяся скорость фильтрации V_t находится в той же прямо пропорциональной зависимости от неустановившегося градиента напора $(\partial S/\partial x)_t$, которая имеет место между этими величинами в стационарном потоке, т. е. допускается, что при неустановившемся и установившемся режимах фильтрационного потока соблюдается равенство

$$k_\infty = V_\infty/(\partial S/\partial x)_\infty = V_t/(\partial S/\partial x)_t = \text{const}. \qquad (5.1.5)$$

В действительности для передачи любого вида субстанции необходимо вполне определенное время [97], поскольку при изменении градиента напора во времени перестройка поля скоростей и напоров происходит не мгновенно, а с конечной скоростью, т. е. с некоторым отставанием или запаздыванием во времени t_r. По аналогии с теорией теплопроводности величину этого запаздывания t_r назовем временем релаксации фильтрационного потока. Это время отражает причинно-следственную связь между градиентом напора и скоростью фильтрации в неустановившемся потоке. В законе Дарси оно не учитывается. Поэтому с гносеологической точки зрения применение закона Дарси для описания нестационарных процессов не совсем правомерно, а сам закон Дарси применительно к нестационарной фильтрации требует уточнения.

Этот вопрос является принципиальным и вызывает большой интерес у многих исследователей. Н. Н. Веригин, анализируя причины несоответствия между реальной и модельными картинами перераспределения напоров в неустановившихся потоках, установил [98], что если силами инерции пренебречь, то и для упругого, и для гравитационного режимов характерно следующее: возмущения в водоносном пласте, вызванные изменениями напора или расхода на его внешних границах, распространяются с бесконечно большой начальной скоростью. Иначе говоря, при $t=0$ изменение напора на внешних границах сразу же передается по всему пласту, причем максимальное изменение напоров происходит вблизи источника возмущения. В дальнейшем, т. е. при $t>0$, скорость изменения напоров конечна.

Согласно работе [98], при совместном учете сил инерции и сил упругости кинематический характер течения в большей степени отражает действительные условия. Именно в этом

случае начальная скорость распространения возмущений в пласте не равна бесконечности. Поэтому для каждого момента времени существует определенный радиус влияния, ограничивающий зону, где уже сказалось возмущение потока, от остальной части пласта.

Таким образом, реальная физическая картина неустановившихся течений значительно сложнее, чем это следует из теоретического рассмотрения вопроса без учета сил инерции. Пренебрегая силами инерции, невозможно точно определить начальную скорость передачи давления в воде и радиус влияния, определяющий зону распространения возмущений.

Для того чтобы более точно воспроизвести реальную картину движения грунтовых вод, не вводя сил инерции, вместо действительной начальной скорости распространения возмущений и действительного радиуса влияния можно рассматривать относительные их величины [98].

Чтобы убедиться в сложности физической картины перераспределения напоров в неустановившемся гравитационном потоке, рассмотрим один из главнейших парадоксов теории Буссинеска. Следуя этой модели, будем считать, что нестационарный безнапорный поток, подобно стационарному напорному, охватывает все сечение пласта h_t, отсчитываемое от депрессионной поверхности до водоупора. Иначе говоря, будем считать, что мощность неустановившегося безнапорного потока равна мощности пласта h_t в данном сечении пласта r на данный момент времени t.

Пусть в этих условиях работает совершенная скважина с дебитом $Q=\text{const}$. Тогда в некотором сечении потока с площадью $F_t=2\pi r h_t$ скорость фильтрации V_t на момент времени t составит $V_t=Q/2\pi r h_t$. При наступлении квазистационарного режима $h_t=h_0-(Q/4\pi T)\ln t$ и $V_t=Q/2\pi r[h_0-(Q/4\pi T)\ln t]$, где h_0 — отрезок оси h_t, отсекаемый графиком $h_t=f(\ln t)$; $Q/4\pi T$ — угловой коэффициент этого графика. Отсюда следует, что в рассматриваемом сечении потока $r=\text{const}$ неустановившаяся скорость фильтрации непрерывно возрастает до максимального значения при установившейся фильтрации $V=Q/2\pi r h_r$. В то же время опытные кустовые откачки показывают (рис. 1.1, 1.15, 3.4, 5.1), что при регулярном режиме, который имеет широкое распространение и в безнапорных пластах, в данном сечении r градиент напора, по Дарси, $(\partial S/\partial r)_t$ в любой момент времени t сохраняет одно и то же постоянное значение $(\partial S/\partial r)_t=Q/2\pi T r=\text{const}$. В этом случае, согласно закону Дарси, в данном сечении потока скорость фильтрации также должна быть постоянной. Но выше

мы видели, что из-за уменьшения мощности пласта h_t величина этой скорости непрерывно возрастает, поскольку $Q=$ $=\text{const}$. Следовательно, если для рассматриваемых условий справедлив закон Дарси, то мощность неустановившегося безнапорного потока при пуске скважины с постоянным дебитом во всех точках пласта r принимает одно и то же постоянное значение и безнапорный пласт работает, как напорный. Если же допустить, что мощность неустановившегося безнапорного потока в данных условиях переменна во времени и по координате r, то необходимо признать существование закона (5.1.2) или других моделей, объясняющих это допущение.

Таким образом, на данном этапе изученности неустановившейся гравитационной фильтрации имеют место различные (в том числе противоположные) представления о кинематике этих потоков и прежде всего о закономерностях формирования векторного поля неустановившихся скоростей фильтрации. Чтобы уточнить эти представления, обратимся к результатам натурных опытов.

§ 5.2. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В прямых задачах подземной гидродинамики известными являются граничные условия и величины гидрогеологических параметров; определению подлежат расход потока и положение депрессионной поверхности. Постановка этих задач сводится к решению соответствующих уравнений математической физики с известными краевыми условиями и параметрами пласта. Наличие ЭВМ и АВМ снимает любые проблемы на пути решения таких задач.

В обратных задачах, наоборот, известны расход потока и положение воронки депрессии в нескольких точках пласта; искомыми являются величины гидрогеологических параметров и граничные условия потока, которые, как правило, неустойчивы при изменении интенсивности возмущения. Поэтому обратным задачам подземной гидродинамики присущи те же свойства, что и обратным действиям математики. Эти задачи значительно труднее, чем прямые задачи того же класса. К примеру, определение расхода скважины, вскрывшей несколько гидравлически связанных пластов с известными фильтрационными свойствами и граничными условиями, не представляет затруднений (скажем, на ЭГДА или нестационарном интеграторе). В то же время оценка гидрогеологиче-

ских параметров этих пластов требует много времени и стоит крайне дорого из-за большого объема буровых и опытно-фильтрационных работ. Кроме того, оценка параметров может быть выполнена весьма приближенно как из-за неустойчивости процесса перетекания и неодновременности его проявления в различных пластах, так и ввиду невозможности расчленения дебита скважины на составляющие, равные расходам основного и присоединяющихся потоков.

Разделяют обратные задачи первого и второго классов или соответственно внутренние и внешние обратные задачи. Во внутренних задачах искомыми являются расчетные значения гидрогеологических параметров. Во внешних задачах определению подлежат краевые условия потоков и пластов, которые здесь являются неизвестными функциями. В теории фильтрации и практике гидрогеологических изысканий наиболее изучены и опробированы методы определения гидрогеологических параметров [13, 17, 41, 95, 118, 120]. Внешние обратные задачи стали изучаться в последние годы [36, 41, 103]. Рекомендаций по их применению в опытно-фильтрационных работах пока нет. Этому препятствуют следующие обстоятельства.

Для выделения частных решений уравнений подземной гидродинамики, как известно, вводятся условия единственности или однозначности решения, объединяющие граничные и начальные (временные) условия, величины гидрогеологических параметров пласта и границы области фильтрации. И если в прямых задачах заданным условиям однозначности соответствует единственное решение, то в обратных задачах, наоборот, одно положение депрессионной поверхности может соответствовать бесконечному количеству условий однозначности, каждое из которых в состоянии создать данное поле напоров и скоростей. Поэтому выделить из множества возможных условий однозначности то, которое соответствует действительности, не всегда удается. Для решения таких задач хотя бы в первом приближении требуется обширная геологическая и гидрогеологическая информация. В практике мелиоративного проектирования необходимости в решении таких задач обычно не возникает.

Анализ современных методов определения гидрогеологических параметров по данным натурных испытаний пластов показывает [13, 41, 115, 118, 120, 126], что практически все они основаны на использовании основной формулы теории неустановившейся фильтрации к скважинам — формулы Ч. В. Тейса (3.2.1). Эта формула является решением линей-

ного уравнения неустановившейся напорной фильтрации при пуске совершенной скважины нулевого диаметра с постоянным дебитом в неограниченном по простиранию и однородном по проницаемости пласте постоянной проводимости. Предполагается, что возмущаемый пласт абсолютно изолирован и не имеет гидравлической связи со смежными пластами.

Входящая в формулу Ч. В. Тейса интегральная показательная функция $-Ei(-x)$ при $x \leqslant 0{,}08$ с высокой степенью точности аппроксимируется логарифмической функцией (рис. 3.1, 3.2). Это свойство интегральной показательной функции указывает на существование квазистационарного (регулярного) режима неустановившейся фильтрации и играет фундаментальную роль в обратных методах подземной гидродинамики.

Следуя С. Е. Джейкобу, для регулярного режима из (3.2.1) получаем преобразования

$$S_{rt} = A_r + i \ln t = A_r + i^* \lg t \quad (r = \text{const}), \tag{5.2.1}$$

$$S_{rt} = A_t - i_D \ln r = A_t - i_D^* \lg r \quad (t = \text{const}), \tag{5.2.2}$$

$$S_{rt} = A_k + i \ln (t/r^2) = A_k + i^* \lg (t/r^2), \tag{5.2.3}$$

которые называются графиками временного $S_{rt}=f(\ln t)$, площадного $S_{rt}=f(\ln r)$ и комбинированного (по С. Е. Джейкобу) $S_{rt}=f[\ln(t/r^2)]$ прослеживания изменения уровня. С помощью этих графиков производится обработка результатов опытных кустовых откачек при установившейся и неустановившейся фильтрации. Преобразования (5.2.1)—(5.2.3) составляют основу современной методологии определения гидрогеологических параметров и включают в себя следующие аппроксимационные константы:

$$A_r = i \ln (2{,}25a_r/r^2) = i^* \lg (2{,}25a_r/r^2),$$

$$A_t = i \ln 2{,}25a_r t = i^* \lg 2{,}25a_r t, \tag{5.2.4}$$

$$A_k = i \ln 2{,}25a_r = i^* \lg 2{,}25a_r$$

— начальные отрезки графиков соответственно (5.2.1) — (5.2.3); i^* — угловой коэффициент графиков $S_{rt}=f(\lg t)$ и $S_{rt}=f[\lg(t/r^2)]$;

$$i_D^* = 2{,}3 i_D = \frac{0{,}366Q}{T_D} = \frac{S_{r_1 t} - S_{r_2 t}}{\lg (r_2/r_1)} \tag{5.2.5}$$

— угловой коэффициент прямой (5.2.2);

$$T_D = Q/2\pi i_D = 0{,}366Q/i_D^* \tag{5.2.6}$$

— проводимость пласта по Дюпюи, определяемая без учета фактора времени по формуле Дюпюи (5.2.2). Аналогично параметр T, определяемый по формуле (3.2.6) с учетом фактора времени, является проводимостью пласта по Тейсу. Ниже будет показано, что только в абсолютно изолированных пластах, не имеющих гидравлической связи с другими пластами, величины T_D и T равны между собой. Но поскольку таких пластов не существует, то практически во всех опытах наблюдалось неравенство $T_D \neq T$ [53, 82, 86]. Впервые на существование такого неравенства указали американские нефтяники в 1950 г. (см. [130], с. 291). При определении проницаемости призабойной зоны скважин ими было замечено, что между величинами проницаемости, определенными по графикам временного прослеживания изменения уровня (нестационарная фильтрация) и по формуле Дюпюи (5.2.6) (стационарная фильтрация), существует устойчивая разница. Это наблюдение, на первый взгляд незначительное, в последующем сыграло определенную роль в обнаружении двух новых разновидностей регулярного режима неустановившейся напорной и безнапорной фильтрации, для которых как раз и характерно наличие неравенств соответственно $T_D > T$ и $T_D < T$, и помогло установить закономерности изменения пьезопроводности $a_r = T/\mu_r$ и упругоемкости (или емкости) $\mu_r = T/a_r$ вдоль координаты r при данных разновидностях квазистационарного режима [53, 61, 66, 67, 69]. На этом основании будем четко разделять величины проводимостей T_D и T и методы их определения.

Если в пласте соблюдаются все условия, для которых получена формула Ч. В. Тейса (3.2.1), то во всех точках фильтрационного потока r имеет место равенство $T_D = T = \text{const}$ и параметры a_r и μ_r принимают одно и то же постоянное значение соответственно $a_r = a = \text{const}$ и $\mu_r = \mu = \text{const}$, т. е. в этом случае $i_D = 2i$ и пласт характеризуется постоянной проводимостью $T_D = T = \text{const}$, постоянной пьезопроводностью $a_r = a = \text{const}$ и постоянной емкостью $\mu_r = \mu = \text{const}$.

Подставив известное равенство $a = T/S^* = k/\gamma\beta^* = T/\mu_{упр} = T/\mu$ в формулу (3.2.5), получим зависимость для расчета параметров S^*, $\mu_{упр}$, μ в любой точке пласта r по фиксированным значениям Q, S_{rt}, i^*:

$$\lg \mu_r = \lg \frac{T}{a_r} = \lg \frac{Tt}{r^2} - \frac{S_{rt}}{i^*} + 0{,}352 =$$

$$= \lg (Qt/i^* r^2) - S_{rt}/i^* - 0{,}386, \qquad (5.2.7)$$

где S^* — коэффициент упругого запаса (или деформационной емкости) пласта по С. Е. Джейкобу; $\mu_{упр}$ — то же, по В. М. Шестакову; β^* — коэффициент упругоемкости пласта по В. Н. Щелкачеву.

В. Н. Щелкачев считает [130, с. 397], что по физическому смыслу и значению коэффициент запаса S^* близок вошедшему во всеобщее употребление коэффициенту упругоемкости пласта β^*.

Для возмущающей скважины формула (5.2.7) принимает вид

$$\lg \mu_c = \lg \frac{T_c}{a_c} = \lg \frac{T_c t}{r_0^2} - \frac{S_{ct}}{i_c^*} + 0{,}352, \qquad (5.2.8)$$

где параметры i_c^*, T_c, a_c рассчитываются по формулам (3.2.11) — (3.2.14) с использованием действительного радиуса возмущающей скважины r_0 и графика $S_{ct} = f(\lg t)$.

Определение упругоемкости пласта μ лабораторными методами через коэффициенты объемной упругости среды (путем сжатия образцов керна и пластовой жидкости) в гидрогеологических исследованиях не практикуется, поскольку получаемые по такой методике величины μ и a искажены и не отражают гидродинамической картины, возникающей в водоносных пластах при их возмущении. В то же время расчет μ_r по формуле (5.2.7) учитывает режим водного питания (граничные условия) пласта и дает истинную величину емкости пласта в любой его точке r при данной интенсивности возмущения.

Установим необходимые и достаточные условия (признаки) существования квазистационарного режима неустановившейся фильтрации. Для этого отметим, что функции (5.2.1) и (5.2.2) представляют собой фундаментальные решения уравнения Лапласа в пространстве понижение — время

$$\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} + \frac{1}{t} \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \qquad (5.2.9)$$

и в пространстве понижение — расстояние

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} = 0. \qquad (5.2.10)$$

Уравнения Лапласа (5.2.9) и (5.2.10) указывают на то, что в задаче Ч. В. Тейса квазистационарное поле в пространстве понижение — время также потенциально и, следовательно, может быть смоделировано на интеграторах, применяемых

для моделирования стационарных потенциальных полей [82]. Такие поля и будем рассматривать ниже. Внешним их признаком, как следует из (5.2.1) и (5.2.2), является то, что в координатах S_{rt}—ln$t$ и S_{rt}—ln$r$ опытные значения S_{rt}, замеренные в различных точках пласта r в различные моменты времени t, образуют семейства параллельных прямых с угловыми коэффициентами соответственно i и i_D (рис. 5.8).

Таким образом, если имеют место прямолинейные графики $S_{rt}=f(\ln r)$ и $S_{rt}=f(\ln t)$, то испытуемый пласт является однородным по проводимости как в смысле линейного закона установившейся фильтрации Дарси $V=k_d(\partial S/\partial r)$, лежащего в основе уравнения Лапласа (5.2.10), так и в смысле линейного закона некоторой неустановившейся фильтрации $V=k_h(\partial S/\partial t)$, лежащего в основе уравнения Лапласа (5.2.9). Очевидно, в данном случае пласт будет характеризоваться параметрами $T_D=\text{const}$ и $T=\text{const}$.

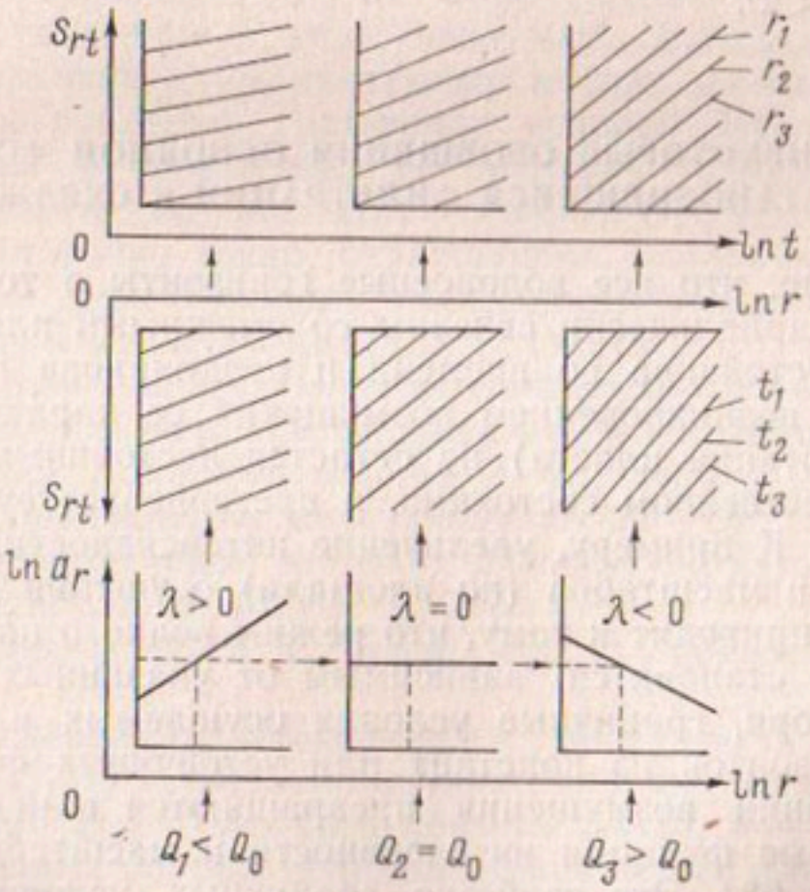


Рис. 5.8. Характер деформации квазистационарного режима фильтрации и характеризующих его кривых $S_{rt}=f(\ln t)$, $S_{rt}=f(\ln r)$ и $\ln a_r=f(\ln r)$ в неограниченном по простиранию пласте с закономерно-неустойчивым режимом питания и разгрузки

Рассмотренный признак неустановившегося фильтрационного потока и составляет первое (или необходимое) условие существования любой разновидности квазистационарного режима.

Поскольку, как известно [53, 61, 66, 67], в натурных условиях встречаются три разновидности квазистационарного режима, то вторым (или достаточным) условием существования той или иной разновидности квазистационарной фильтрации следует считать соотношение между параметрами T_D и T или между угловыми коэффициентами графиков (5.2.1) и (5.2.2). Очевидно, если $i_D=2i$, то $T_D=T$ и мы имеем известную (линейную) разновидность регулярного режима, подробно описанную В. Н. Щелкачевым [130].

Чтобы изучить свойства двух других разновидностей квазистационарного режима, формулу (3.2.1) обобщим для случаев, когда опытные значения S_{rt} удовлетворяют графикам (5.2.1) и (5.2.2), но между угловыми коэффициентами этих графиков (прямых) имеют место соотношения: $i_D \neq 2i$ или $i_D > 2i$ и $i_D < 2i$.

§ 5.3. НЕКОТОРЫЕ ОБОБЩЕНИЯ ОСНОВНОЙ ФОРМУЛЫ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ К СКВАЖИНАМ

Известно, что все водоносные горизонты в той или иной степени гидравлически связаны со смежными пластами. Эта связь неустойчива во времени и неодинакова по площади пласта. С возникновением возмущения ее характер (режим водного питания пласта) не остается постоянным, каким он был в естественном состоянии, и претерпевает существенные изменения. К примеру, увеличение интенсивности, продолжительности и масштабов (по площади) осушения водоносного горизонта приводит к тому, что режим водного питания этого горизонта становится зависимым от указанных факторов. Иначе говоря, граничные условия осушаемых и смежных с ними горизонтов из констант или устойчивых функций при возникновении возмущения превращаются в неизвестные и неустойчивые функции интенсивности и масштабов дренирования [53, 68]. Это свойство граничных условий реальных пластов до сих пор не учитывается при решении прямых и обратных задач теории линейной фильтрации.

Совершенно ясно, что установление вида граничных условий и закономерностей их изменения под действием запроектированных мероприятий не всегда возможно, а во многих

случаях и нецелесообразно из-за большой стоимости опытно-фильтрационных работ, необходимых для решения таких задач. Выход из этого положения следует искать в методах оценки обобщенных фильтрационных сопротивлений дренажных скважин, вводя соответствующие поправки (к примеру, в формулу Ч. В. Тейса) на несовершенство и неустойчивость граничных условий исследуемого пласта (или режим его питания).

Необходимость введения поправок на несоответствие между модельными (теоретическими) граничными условиями и их реальными аналогами объясняется, во-первых, тем, что теория граничных условий водоносных пластов и комплексов находится в стадии развития, и, во-вторых, тем, что при проведении опытных откачек в большинстве случаев невозможно установить все факторы, участвующие в формировании депрессионной поверхности. И если при обработке результатов откачек каким-либо достаточно точным методом (скажем, по графикам (5.2.1)—(5.2.3)) наблюдается *закономерное* отклонение опытных значений S_{rt} от теоретических, то это отклонение, представленное в виде некоторой функции, и будет искомой поправкой к применяемому методу на сложность и неизвестность реальных граничных условий. Использование этой поправки в формулах, по которым обрабатывались опытные значения S_{rt}, позволит получить обобщенные зависимости, достаточно точно отражающие реальную картину формирования депрессионной поверхности в данных гидрогеологических и эксплуатационных условиях.

Следуя этому методу, получим соответствующие поправки к формуле Ч. В. Тейса, компенсирующие несоответствие между граничными условиями задачи Ч. В. Тейса и реальными условиями формирования неустановившихся потоков подземных вод при различных режимах водного питания водоносных горизонтов [53, 57, 61, 66, 67, 75].

Анализ формулы Ч. В. Тейса (3.2.1) показывает следующее.

1. При изменении интенсивности возмущения пласта Q графики $S_{rt}=f(Q)$ исходят из начала координат: в случае напорной фильтрации — это веер прямых линий, при безнапорной — семейство парабол. Это положение лежит в основе теории линейной фильтрации.

2. При изменении интенсивности возмущения величина приведенного радиуса влияния $R_t=c\sqrt{at}$ не изменяется и на один и тот же момент времени сохраняет одно и то же значение при любых дебитах скважины (рис. 5.9, *а*): «...величина

R_t зависит только от времени t и коэффициента пьезопроводности пласта a; ...приведенный радиус влияния не зависит от интенсивности возмущения...» (см. [130], с. 239).

3. Величины проводимости (коэффициента фильтрации) пласта, определенные при установившейся T_D и неустановившейся T фильтрации, всегда равны между собой и сохраняют свое значение при изменении интенсивности возмущения. По этой причине коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности) однородного по проводимости пласта всегда имеет одно и то же значение во всех точках пласта и не зависит от интенсивности возмущения.

Все три положения неразрывно связаны между собой. Нарушение одного из них тут же приводит к изменению остальных. Поэтому новые (квазилинейные) разновидности неустановившейся фильтрации, более точно характеризующие движение подземных вод, могут быть получены из линейной теории, если допустить (исходя из чисто формальных, физических, теоретических, опытных или других предпосылок), что в натурных условиях любое из трех перечисленных положе-

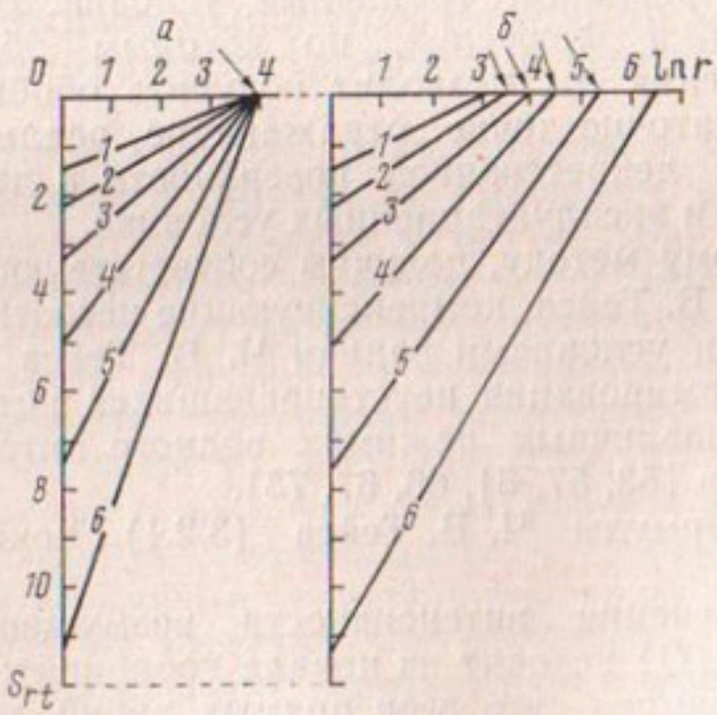


Рис. 5.9. Расположение неустановившихся депрессионных поверхностей $S_{rt}=f(\ln r)$ на один и тот же момент времени: $а$ — согласно формуле (3.2.1), $\lambda_{1-6}=0$, $R_t=\text{const}\neq f(Q)$; $б$ — согласно обобщенной формуле (5.3.17), учитывающей водобалансовую поправку λ: $\lambda_{1-2}<0$; $\lambda_3=0$; $\lambda_{4-6}>0$; $R_t=f(Q)$. Номера депрессионных поверхностей 1, 2, 3... соответствуют величинам дебита соответственно Q_1, $Q_2=1{,}5\,Q_1$, $Q_3=1{,}5\,Q_2$ и т. д.

ний неустойчиво по отношению к изменению интенсивности возмущения пласта и, следовательно, справедливо лишь в частном случае, а именно в некоторой узкой полосе значений расхода потока. К примеру, достаточно предположить, что

1) в случае напорной фильтрации графики $S_{rt}=f(Q)$ исходят из начала координат и являются прямолинейными только в центре возмущения или вблизи него, а с удалением от последнего постепенно переходят от прямых линий к кривым, отсекающим на осях соответствующие отрезки;

2) величина R_t является функцией интенсивности возмущения и в один и тот же момент времени может принимать различные значения при различных значениях дебита;

3) величины проводимости, определенные из условий установившейся T_D и неустановившейся T фильтрации, в общем случае не равны между собой, т. е. $T_D \neq T$,

и мы обнаружим, что в природных условиях наряду с известной линейной разновидностью неустановившейся фильтрации широко распространены две новые (квазилинейные) разновидности неустановившейся фильтрации, разделенные линейной разновидностью фильтрации.

Прежде чем приступить к изучению этого явления, отметим, что при изменении интенсивности возмущения пласта, как правило, наблюдается неустойчивость всех трех разновидностей неустановившейся фильтрации, в результате чего в зависимости от условий водного питания пласта и амплитуды изменения расхода потока может иметь место переход квазилинейных разновидностей неустановившейся фильтрации в линейную и, наоборот, линейной фильтрации в ту или другую разновидность квазилинейной фильтрации. Нередки случаи, когда в данных гидрогеологических и эксплуатационных условиях движение подземных вод к дренам протекает в пределах одной разновидности неустановившейся фильтрации или в пределах границ раздела двух смежных разновидностей фильтрации.

Итак, пусть мы имеем неустановившееся квазистационарное поле, удовлетворяющее уравнениям (5.2.1) и (5.2.2). Такие поля наблюдаются во всех опытных кустовых откачках. Поэтому и отечественные, и зарубежные исследователи в данных условиях для оценки гидрогеологических параметров обоснованно применяют формулу (3.2.1) и вытекающие из нее зависимости (3.2.4), (3.2.6) и (5.2.6).

Анализ результатов таких опытов показал [53, 57, 82, 86], что величина коэффициента пьезопроводности (уровнепроводности) a, определяемая по формуле (3.2.4) в условиях квази-

стационарного режима, изменяется вдоль радиуса депрессионной воронки r по следующему закону (рис. 5.8, 5.10):

$$\ln a_r = \ln a_r^0 + \lambda \ln r \qquad (5.3.1)$$

или

$$a_r = a_r^0 r^{\lambda}, \qquad (5.3.2)$$

где a_r — величина коэффициента пьезопроводности a в точке r при данном $Q=\text{const}$, определяемая по формуле (3.2.4); $\ln a_r^0$ — аппроксимационная константа, равная отрезку оси $\ln a_r$, отсекаемому продолжением прямолинейного участка графика $\ln a_r = f(\ln r)$; λ — тангенс угла наклона графика $\ln a_r = f(\ln r)$ к оси $\ln r$. При данном $Q=\text{const}$ величина λ является постоянной.

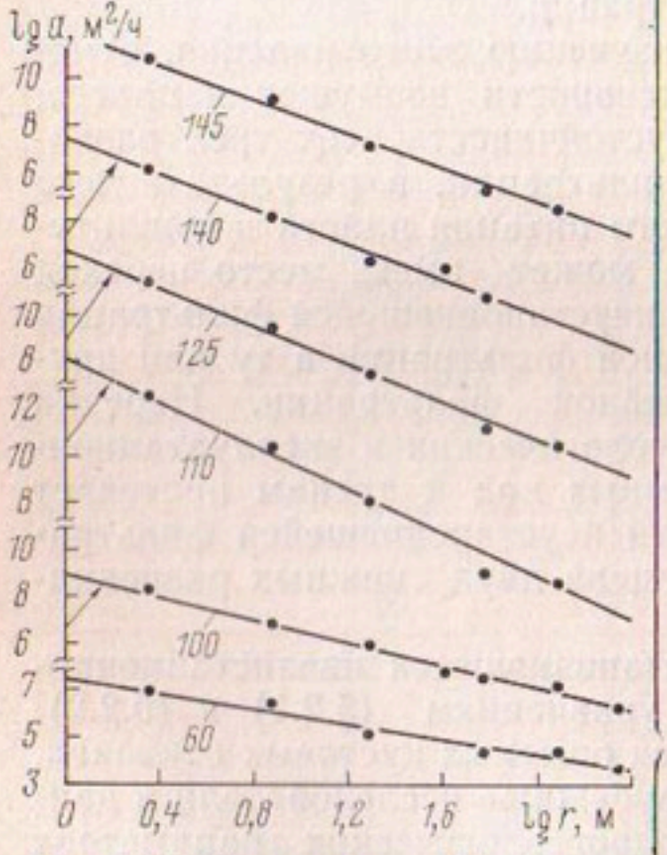


Рис. 5.10. Кривые $\lg a = f(\lg r)$, построенные по данным снижения УГВ при откачках из дренажной скв. 7. Цифры у кривых означают величины дебита в м³/ч

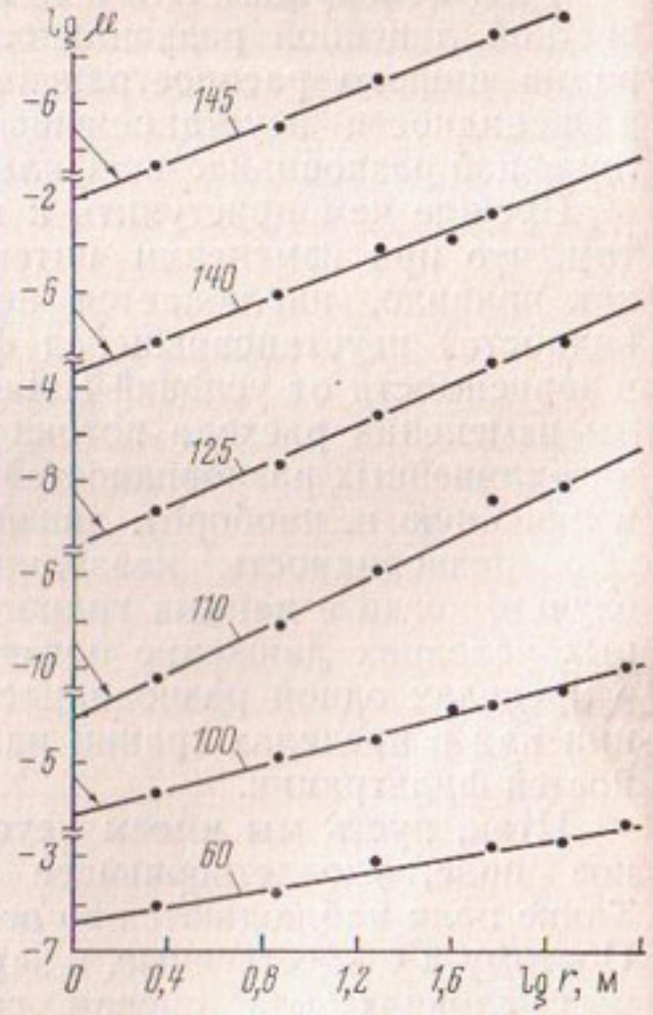


Рис. 5.11. Кривые $\lg \mu = f(\lg r)$, построенные по данным снижения УГВ при опытных откачках из дренажной скв. 7. Цифры у кривых означают величины дебита в м³/ч

По Буссинеску, $a_r = T/\mu_r$. В зоне регулярного режима $T = \text{const} \neq f(r)$. Следовательно, при наличии закономерности (5.3.1) будет наблюдаться изменение коэффициента запаса (упругой водоотдачи) μ по радиусу депрессионной воронки r. Это изменение, как показали опыты (рис. 5.11), также характеризуется степенной функцией [53, 61, 66, 67]

$$\ln \mu_r = \ln (T/a_r) = \ln \mu_r^0 - \lambda \ln r \qquad (5.3.1а)$$

или

$$\mu_r = \mu_r^0 r^{-\lambda}, \qquad (5.3.2а)$$

где μ_r — величина упругой водоотдачи по Тейсу μ в точке r; $\ln \mu_r^0 = \ln (T/a_r^0)$ — аппроксимационная константа, равная отрезку оси $\ln \mu_r$, отсекаемому графиком $\ln \mu_r = f(\ln r)$; λ — угловой коэффициент этого графика. Величина μ_r рассчитывается по формуле (5.2.7).

Существование закономерностей (5.3.1)—(5.3.2а) в условиях, когда перераспределение УГВ происходит согласно уравнениям (5.2.1) и (5.2.2), может быть названо признаком (эффектом) квазилинейности неустановившегося фильтрационного потока. Количественная сторона этого явления оценивается параметром λ и заключается в том, что при постоянстве проницаемостей или водопроводимостей пласта T и T_D вдоль оси r величины a и μ в этом направлении закономерно изменяются. В том и состоит основное свойство квазилинейных разновидностей неустановившейся фильтрации, для которых справедливы функции (5.3.1) и (5.3.1а).

С гидрогеологической точки зрения существование квазилинейности фильтрационного потока может быть объяснено прежде всего конечной скоростью распространения возмущений в пласте и зависимостью этой скорости от режима водного питания пласта и его неустойчивости при изменении Q. При анализе физики этого явления нельзя исключать также существование начального градиента напора и сложной природы неустановившейся гравитационной и упругой водоотдачи [66, 67, 75, 82].

Исследования Е. С. Маркова, Р. А. Брудастовой, А. И. Ивицкого, Б. М. Живовой, О. Н. Носовой, В. М. Шестакова, Н. З. Моркоса и др. показывают, что величина гравитационной водоотдачи при неустановившейся фильтрации является функцией скорости снижения (а следовательно, и восстановления) УГВ, т. е. $\mu = \mu_t = f(V_t)$, где $V_t = \partial S/\partial t$ — скорость движения уровня в вертикальной плоскости. Чтобы связать закон Дарси с этой скоростью, разложим установившийся

градиент напора $(dS/dx)_\infty$ на два нестационарных («временных») градиента соответственно вертикальной $(dS/dt)_t$ и горизонтальной $(dx/dt)_t$ составляющим скорости перераспределения УГВ:

$$V_\infty = k_\infty \left(\frac{dS}{dx}\right)_\infty = k_\infty \frac{(dS/dt)_t}{(dx/dt)_t}.$$

Из этого равенства следует, что только при соблюдении вполне определенного соотношения между скоростями перераспределения УГВ в вертикальной и горизонтальной плоскостях реальная картина неустановившегося движения грунтовых вод будет соответствовать линейному уравнению (4.3.4). При изменении этого соотношения в ту или другую сторону линейная разновидность неустановившейся фильтрации автоматически переходит в квазилинейные [53, 61, 66, 67, 76, 82].

Данная гипотеза находит широкое подтверждение в натурных опытах [53, 82, 86]. Это говорит о том, что закономерности (5.3.1) и (5.3.1а) следует признать как явление, всегда наблюдаемое в зоне квазистационарного режима фильтрации. Это явление отражает внутренние закономерности перераспределения давления в неустановившемся потоке и в неявном виде содержит реальные соотношения между неустановившимся градиентом напора и неустановившейся скоростью фильтрации. Отсюда можно заключить, что дальнейшее изучение эффекта квазилинейности будет представлять собой одну из важнейших задач физики движения подземных вод. Во всяком случае функции (5.3.1) и (5.3.1а), как нам представляется, окажут существенную помощь в раскрытии математической структуры соотношения (5.1.2).

В частном случае, когда $\lambda=0$, из формулы (5.3.1) получаем известное положение о том, что коэффициент пьезопроводности имеет одно и то же значение $a=a_r^0$ в каждой точке пласта. В связи с этим представляется важным выяснить причины, обусловливающие возникновение зависимости (5.3.1) и вытекающие из нее положения.

Исследование будем вести для квазистационарного режима фильтрации, когда в определенной части области фильтрации неустановившаяся депрессионная поверхность передвигается параллельно самой себе и на любой момент времени $t=\text{const}$ подчиняется уравнению Дюпюи

$$Q = 2\pi T_D (S_{r_1 t} - S_{r_2 t})/\ln(r_2/r_1). \qquad (5.3.3)$$

Будем предполагать, что с помощью формулы (3.2.1) мы наблюдаем за распространением неустановившейся депрес-

сионной поверхности в нескольких совершенно одинаковых пластах, в которых в одно и то же время пущены в эксплуатацию одинаковые скважины с разными по величине постоянными дебитами $Q_1<Q_2<Q_3$ и т. д. Тогда в одних и тех же точках пластов на одни и те же моменты времени величины понижений будут прямо пропорциональны дебиту скважин. Действительно, если a, T, r, t одни и те же, а Q различны, то из (3.2.1) имеем

$$S_{rt} = cQ, \tag{5.3.4}$$

где

$$c = [-\mathrm{Ei}(-r^2/4at)]/4\pi T = \text{const}.$$

Чтобы получить представление о характере перемещения неустановившейся депрессионной поверхности при пуске скважины с различными по величине дебитами, применим формулу (5.3.4) на один и тот же момент времени $t=\text{const}$ для различных точек пласта r и различных значений Q. Тогда получим, что неустановившийся (и установившийся как частный случай) приведенный радиус влияния $R_t=1{,}5\sqrt{at}$ не зависит от дебита скважины и для $t=\text{const}$ имеет одинаковую величину при любых значениях Q (рис. 5.9, *а*). Однако из практики водопонижения и опытных откачек известно, что неустановившийся и установившийся радиусы влияния являются функциями интенсивности возмущения [116, 118].

Существование функции $R_t=f(Q)$ указывает на то, что в наблюдательных скважинах имеет место отклонение значений S_{rt} от зависимости (5.3.4), т. е. наблюдается неустойчивость линейной фильтрации при изменении интенсивности возмущения. По этой причине величины параметров T и T_D, определенные по формулам (3.2.6) и (5.2.6), также являются функциями Q.

Докажем, что отмеченная непропорциональность величин понижений уровня S_{rt} величинам дебита Q и является причиной возникновения неустойчивости фильтрационного потока и существования новых (квазилинейных) разновидностей неустановившейся фильтрации.

Пусть при дебите Q_1 в точках пласта r_1 и r_2 на момент времени t величины понижений уровня составляют, согласно выражению (5.3.4), S_{r_1t} и S_{r_2t}. Для этих точек, применив формулу (3.2.4), определим значения коэффициента пьезопроводности:

$$\ln a_{r_1} = \ln a = \frac{4\pi T S_{r_1t}}{Q_1} - \ln\frac{2{,}25t}{r_1^2}, \tag{5.3.5}$$

$$\ln a_{r_2} = \ln a = \frac{4\pi T S_{r_2 t}}{Q_1} - \ln \frac{2{,}25t}{r_2^2}. \qquad (5.3.5)$$

При дебите $Q_2 = \alpha Q_1$ на тот же момент времени t в тех же точках пласта r_1 и r_2, согласно формуле (5.3.4), понижения уровня составят $\alpha S_{r_1 t}$ и $\alpha S_{r_2 t}$, т. е. величины a и R_t останутся прежними.

Теперь будем исходить из допущения, что зависимость $R_t = f(Q)$ имеет место (рис. 5.9, *б*), т. е. будем считать, что при дебите Q_2 в одной из двух рассматриваемых точек пласта (или в обеих точках — это не имеет принципиального значения) величина понижения не будет равна $\alpha S_{r_1 t}$ или $\alpha S_{r_2 t}$. Положим, что в точке r_2 понижение уровня при дебите Q_2 составляет $S'_{r_2 t}$, причем $S'_{r_2 t} > \alpha S_{r_2 t}$, а в точке r_1 наблюдается понижение $\alpha S_{r_1 t}$, которое и должно быть согласно формуле (5.3.4). Для этих условий, применив выражения (5.3.5), получим

$$\ln a = \ln a_{r_1} = \frac{4\pi T \alpha S_{r_1 t}}{\alpha Q_1} - \ln \frac{2{,}25t}{r_1^2},$$
$$\ln a \neq \ln a_{r_2} = \frac{4\pi T S'_{r_2 t}}{\alpha Q_1} - \ln \frac{2{,}25t}{r_2^2}. \qquad (5.3.6)$$

Поскольку по условию $S'_{r_2 t} > \alpha S_{r_2 t}$, то из выражения (5.3.6) следует, что $a_{r_2} > a_{r_1}$. На этом основании можем записать

$$\ln a_{r_2} - \ln a_{r_1} = 2 \ln (r_2/r_1) - \frac{4\pi T}{Q_2} (S'_{r_1 t} - S'_{r_2 t}), \qquad (5.3.7)$$

где $S'_{r_1 t} = \alpha S_{r_1 t}$.

Поскольку мы рассматриваем область квазистационарного режима фильтрации, можем воспользоваться формулой Дюпюи (5.3.3):

$$Q_2 = 2\pi T_D (S'_{r_1 t} - S'_{r_2 t}) / \ln (r_2/r_1). \qquad (5.3.8)$$

Значение разности понижений из формулы (5.3.8) подставим в равенство (5.3.7). Тогда после сокращения на $\ln (r_2/r_1)$ получим

$$\lambda = \frac{\ln (a_{r_2}/a_{r_1})}{\ln (r_2/r_1)} = - \frac{\ln (\mu_{r_2}/\mu_{r_1})}{\ln (r_2/r_1)} =$$
$$= 2 - \frac{\ln (t_2/t_1)}{S_{rt_2} - S_{rt_1}} \frac{S_{r_1 t} - S_{r_2 t}}{\ln (r_2/r_1)} =$$

$$= 2(1 - 1/n) = 2(1 - T/T_D) = \text{const}, \qquad (5.3.9)$$

где

$$n = T_D/T = 2i/i_D = \text{const}. \qquad (5.3.10)$$

Полагая в (5.3.9) $r_1=1$, $r_2=r$, приходим к формуле (5.3.1), которая представляет собой закон изменения коэффициента пьезопроводности (уровнепроводности) вдоль координаты r при квазилинейных разновидностях неустановившейся фильтрации. Впервые этот закон был установлен в 1965 г. как эмпирическая зависимость путем анализа результатов опытных кустовых откачек на Михайловском, Лебединском, Стойленском, Яковлевском и других железорудных месторождениях КМА [53, 57].

Зависимость (5.3.1) можно получить и другими способами. Подставим в (3.2.4) вместо S_{rt} его значение из формулы Дюпюи (5.2.2). Учитывая равенство (5.3.10), получаем

$$\ln a_r = 2\left(1 - \frac{1}{n}\right)\ln r + \left(\frac{A_t}{i} - \ln 2{,}25t\right) = \ln a_r^0 + \lambda \ln r, \qquad (5.3.11)$$

где

$$\ln a_r^0 = A_t/i - \ln 2{,}25t \qquad (5.3.12)$$

— величина логарифма коэффициента пьезопроводности в точке $r=1$.

Эксперименты показывают, что параметры T_D и T, определенные соответственно при установившейся и неустановившейся фильтрации, нередко различны по величине. Поэтому можно допустить, что в общем случае $T_D \neq T$ или $n \neq 1$. Но тогда, согласно (5.3.11) и (5.3.12), $\ln a_r = f(r)$ и приходим к закономерности (5.3.1).

Формулу (5.3.1) можно получить непосредственно из (3.2.4) при формальном предположении, что в рассматриваемых условиях (регулярный режим, пласт однородный по проводимости) $a=f(r)$.

Таким образом, исходя из предположения, что в неограниченном по простиранию и однородном по проницаемости пласте постоянной мощности приведенный радиус влияния R_t является функцией дебита скважины, или допуская существование неравенства $T_D \neq T$, теоретическим путем получаем эмпирическую зависимость (5.3.1), т. е. обнаруживаем, что в зоне квазистационарного режима коэффициент пьезопроводности, определяемый по формуле (3.2.4), имеет одну и ту же величину a_r^0 в каждой точке пласта только при $\lambda=0$, т. е. при линейной разновидности квазистационарной фильтрации, соответствующей значению дебита скважины $Q=Q_0$. Следова-

тельно, наше допущение о непропорциональности понижений уровня в различных точках пласта величинам дебита соответствует действительности во всех случаях, когда имеют место функции $T_D=f(Q)$, $T=f(Q)$, $R_t=f(Q)$ или закономерность (5.3.1). Это говорит о том, что с точки зрения линейной теории неустановившейся фильтрации существование функции $R_t=f(Q)$ равносильно наличию зависимости параметров T_D и T от интенсивности возмущения Q. Следовательно, критерием, указывающим на линейность или квазилинейность неустановившейся фильтрации, могут служить индикаторные кривые $S_{rt}=f(Q)$, построенные для различных наблюдательных скважин, или величины поправок λ или n.

Из (5.2.2) и (5.3.2) имеем [66, 67]

$$a_r = a_r^0 \exp[\lambda (A_t - S_{rt})/i_D]. \qquad (5.3.13)$$

Функция (5.3.13) является общим интегралом дифференциального уравнения

$$\frac{\lambda}{i_D} = \frac{1}{a}\frac{da}{dS}, \qquad (5.3.14)$$

которое аналогично уравнению состояния капельно-сжимаемой жидкости

$$\beta_{ж} = \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dS}, \qquad (5.3.15)$$

где ρ — плотность жидкости; S — изменение понижения уровня или пластового давления [111].

Используя установленную аналогию и равенство (5.3.1), получаем закон изменения плотности жидкости вдоль координаты r при осесимметричной фильтрации [66]

$$\rho_r = \rho_r^0 r^{\nu}, \qquad (5.3.16)$$

где ρ_r — плотность жидкости в точке r при данном Q; ρ_r^0 — то же в точке $r=1$; $\nu = \beta_{ж} i_D$ — угловой коэффициент графика $\ln \rho_r = f(\ln r)$.

Обобщим полученные результаты.

Пусть в условиях, удовлетворяющих выражениям (5.2.1) и (5.2.2), имеет место закономерность (5.3.1), в которой величина a_r рассчитывается по формуле (3.2.4) и представляет собой значение коэффициента пьезопроводности a в точке r. Это дает основание величину a в формуле (3.2.1) заменить равной ей величиной a_r согласно закономерности (5.3.1). В результате такой замены получим [53, 57, 61, 66, 67, 75]

$$S_{rt} = \frac{Q}{4\pi T}\left[-\mathrm{Ei}\left(-\frac{r^2}{4a_r t}\right)\right] = \frac{Q}{4\pi T}\left[-\mathrm{Ei}\left(-\frac{r^{2-\lambda}}{4a_r^0 t}\right)\right]. \tag{5.3.17}$$

При $\lambda=0$, т. е. для линейной разновидности неустановившейся фильтрации, из (5.3.17) получаем формулу (3.2.1).

Таким образом, чтобы установить наличие или отсутствие эффекта квазилинейности, коэффициент пьезопроводности необходимо определять с использованием формулы (3.2.4) не менее чем по двум наблюдательным скважинам, расположенным в зоне регулярного режима. Определив значения a_r в нескольких точках пласта r, по формуле (5.3.9) рассчитываем величину параметра λ и далее прогноз осушительного действия вертикального дренажа ведем с учетом полученной величины λ. При ненулевых значениях λ используем зависимость (5.3.17) и тем самым избегаем значительных погрешностей, которые возникают при расчете дебита и неустановившейся депрессионной поверхности в случае пренебрежения величиной этого параметра [66].

Обобщенная формула Тейса (5.3.17) представляет собой автомодельное решение задачи Тейса для квазилинейного уравнения параболического типа [61, 66, 67]

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial S}{\partial r} = \frac{(2-\lambda)^2}{4a_r^0 r^\lambda}\frac{\partial S}{\partial t}, \tag{5.3.18}$$

которое при $\lambda=0$ переходит в линейное уравнение теплопроводности (4.3.4).

Для доказательства предположим сначала, что в рассматриваемых условиях существует мгновенный сток. Следуя Лапласу, для этого стока решение уравнения (5.3.18) получим в виде

$$S_{rt} = \frac{i}{t}\exp\left(-r^{2-\lambda}/4a_r^0 t\right). \tag{5.3.19}$$

От мгновенного стока перейдем к скважине с дебитом $Q=\mathrm{const}$. Тогда, используя функцию мгновенного стока (5.3.19) и метод У. Томсона (Кельвина) [111], решение уравнения (5.3.18) получим в виде (5.3.17).

Решение рассматриваемой задачи Тейса для уравнения (5.3.18) можно получить также методом П. Я. Полубариновой-Кочиной [109, 110]. Для этого введем новую функцию

$$\eta = r^{2-\lambda}/4a_r^0 t, \tag{5.3.20}$$

которая при $\lambda=0$ переходит в известную подстановку Больцмана. Поскольку

$$\frac{\partial S}{\partial t}=\frac{\partial S}{\partial \eta}\,\frac{\partial \eta}{\partial t}=-\frac{\eta}{t}\,\frac{\partial S}{\partial \eta},$$

$$\frac{\partial S}{\partial r}=\frac{\partial S}{\partial \eta}\,\frac{\partial \eta}{\partial r}=\frac{(2-\lambda)\,r^{1-\lambda}}{4a_r^0\,t}\,\frac{\partial S}{\partial \eta},$$

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2}=\frac{\partial^2 S}{\partial \eta^2}\left(\frac{\partial \eta}{\partial r}\right)^2+\frac{\partial S}{\partial \eta}\,\frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2}=$$

$$=\eta\,\frac{\partial^2 S}{\partial \eta^2}\,\frac{(2-\lambda)^2}{4a_r^0\,r^{\lambda}\,t}+\frac{\partial S}{\partial \eta}\,\frac{(2-\lambda)(1-\lambda)}{4a_r^0\,r^{\lambda}\,t},$$

то, переходя в (5.3.18) к новой переменной, получаем

$$\eta\,\frac{\partial^2 S}{\partial \eta^2}+(1+\eta)\,\frac{\partial S}{\partial \eta}=0. \tag{5.3.21}$$

Общий интеграл уравнения (5.3.21) имеет вид

$$S_{rt}=c_1\int_{\eta}^{\infty}\frac{1}{\eta}\exp(-\eta)\,d\eta+c_2. \tag{5.3.22}$$

Вводя обозначение интегральной показательной функции

$$\mathrm{Ei}\left(-\frac{r^{2-\lambda}}{4a_r^0\,t}\right)=-\int_{r^{2-\lambda}/4a_r^0 t}^{\infty}\frac{1}{\eta}\exp(-\eta)\,d\eta,$$

перепишем (5.3.22)

$$S_{rt}=c_1\left[-\mathrm{Ei}\left(-\frac{r^{2-\lambda}}{4a_r^0\,t}\right)\right]+c_2. \tag{5.3.23}$$

Учитывая граничные и начальные условия задачи Тейса, определяем значения постоянных c_1 и c_2 и приходим к решению (5.3.17).

Очевидно, при $\lambda=0$ квазилинейное уравнение (5.3.18) переходит в линейное дифференциальное уравнение неустановившейся фильтрации (4.3.4), а его решение (5.3.17) — в решение (3.2.1) уравнения (4.3.4). Кроме того, при $\lambda=0$ имеет место аналогичный переход от фундаментального решения (5.3.19) уравнения (5.3.18) к фундаментальному решению

$$S_{rt} = \frac{i}{t} \exp(-r^2/4a_r^0 t) \qquad (5.3.24)$$

уравнения (4.3.4). Это доказывает, что квазилинейные дифференциальные уравнения типа

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \mp Q(t) = f(\lambda) \frac{1}{a} \frac{\partial S}{\partial t}, \qquad (5.3.25)$$

частным случаем которых является уравнение (5.3.18), можно рассматривать как обобщенные уравнения неустановившегося движения подземных вод. Здесь $Q(t)$ — суммарная интенсивность дренажных устройств.

При выводе обобщенной формулы (5.3.17) мы предполагали, что исследуемый пласт неограничен по простиранию. Теперь допустим, что нам неизвестно, на каком удалении от возмущающей скважины находится контур питания. В этих условиях данные опытной кустовой откачки будем обрабатывать с помощью формулы (5.3.17). Пусть в каждой точке пласта r зависимость понижения уровня от логарифма времени прямолинейна, но имеет угловой коэффициент

$$i_r = \frac{S_{rt_2} - S_{rt_1}}{\ln(t_2/t_1)} = \frac{Q}{4\pi T_r} = f(r), \qquad (5.3.26)$$

где i_r — угловой коэффициент графика $S_{rt} = f(\ln t)$ в точке r; T_r — величина проводимости по Тейсу в точке r.

Применим (5.3.26) для двух точек пласта:

$$i_{r_2} - i_{r_1} = Q(1/T_{r_2} - 1/T_{r_1})/4\pi = [(S_{r_1 t_1} - S_{r_2 t_1}) - (S_{r_1 t_2} - S_{r_2 t_2})]/\ln(t_2/t_1). \qquad (5.3.27)$$

По Дюпюи

$$T_{Dt} = \frac{Q}{2\pi} \frac{\ln(r_2/r_1)}{S_{r_1 t} - S_{r_2 t}} = \frac{Q}{2\pi i_{Dt}}, \qquad (5.3.28)$$

где T_{Dt} — величина проводимости по Дюпюи в момент времени t; i_{Dt} — угловой коэффициент графика $S_{rt} = f(\ln r)$ в момент времени t.

Учитывая (5.3.28), из (5.3.27) получаем

$$\alpha = \frac{i_{r_2} - i_{r_1}}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{Q}{4\pi \ln(r_2/r_1)} \left(\frac{1}{T_{r_2}} - \frac{1}{T_{r_1}} \right) = \frac{Q}{2\pi \ln(t_2/t_1)} \left(\frac{1}{T_{Dt_1}} - \frac{1}{T_{Dt_2}} \right) = \text{const}. \qquad (5.3.29)$$

Из (5.3.29) имеем [61]

$$i_r = i_r^0 + \alpha \ln r, \tag{5.3.30}$$

$$T_r = T_r^0 + \alpha^* \ln r, \tag{5.3.31}$$

$$i_{Dt} = i_{Dt}^0 + \gamma \ln t, \tag{5.3.32}$$

$$T_{Dt} = T_{Dt}^0 + \gamma^* \ln t, \tag{5.3.33}$$

где i_r^0, T_r^0 — величины параметров i_r, T_r в точке $r = 1$; i_{Dt}^0, T_{Dt}^0 — величины параметров i_D и T_D в момент времени $t = 1$; α, α^* — тангенсы углов наклона графиков $i_r = f(\ln r)$ и $T_r = f(\ln r)$ к оси $\ln r$; γ, γ^* — угловые коэффициенты графиков $i_{Dt} = f(\ln t)$ и $T_{Dt} = f(\ln t)$.

При квазистационарном режиме неустановившаяся депрессионная поверхность передвигается параллельно самой себе и, следовательно, величина параметра i_r в каждой точке пласта постоянна и имеет одно и то же значение. На этом основании, полагая в (5.3.29) $i_r = \text{const} \neq f(r)$, получаем условия, которые имеют место при квазистационарной фильтрации:

$$\begin{gathered} \alpha = 0,\ i_r = i_r^0 = \text{const} \neq f(r), \\ \alpha^* = 0,\ T_r = T_r^0 = \text{const} \neq f(r), \\ \gamma = 0,\ i_{Dt} = i_{Dt}^0 = \text{const} \neq f(t), \\ \gamma^* = 0,\ T_{Dt} = T_{Dt}^0 = \text{const} \neq f(t). \end{gathered} \tag{5.3.34}$$

Анализ формул (5.3.29)—(5.3.33) показывает, что в натурных условиях могут возникать три характерных режима перераспределения уровней: первый ($\alpha < 0$), второй, или квазистационарный ($\alpha = 0$), и третий ($\alpha > 0$). Второй режим имеет место до момента подхода депрессии к границе пласта, после чего депрессионная поверхность становится круче или положе и перераспределение напора происходит по законам первого или третьего режимов [53, 61]. Если в этих условиях расчет $\ln a_r$ вести по формуле (3.2.4), то получаем функцию

$$\ln a_r = \frac{S_{rt}}{i_r} - \ln \frac{2{,}25t}{r^2} = \frac{A - i_{Dt}^0 \ln r}{i_r^0 + \alpha \ln r} - \ln \frac{2{,}25}{r^2}, \tag{5.3.35}$$

где A — понижение уровня в точке $r = 1$ в момент времени $t = 1$.

Выражение (5.3.35) в координатах $\ln a_r - \ln r$ будет представлять собой уравнение прямой линии при условии

$$P = i_{Dt}^0 \, i_r^0 / \alpha A = 1. \qquad (5.3.36)$$

Из (5.3.1) и (5.3.36) следует, что при первом и втором режимах возникают по три разновидности перераспределения уровней, характеризующиеся своими законами изменения коэффициента пьезопроводности вдоль оси r: первая ($P < 1$, $\lambda < 0$, $n < 1$), вторая ($P = 1$, $\lambda = 0$, $n = 1$) и третья ($P > 1$, $\lambda > 0$, $n > 1$) [53, 61].

Характер графиков $\ln a_r = f(\ln r)$, присущих рассмотренным режимам, приведен в работе [61] и для первых двух режимов представлен на рис. 5.12.

Пользуясь формулой (5.3.17), рассмотрим вопрос о скорости распространения возмущений постоянной интенсивности $S_{rt} = \text{const}$ в горизонтальном направлении. Из (5.3.17) получим [53, 56, 69]

$$\frac{4\pi T S_{rt}}{Q} = \ln \frac{2{,}25 a_r^0 t_1}{r_1^{2-\lambda}} = \ln \frac{2{,}25 a_r^0 t_2}{r_2^{2-\lambda}} = \cdots = \text{const}.$$

Чтобы определить скорость распространения условной площади депрессии, преобразуем эту константу:

$$a_s = 2{,}25\pi a_r^0 \exp(-4\pi TS/Q) =$$

$$= \frac{\pi r_1^{2-\lambda}}{t_1} = \frac{\pi r_2^{2-\lambda}}{t_2} = \cdots = \text{const}, \qquad (5.3.37)$$

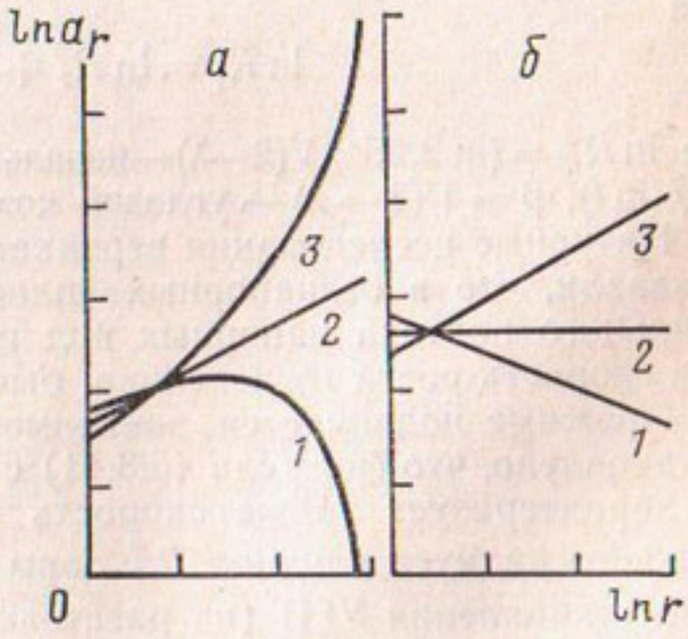


Рис. 5.12. Характер кривых $\ln a_r = f(\ln r)$ при первой (*1*), второй (*2*) и третьей (*3*) разновидностях: *а* — первого режима неустановившейся фильтрации; *б* — второго (квазистационарного) режима неустановившейся фильтрации

где a_s — условный коэффициент пьезопроводности, характеризующий скорость распространения условной площади депрессии в плане или, иначе, характеризующий скорость распространения возмущения интенсивностью $S=S_{rt}=\text{const}$ в горизонтальной плоскости [53, 56].

Пусть на один и тот же момент времени $t=\text{const}$ волны возмущения интенсивностью S_1 и S_2 достигли расстояний соответственно r_2 и r_1. Тогда из (5.3.37), учитывая (5.3.1), имеем

$$2-\lambda=\frac{\ln a_{s1}-\ln a_{s2}}{\ln (r_2/r_1)}=\frac{\ln a_s^0-\ln a_s}{\ln (R_t/r)}=\frac{(\ln a_s^0-\ln a_s)\,i_D}{S},$$

откуда получаем зависимость условного коэффициента пьезопроводности a_s от интенсивности S распространяющейся волны возмущения [61, 69]

$$a_s=a_s^0\exp(-\varepsilon S), \tag{5.3.38}$$

где

$$a_s^0=\pi R_t^{2-\lambda}/t=2{,}25\,\pi a_r^0 \tag{5.3.39}$$

— условный коэффициент пьезопроводности, характеризующий скорость распространения волны возмущения нулевой интенсивности, т. е. для площади $\pi R_t^{2-\lambda}$; $\varepsilon=(2-\lambda)/i_D=\text{const}$ — угловой коэффициент графика $\ln a_s=f(S)$.

Из (5.3.39) получаем формулу для расчета величины неустановившегося радиуса влияния в момент времени t [61, 67, 69]

$$R_t=(2{,}25a_r^0\,t)^{1/(2-\lambda)}=(a_s^0\,t/\pi)^{1/(2-\lambda)}=f(Q) \tag{5.3.40}$$

или

$$\ln R_t=\ln R_t^0+\beta\ln t, \tag{5.3.41}$$

где $\ln R_t^0=(\ln 2{,}25a_r^0)/(2-\lambda)$ — начальный отрезок прямой $\ln R_t=f(\ln t)$; $\beta=1/(2-\lambda)$ — угловой коэффициент этой прямой.

Натурные исследования вертикального дренажа в Полесье показали, что в безнапорных пластах этого региона из-за обильного подтока напорных вод из подстилающих горизонтов скорость роста R_t невелика, быстро затухает и в регулярном режиме подчиняется зависимости (5.3.40). Кроме того, установлено, что формула (5.3.41) с высокой степенью точности характеризует также скорость распространения действительного радиуса влияния R_t^* зоны начинающегося снижения и восстановления УГВ (на расстоянии R_t^* по определению величина снижения или восстановления УГВ на любой момент

времени t равна нулю). Результаты одного из таких опытов приведены на рис. 5.13 и в табл. 5.1.

Опытные кустовые откачки показывают [53, 67, 76], что в зависимости от состояния и устойчивости граничных условий водоносного горизонта параметр i, определяемый по формуле (3.2.2) в зоне регулярного режима, с изменением дебита изменяется по различным законам. Нередки случаи, когда функция $i=f(Q)$ имеет вид (рис. 4.10)

$$i_Q = i_Q^0 + bQ, \tag{5.3.42}$$

где i_Q^0, b — аппроксимационные константы графика $i = f(Q)$.

Характер перераспределения уровней и изменения параметров λ, n, $\lg a_r$ при увеличении интенсивности возмущения можно проследить на примере, приведенном в работах [67, 76]. Наблюдательные скважины r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 расположены на расстоянии соответственно 1, 10, 50, 200, 1000 м от возмущающей скважины радиуса $r_0=0{,}08$ м, которая пускалась в эксплуатацию с различными постоянными дебитами. При каждом дебите замеры понижения пьезометрического уровня (падения пластового давления) велись одновременно во всех скважинах в течение 10 сут. Методика обработки опытных данных общепринятая [8, 13, 95, 118, 120]: определение параметров i и i_D производилось соответственно по графикам $S_{rt}=f(\ln t)$ и $S_{rt}=f(\ln r)$, т. е. по формулам (3.2.2) и (5.2.5); коэффициент пьезопроводности a_r во всех скважинах r рассчитывался по известной формуле (3.2.5). При этом для анализа перераспределения уровня в пласте возмущающая скважина r_0 не учитывалась ввиду наличия у ее стенки пьезометрического

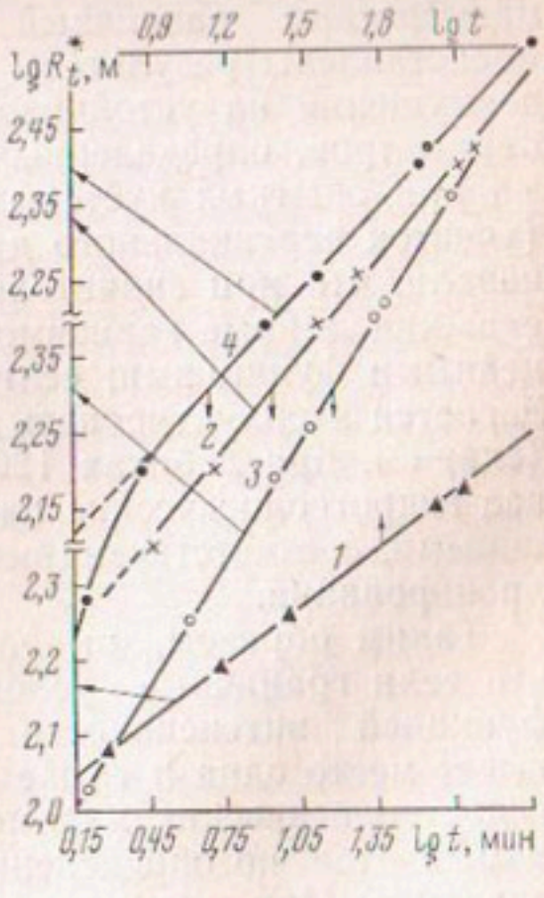


Рис. 5.13. Характер развития во времени действительного радиуса влияния зоны начинающегося восстановления УГВ нулевой интенсивности ($S_{rt}=0$) после остановок дренажной скв. 8, работавшей до этого с дебитами 45 (*1*), 60 (*2*), 100 (*3*) и 128 м³/ч (*4*)

Таблица 5.1

Уравнения скорости распространения волны возмущения нулевой интенсивности при пуске и остановке дренажной скв. 8 на территории ПОМС (R_t^* — в м, t — в мин)

Q, м³/ч	Опытные закономерности роста $\lg R_t^*$	
	при снижении УГВ	при восстановлении УГВ
45	$\lg R_t^* = 1{,}70 + 0{,}5 \lg t$	$\lg R_t^* = 1{,}90 + 0{,}25 \lg t$
100	$\lg R_t^* = 1{,}66 + 0{,}97 \lg t$	$\lg R_t^* = 1{,}67 + 0{,}544 \lg t$

разрыва уровней и вытекающих отсюда особенностей [53, 57, 64]. Пример соответствует результатам опытных кустовых откачек из напорных (батских) горизонтов Михайловского железорудного месторождения КМА (скв. 2ц, 3ц, 4ц и др. [53, 57, 82]). Здесь имеет место соотношение (5.3.42) и граничные условия являются устойчивой функцией интенсивности возмущения. Построенные по данным примера графики $\lambda = f(Q)$, $n = f(Q)$ и $\lg a_T = f(Q)$ приведены на рис. 5.14.

При граничных условиях, являющихся неустойчивой функцией интенсивности возмущения, рассмотренные графики приобретают различный вид. На рис. 1.12, 1.13, 4.7—4.11 представлены результаты изучения влияния интенсивности возмущения на устойчивость некоторых гидрогеологических параметров, определенных в зоне квазистационарного режима при опытных кустовых откачках из дренажных скважин (участок вертикального дренажа на ПОМС). Эти опыты показали, что при значительных интервалах изменения дебита скважин данные зависимости можно аппроксимировать линейными функциями; если же дренажные скважины предполагается эксплуатировать в каком-то одном режиме загрузки (скажем, при дебитах 120—140 м³/ч на одну скважину), то все гидрогеологические параметры следует принимать постоянными, соответствующими запроектированной интенсивности дренирования.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что если граничные условия пласта являются устойчивой функцией интенсивности возмущения, т. е. если все время имеет место одна и та же зависимость $R_t = f(Q)$, то величины гидрогеологических параметров (в том числе и критерий λ) изменяются по определенному закону с изменением дебита скважин. При этом во многих пластах, аналогом которых

является рассмотренный выше неограниченный пласт [67, 76], график функции $\lambda=f(Q)$ пересекает ось Q только один раз, т. е. только при одном значении $Q=Q_0$, когда $\lambda=0$ и перераспределение напоров происходит согласно теории линейной фильтрации (рис. 5.14). За пределами полосы $Q=Q_0$, т. е. при $Q<Q_0$ (здесь $\lambda>0$, $n>1$) и $Q>Q_0$ (здесь $\lambda<0$, $n<1$), имеют место квазилинейные разновидности неустановившейся фильтрации (рис. 5.8). Следовательно, в строгой постановке неустановившаяся линейная фильтрация ($\lambda=0$) должна рассматриваться как редкий случай неустановившегося движения подземных вод. В общем случае это движение подчиняется теории неустановившейся квазилинейной фильтрации, когда критерий квазилинейности фильтрационного потока λ принимает ненулевые значения, а дифференциальные уравнения (5.3.25), характеризующие такие потоки, являются неустойчивыми (по отношению к интенсивности возмущения) параметрическими уравнениями параболического типа, роль параметра квазилинейности в которых играет коэффициент $f(\lambda)=\varphi(Q)$ при скорости изменения уровня $\partial S/\partial t$. И только в некоторой узкой полосе значений расхода потока $Q=Q_0$, когда $f(\lambda)=1$, квазилинейные разновидности неустановившейся фильтрации автоматически переходят в известную (линей-

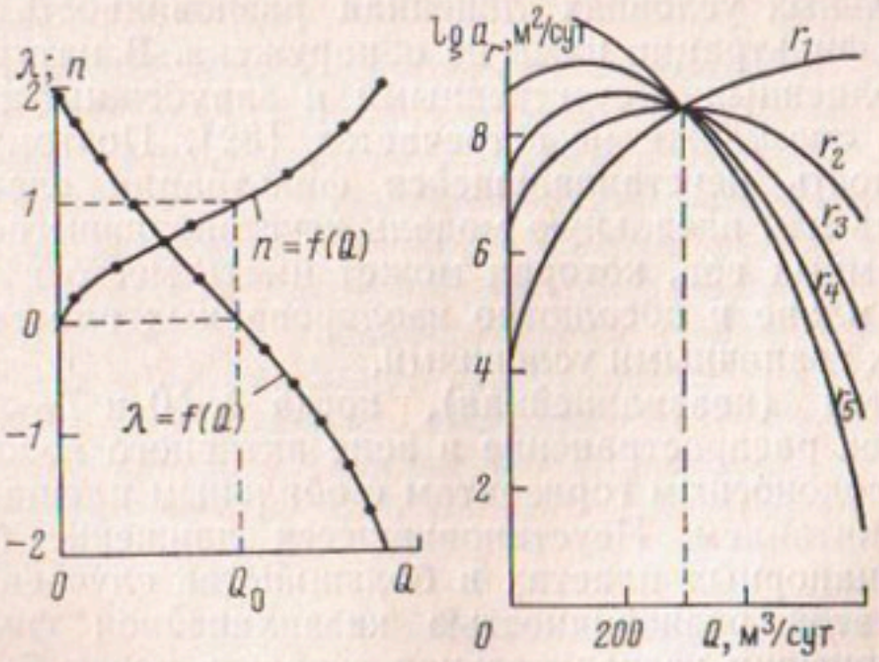


Рис. 5.14. Влияние интенсивности возмущения на изменение параметров λ, n, $\lg a_r$ при режимах питания и разгрузки пласта, являющихся функцией интенсивности возмущения (по данным табл. 1 из [67, 76])

ную) разновидность неустановившейся фильтрации, а характеризующие их неустойчивые параметрические уравнения (5.3.18) или (5.3.25) — в линейное уравнение теплопроводности (4.3.4), которое в свою очередь также неустойчиво и за пределами указанной полосы $Q=Q_0$ взаимно переходит в уравнения (5.3.18) или (5.3.25). Эти уравнения показывают, что в зависимости от вида и степени устойчивости (по отношению к Q) граничных условий водоносных горизонтов в природе наблюдаются три разновидности неустановившейся фильтрации, характеризующиеся собственными законами изменения функций $a_r=f(r)$ и $R_t=f(t)$ и различным соотношением между параметрами T_D и T.

1. Первая (квазилинейная), когда $0<\lambda<2$ и $T_D>T$. Обычно встречается в напорных пластах, которые имеют слабую гидравлическую связь со смежными пластами и нередко сами являются областью питания для других горизонтов. Поэтому скорость роста R_t в этих условиях наибольшая и величины коэффициента пьезопроводности возрастают с увеличением r.

2. Вторая (линейная), когда $\lambda=0$ и $T_D=T$. Только здесь коэффициент пьезопроводности a_r и упругая водоотдача μ_r имеют одни и те же величины a_r^0 и μ_r^0 во всех точках r зоны квазистационарного режима и величина приведенного радиуса влияния $R_t=1{,}5\sqrt{a_r^0 t}$ не зависит от интенсивности возмущения и режима водного питания пласта (или критерия λ).

В реальных условиях линейная разновидность неустановившейся фильтрации нами не обнаружена. В натурных опытах, выполненных отечественными и зарубежными исследователями, она также не встречается [82]. Поэтому данную разновидность неустановившейся фильтрации следует рассматривать как идеальную модель неустановившегося движения подземных вод, которая может иметь место в неограниченных в плане и абсолютно изолированных пластах, не обладающих граничными условиями.

3. Третья (квазилинейная), когда $\lambda<0$ и $T_D<T$. Имеет наибольшее распространение в зоне активного водообмена и присуща водоносным горизонтам с обильным площадным или боковым питанием. Неустановившееся движение грунтовых вод в безнапорных пластах в большинстве случаев характеризуется этой разновидностью квазилинейной фильтрации, которой присущи незначительная скорость роста R_t и уменьшение коэффициента уровнепроводности с увеличением r. Натурными опытами установлено, что вертикальный дренаж в зоне Полесья работает исключительно в условиях третьей разновидности неустановившейся фильтрации (рис. 1.8—1.11,

5.10, 5.11, 5.13). При пуске дренажных скважин в эксплуатацию с дебитами 100—140 м³/ч величина поправки λ изменяется соответственно от —2 до —4 и в среднем составляет —3. Это свидетельствует о значительном подтоке подземных вод мело-мергельного и других нижележащих горизонтов в дренируемый и указывает на наличие прямой зависимости между интенсивностью дренирования и величиной подтока (перетекания) из более глубоких водоносных горизонтов в осушаемый.

Третья разновидность регулярного режима обнаружена также в опытах Л. К. Венцеля, М. С. Хантуша, А. К. Уотта, В. М. Шестакова, Т. Д. Стрельцовой, Л. С. Язвина, Ф. М. Бочевера, Б. Г. Самсонова и других исследователей [82].

Вопрос об учете или неучете параметра λ при гидрогеологических расчетах вертикального дренажа имеет принципиальное значение. Исследования показали [53, 66], что если при наличии первой или третьей разновидностей неустановившейся фильтрации пренебрегать существованием параметра λ и расчет вертикального дренажа вести по формуле (3.2.1), то погрешность в оценке дебита скважин и нормы осушения достигает $\pm(80—200)\%$ и более и зависит от величины параметра λ. Таким образом, независимо от того, какой физический смысл может быть придан обнаруженному закону (5.3.1) и параметру λ, их необходимо учитывать в фильтрационных расчетах неустановившейся напорной и свободной фильтрации.

Возникновение квазилинейных разновидностей регулярного режима можно объяснить следующим образом.

Пусть мы имеем неограниченный в плане и абсолютно изолированный пласт, удовлетворяющий идеальной (линейной) модели регулярного режима. В этом пласте с увеличением интенсивности возмущения соотношение скоростей $\partial S/\partial r=(\partial S/\partial t)/(\partial r/\partial t)$ распространения уровня в вертикальной $(\partial S/\partial t)$ и горизонтальной $(\partial r/\partial t)$ плоскостях (направлениях) остается постоянным, поскольку понижение уровня в каждой точке пласта удовлетворяет формуле (5.3.4) и начинается одновременно во всей области фильтрации. Действительно, из (3.2.1) имеем

$$\partial S/\partial t = (i/t)\exp(-r^2/4at), \qquad (5.3.43)$$

$$\partial S/\partial r = (2i/r)\exp(-r^2/4at), \qquad (5.3.44)$$

откуда получаем, что горизонтальная составляющая скорости распространения пониженного уровня

$$\partial r/\partial t = r/2t \qquad (5.3.45)$$

не зависит от интенсивности возмущения, в то время как скорость снижения уровня (вертикальная составляющая скорости распространения возмущений) является функцией Q. В этих условиях соотношение между угловыми коэффициентами графиков площадного i_D и временного i прослеживания изменения уровня остается неизменным $i_D=2i$ при любой интенсивности возмущения и имеет место равенство проводимостей $T_D=T$.

Теория граничных условий реальных пластов показывает [68, 121], что водоносные горизонты всегда ограничены в плане и гидравлически взаимосвязаны с другими горизонтами. На этом основании предположим, что исследуемый пласт имеет площадное питание, зависящее от интенсивности возмущения. Подток подземных вод из смежных горизонтов увеличивает водообильность исследуемого пласта по сравнению с водообильностью идеального пласта, представленного той же пористой средой, но не имеющего питания. В этих условиях скорости роста R_t и снижения уровня в реальном пласте при том же дебите будут более замедленными по сравнению со скоростями в идеальном пласте. Это приводит к тому, что параметры i и T реального пласта становятся соответственно меньше и больше аналогичных параметров идеального пласта.

С увеличением интенсивности возмущения эта разница возрастает и нарушается идеальное соотношение между скоростями распространения уровня в вертикальных и горизонтальных плоскостях. В результате появляются неравенства $2i<i_D$, $T_D<T$, $\lambda<0$, свидетельствующие о том, что неустановившееся движение подземных вод в исследуемом пласте протекает согласно третьей разновидности квазилинейной фильтрации.

Наличие утечки пластовой жидкости из возмущенного горизонта через «окна» в водоупорах и более проницаемые напластования, интенсивное испарение с поверхности грунтовых вод и другие проявления отсоединяющихся потоков приводят к возникновению первой разновидности квазилинейной фильтрации. В таких гидродинамических условиях $\lambda>0$, $T_D>T$ и перераспределение напоров (в частности, рост приведенного радиуса влияния R_t) происходит значительно быстрее, нежели в пластах с интенсивным питанием, в которых движение подземных вод характеризуется третьей разновидностью квазистационарного режима.

Таким образом, в гидрогеологическом отношении параметр λ является обобщенным показателем интенсивности площад-

ного питания и разгрузки пласта и, следовательно, отражает несоответствие между граничными условиями задачи Тейса и реальными граничными условиями пласта при данном Q. Иначе говоря, параметр λ — это эмпирическая поправка к основной формуле неустановившейся линейной фильтрации к скважинам (3.2.1), компенсирующая расхождение между этой формулой и действительной картиной перераспределения скоростей и напоров в пласте. При устойчивых граничных условиях и небольшом диапазоне изменения интенсивности возмущения параметр λ сохраняет постоянное значение.

Введение поправки λ в формулу Ч. В. Тейса позволяет значительно расширить область применения этой формулы и раскрывает гидродинамическую картину исследуемого потока. Кроме того, применение обобщенной формулы Ч. В. Тейса (5.3.17) в обратных методах теории фильтрации дает возможность получить более достоверные значения гидрогеологических параметров и оценить величину перетекания из смежных горизонтов в возмущенный и наоборот. Действительно, из (5.2.6), (5.3.9) и (5.3.17) получаем многократное равенство

$$Q = 2\pi T_D \frac{S_{r_1 t} - S_{r_2 t}}{\ln(r_2/r_1)} = 4\pi T \frac{S_{r t_2} - S_{r t_1}}{\ln(t_2/t_1)} =$$

$$= 2\pi T_D (2-\lambda) \frac{S_{r t_2} - S_{r t_1}}{\ln(t_2/t_1)} = \frac{4\pi T}{2-\lambda} \frac{S_{r_1 t} - S_{r_2 t}}{\ln(r_2/r_1)}, \qquad (5.3.46)$$

раскрывающее роль параметров T_D и T в оценке дебита скважины Q. Здесь два первых выражения представляют собой соответственно формулы Ж. Дюпюи и Ч. В. Тейса, два последующих — зависимости по расчету Q с учетом поправки λ.

В первом приближении величину перетекания из смежных горизонтов в дренируемый можно определить с помощью равенства (5.3.46) следующим образом. Если Q_0 — расход потока без перетекания (или без наличия присоединяющихся или отсоединяющихся путевых потоков), равный дебиту скважины в абсолютно изолированном (идеальном) пласте, и ΔQ — величина суммарного перетекания, то $Q = Q_0 + \Delta Q$, где Q — дебит скважины в реальном пласте, равный максимальному расходу потока переменной массы в сечении r_0, т. е. на стенке возмущающей скважины.

Величину Q_0 определим исходя из допущения, что перетекание сказывается прежде всего на скорости снижения и восстановления уровня, т. е. на величинах параметров i и T, определяемых по формуле (3.2.2). Но так как при отсутствии перетекания при той же скорости снижения (восстановления)

уровня наблюдалось бы равенство $T=T_D$, то, заменяя в (3.2.2) или (5.3.46) T на T_D, получаем

$$Q_0 = 4\pi T_D i. \tag{5.3.47}$$

Вычитая из (5.3.46) величину Q_0 и учитывая (5.3.10), находим

$$\Delta Q = 4\pi i (T - T_D) = Q(1-n) = Q\lambda/(\lambda - 2). \tag{5.3.48}$$

Возмущенные пласты нередко характеризуются двусторонним, т. е. знакопеременным, водообменом со смежными пластами, когда в одних местах области фильтрации жидкость из смежных пластов поступает в возмущенный пласт ($\Delta Q_п$), а в других, наоборот, жидкость из возмущенного пласта перетекает в сопредельные (ΔQ_0). В этих случаях параметр λ также характеризует водобалансовый режим возмущенного пласта. К примеру, выполаживание депрессионной кривой и уменьшение скорости ее снижения в центре возмущения свидетельствуют о том, что в удаленных областях возмущения наблюдается отток жидкости ΔQ_0 из возмущенного пласта в соседние, а вблизи дрен имеет место приток жидкости $\Delta Q_п$ из смежных пластов в возмущенный. Если при этом $\Delta Q = \Delta Q_п + \Delta Q_0 = 0$, то $\lambda = 0$ и перераспределение напоров в зоне регулярного режима реального пласта, гидравлически связанного с соседними пластами, подчиняется теоретической модели Тейса, выведенной для абсолютно изолированного пласта.

С помощью формулы (5.3.48) определена суммарная величина перетекания из нижележащих водоносных горизонтов в осушаемый безнапорный при работе вертикального дренажа на ПОМС. Результаты расчетов приведены в табл. 5.2 и показывают, что величина перетекания возрастает с увеличением дебита скважин и в среднем составляет 50—65% от дебита скважин. При этом влияние интенсивности дренирования сказывается следующим образом на изменении расчетных значений гидрогеологических параметров:

$$T = 27{,}0 + 0{,}6\,Q, \tag{5.3.49}$$

$$T_D = 27{,}0 + 0{,}08\,Q, \tag{5.3.50}$$

$$T_D = 23{,}4 + 0{,}13\,T, \tag{5.3.51}$$

$$\lambda = -0{,}67 - 0{,}0225\,Q, \tag{5.3.52}$$

где Q — в м³/ч; T, T_D — в м²/ч.

Таблица 5.2

Влияние интенсивности возмущения на изменение гидрогеологических параметров безнапорного пласта (территория ПОМС)

Q, м²/ч	50	60	80	100	120	140	150
T, м²/ч	57,0	62,0	75,0	87,0	99,0	111,0	117,0
T_D, м²/ч	31,0	31,8	33,4	35,0	36,6	38,2	39,0
n	0,54	0,50	0,44	0,40	0,37	0,34	0,33
λ	—1,68	—1,96	—2,49	—2,97	—3,41	—3,81	—4,00
$\Delta Q/Q$	0,46	0,50	0,56	0,60	0,63	0,66	0,67

Данные исследования говорят о том, что водобалансовым расчетам вертикального дренажа необходимо уделять первостепенное внимание, поскольку указанные величины подтока более минерализованных подземных вод из нижележащих водоносных горизонтов в осушаемый безнапорный могут привести к изменению гидрохимического баланса зоны активного дренирования и последующему засолению грунтовых вод и мелиорируемых земель Полесья. В этих условиях оптимальными мелиоративными системами будут системы на механическом водоподъеме, работающие периодически (сезонно) и основанные на использовании дискретной проводящей сети, подземных трубопроводов и дренажных скважин (более подробно этот вопрос изложен в § 7.6).

В заключение дадим общую характеристику эффекта квазилинейности фильтрационного потока, наблюдаемого практически во всех водоносных горизонтах [82].

Сущность данного явления заключается в том, что величины гидрогеологических параметров, определяемые по формулам теории линейной фильтрации, при изменении интенсивности возмущения принимают новые значения, т. е. являются функциями интенсивности возмущения. Неустойчивость фильтрационного потока приводит к тому, что при изменении интенсивности возмущения в водоносных горизонтах возникают две новые (квазилинейные) разновидности неустановившейся фильтрации, характеризующиеся, во-первых, отсутствием ра-

венства между величинами одних и тех же гидрогеологических параметров, определяемых из условий стационарности и нестационарности фильтрационного потока; во-вторых, наличием собственных законов изменения по направлению потока величин коэффициентов пьезопроводности (уровнепроводности) и упругоемкости (запаса или водоотдачи), определяемых по формулам теории линейной фильтрации, и, в-третьих, указывающие на зависимость приведенного радиуса влияния от интенсивности возмущения. Обе разновидности неустановившейся квазилинейной фильтрации разделены между собой известной (линейной) разновидностью неустановившейся фильтрации, характеризующейся в отличие от квазилинейных разновидностей одинаковыми величинами одних и тех же параметров, определяемых из условий стационарности и нестационарности данного потока, и постоянством коэффициентов пьезопроводности и упругоемкости во всей области фильтрации. Все три разновидности неустановившейся фильтрации могут переходить одна в другую согласно диапазону изменения интенсивности возмущения и гидрогеологических условий пласта. По этой причине линейная неустановившаяся фильтрация является частным случаем двух разновидностей квазилинейной фильтрации и в пластах с закономерно неустойчивым режимом питания может наблюдаться только в некоторой узкой полосе значений расхода потока, за пределами которой располагаются области существования квазилинейных разновидностей неустановившейся фильтрации. Аналог таких пластов рассмотрен выше (см. рис. 5.14). Квазилинейные уравнения параболического типа, характеризующие квазилинейные разновидности движения подземных вод, в указанной полосе значений расхода потока, когда наступает линейная неустановившаяся фильтрация, автоматически переходят в линейное уравнение теплопроводности. При $t \to \infty$ обе разновидности неустановившейся квазилинейной фильтрации асимптотически стремятся к установившемуся режиму линейной фильтрации, характеризующейся уравнением Лапласа.

Таким образом, неустойчивость движения подземных вод, возникающая под воздействием изменения интенсивности возмущения, приводит к тому, что в одном и том же водоносном горизонте могут наблюдаться как линейная, так и квазилинейные разновидности неустановившейся фильтрации. Опыт показывает, что нередки случаи, когда при достижимых на практике амплитудах изменения расхода потока в водоносном горизонте могут наблюдаться только те или другие разновидности неустановившейся фильтрации.

Необходимо отметить, что эффект квазилинейности фильтрационного потока проявляется всегда, но неодинаково в различных гидрогеологических и гидродинамических условиях. Наиболее сильное влияние на характер его проявления оказывают водообильность и режим водного питания пласта, а также водно-физические свойства последнего. В целом же изучение особенностей эффекта квазилинейности фильтрационного потока, физическое и теоретическое обоснование его существования представляют собой трудную задачу, для окончательного решения которой потребуются значительные усилия гидромехаников, нефтяников и гидрогеологов.

Научное значение рассмотренного эффекта состоит в уточнении представлений о характере и поведении неустановившегося фильтрационного потока в натурных условиях при изменении интенсивности возмущения пластов; эффект раскрывает сложную картину неустановившегося движения подземных вод и еще более приближает нас к правильному пониманию гидродинамических процессов, происходящих при формировании неустановившегося фильтрационного потока; эффект позволяет уточнить и обобщить известные положения теории линейной неустановившейся и установившейся фильтрации и открывает пути для создания более реальных моделей и уравнений движения жидкостей в пористых средах.

С помощью данного эффекта могут быть рассчитаны и объяснены многие явления, которые находятся в мнимом противоречии с теорией линейной фильтрации и с этих позиций являются парадоксами (сюда можно отнести давно замеченную на практике зависимость величины приведенного радиуса влияния от интенсивности возмущения; разницу в величинах гидрогеологических параметров, получаемых из условий стационарной и нестационарной фильтрации, и т. д.).

Практическое значение эффекта состоит в том, что он позволяет разрабатывать более достоверные прогнозы движения жидкостей в пористых средах и на этой основе рационально вести добычу подземных вод и нефти, а также создавать более совершенные проекты в горном деле (при осушении месторождений и строительстве шахт), гидротехнике и мелиорации, водоснабжении, строительстве фундаментов и подземных сооружений, при гидрогеологических изысканиях и т. д. Поэтому важно знать, как часто на практике встречаются обнаруженные разновидности квазилинейной фильтрации. С этой целью обобщим результаты натурных исследований неустановившегося движения подземных вод к скважинам, выполненных отечественными и зарубежными исследователями.

§ 5.4. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ФИЛЬТРАЦИИ К СКВАЖИНАМ

К настоящему времени опубликовано множество данных опытных кустовых откачек из напорных и безнапорных пластов, в которых опытные значения S_{rt} удовлетворяют закономерностям (5.2.1) и (5.2.2) и, таким образом, на графиках временного и площадного прослеживания изменения уровня образуют семейства параллельных прямых с угловыми коэффициентами соответственно i и i_D.

Наиболее представительные данные таких опытов содержатся в работах Л. К. Венцеля, Е. В. Бранда, Г. П. Круземана и Н. А. де Риддера, Л. Дж. Андерсена и С. З. Хамана, Г. Дж. Криза, М. С. Хантуша, М. Боннэ, Ш. П. Неймана, А. К. Уотта, Б. Г. Самсонова, Л. С. Язвина, автора и других исследователей [8, 13, 53, 57, 82].

Для обработки результатов этих опытов во всех работах использовались формула (3.2.1) и вытекающие из нее графики (5.2.1)—(5.2.3), т. е. расчет гидрогеологических параметров производился по зависимостям (3.2.5), (3.2.6), (5.2.6) и (5.2.7). Поэтому и мы, используя эту методику, проанализируем данные опытных откачек, удовлетворяющие условиям (5.2.1) и (5.2.2). Это значит, что будем рассматривать только кустовые откачки, в которых:

а) для различных наблюдательных скважин (точек пласта r) графики временного прослеживания изменения уровня $S_{rt}=f(\ln t)$ прямолинейны и параллельны друг другу;

б) для различных моментов времени неустановившиеся депрессионные поверхности $S_{rt}=f(\ln r)$ также прямолинейны и параллельны друг другу.

Опыты Л. К. Венцеля [139] выполнены особенно тщательно и проводились с целью изучения осушительного действия дренажных скважин в безнапорных пластах, сложенных песчано-гравелистыми отложениями. Л. К. Венцель привел фактические величины понижения уровня S'_{rt}. Отсчет S'_{rt} производился от абсолютной отметки статического уровня ∇_{cr} в данной наблюдательной скважине r. Поскольку во всех опытах статический уровень в различных точках пласта r находился на разных отметках, для анализа использованы приведенные (или расчетные) величины понижения уровня S_{rt}, отсчитываемые от какой-либо одной отметки $\nabla_{\text{п}}$, за которую рекомендуется принимать отметку среднего положения статического уровня в данном створе. Перевод S'_{rt} в S_{rt} произведен по формуле [53, 82]

Таблица 5.3

Результаты опытной кустовой откачки вблизи Скоттсблаффа
($\lambda = -2{,}5$; $n = 0{,}444$; $T_D = 12{,}1$ фут²/мин; $T = 27{,}3$ фут²/мин; t — в мин)

lg t	S_{rt}, фут, по скважинам							
	1	2	3	4	5	6	7	8
2,0	5,61	3,74	2,81	2,26	1,41	0,76	0,26	—0,24
2,1	5,72	3,85	2,92	2,37	1,52	0,87	0,37	—0,13
2,2	5,83	3,96	3,03	2,48	1,63	0,98	0,48	—0,02
2,3	5,94	4,07	3,14	2,59	1,74	1,09	0,59	0,09
2,4	6,05	4,18	3,25	2,70	1,85	1,20	0,70	0,20
2,5	6,16	4,29	3,36	2,81	1,96	1,31	0,81	0,31
2,6	6,27	4,40	3,47	2,92	2,07	1,42	0,92	0,42
2,7	6,38	4,51	3,58	3,03	2,18	1,53	1,03	0,53
∇r, фут*)	—0,08	—0,16	—0,24	—0,32	—0,47	—0,63	—0,79	—0,94
r, фут	49,84	99,69	149,5	199,9	299,5	399,4	498,4	598,6
lg r	1,70	2,00	2,175	2,30	2,476	2,60	2,70	2,777

*) Поправка ∇r определялась по формуле $\nabla r = 36{,}85 - \nabla cr$.

$$S_{rt} = S'_{rt} + \nabla_r = S'_{rt} + \nabla_п - \nabla_{cr}, \qquad (5.4.1)$$

где $\nabla_п$ — абсолютная (или относительная) отметка приведенного статического уровня, от которого отсчитываются понижения S_{rt} во всех скважинах; $\nabla_r = \nabla_п - \nabla_{cr}$ — поправка на приведение фактического понижения S'_{rt} к расчетному S_{rt} в точке r.

Обоснование данной методики обработки результатов опытных откачек приведено в [53]. Откачка производилась из скважины радиусом 12 дюймов и глубиной 46 футов вблизи Скоттсблаффа ($Q = 1270$ галл/мин $= 168{,}91$ фут³/мин). Понижение уровня фиксировалось по наблюдательным скв. 1—8.

Результаты откачки и построенные по ним графики $S_{rt} = f[\lg(t/r^2)]$, $T = f(\lg r)$, $\lg a_r = f(\lg r)$ и $\lg \mu_r = f(\lg r)$ приведены в табл. 5.3 и на рис. 5.15 и 5.16. Величины параметра i^* определялись из графиков комбинированного (по С. Е. Джейкобу) прослеживания снижения УГВ в наблюдательных скважинах (рис. 5.15).

Из рис. 5.16 видно, что величины a и μ, рассчитанные по формулам (3.2.5) и (5.2.7), в билогарифмической системе ко-

ординат $\lg a = f(\lg r)$ и $\lg \mu = f(\lg r)$ с высокой степенью точности аппроксимируются закономерностями (5.3.1) и (5.3.1а), которые в данном опыте имеют вид

$$\lg a = \lg a_r = 10{,}2 - 2{,}5 \lg r \qquad (5.4.2)$$

и

$$\lg \mu = \lg \mu_r = -8{,}8 + 2{,}5 \lg r, \qquad (5.4.3)$$

где независимая переменная r представляет собой безразмерное число, равное расстоянию до наблюдательной скважины, в которой рассчитывается величина a (это расстояние измеряется в тех же единицах, что и величины S_{rt} и i^*). Здесь a — в фут²/мин; r — в фут.

Из рис. 5.16 видно, что расчетные значения T, определенные по графикам $S_{rt} = f[\lg(t/r^2)]$, неодинаковы в различных наблюдательных скважинах (график *1* на этом рисунке). Это

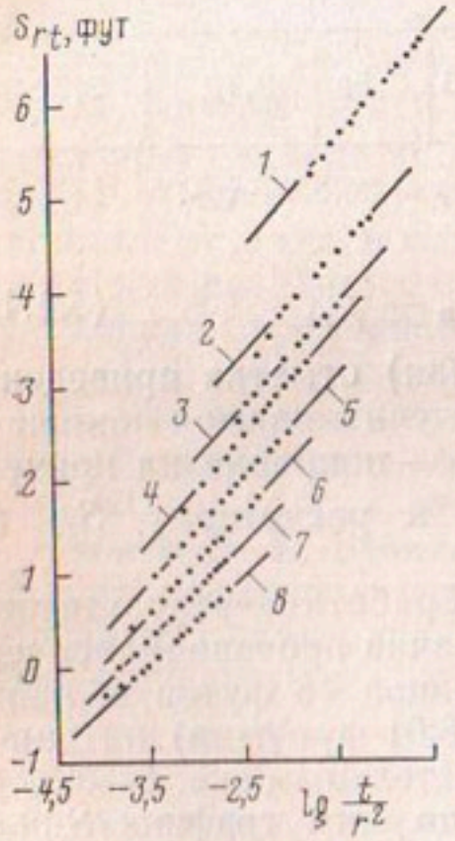


Рис. 5.15. Комбинированное (по Джейкобу) прослеживание снижения УГВ при опытной откачке вблизи Скоттсблаффа (по данным Л. К. Венцеля [139]). Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

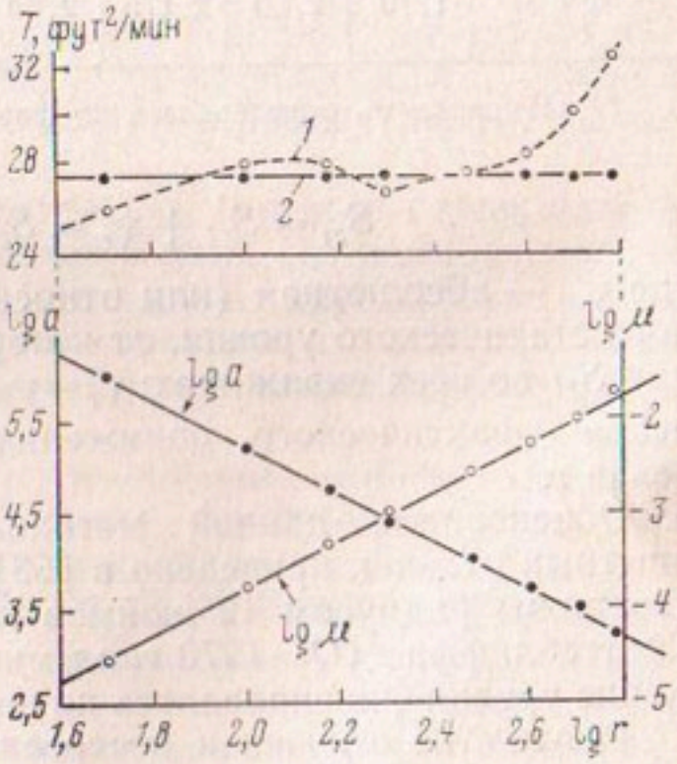


Рис. 5.16. Характер изменения вдоль координаты $\lg r$ параметров T (*1*, *2*), $\lg a$ и $\lg \mu$ при опытной откачке Венцеля вблизи Скоттсблаффа ($\lambda = -2{,}5$): *1* — параметр T определен по методу С. Е. Джейкоба; *2* — то же, по методу автора

указывает на то, что закономерности (5.3.1) и (5.3.1а) имеют место и при наличии некоторой неоднородности пласта по водопроводимости (при условии, что величина водопроводимости рассчитывается по графикам С. Е. Джейкоба).

Очевидно, если прогноз положения УГВ вести исходя из того, что $a=\text{const}\neq f(r)$, то будем иметь значительные расхождения между опытными и расчетными величинами S_{rt}. Относительная (в долях единицы) погрешность таких прогнозов $\Delta=f\ (r, t)$ может быть определена по формуле

$$\Delta = [\lg (a_r/a)]/\lg (2{,}25\ at/r^2). \qquad (5.4.4)$$

Из (5.4.4) следует, что в точках пласта, где $a_r=a$, имеем $\Delta=0$. К примеру, если для расчета понижения УГВ в скв. 1 использовать постоянное значение коэффициента уровнепроводности $\lg a=3{,}5$, полученное по наблюдательной скв. 7 (рис. 5.15), то расчетные понижения в скв. 1 будут меньше действительных в среднем на 70—80%. И наоборот, точность прогнозов положения УГВ очень высока, если в расчетах учитывать закономерность (5.3.1) или в данном случае (5.4.2) и прогноз уровня вести по обобщенной формуле (5.3.17).

Таким образом, опыты Л. К. Венцеля показывают, что в условиях, удовлетворяющих функциям (5.2.1) и (5.2.2), существовали закономерности (5.3.1) и (5.3.1а). Тем самым данные опыты подтверждают достоверность эффекта квазилинейности и вытекающих из него положений. Отметим, что к аналогичным выводам приводят и другие опыты Л. К. Венцеля и С. В. Лохмана (см. откачки вблизи Грэнд Айлэнда, Керни, Гётэбурга, Вихита).

Результаты опытов Б. В. Боревского и Б. Г. Самсонова и рассчитанные по ним значения гидрогеологических параметров приведены в работе [13, с. 126—132]. С помощью кустовых откачек из скв. 35 и 40 на Мийкайнарском участке в Центральном Казахстане опробовался безнапорный трещинно-карстовый водоносный горизонт в известняках фамена. Продолжительность откачек составляла около 20 сут. На рис. 5.17 приведены графики комбинированного (по С. Е. Джейкобу) прослеживания снижения УГВ в наблюдательных скважинах куста 40.

Используя значения T и a, полученные Б. В. Боревским и Б.Г. Самсоновым для наблюдательных скважин куста 40 с помощью графиков $S_{rt}=f[\lg (t/r^2)]$, приведенных на рис. 5.17, мы рассчитали значения μ и для куста 40 построили экспериментальные графики $\lg a=f(\lg r)$, $\lg \mu=f(\lg r)$ и $T=f(\lg r)$. Эти графики изображены на рис. 5.18 (здесь функция $T=$

$=f(\lg r)$ представлена штриховой кривой *1*) и свидетельствуют о том, что в данных гидрогеологических условиях влияние эффекта квазилинейности проявляется в полной мере. Из рис. 5.18 видно, что графики $\lg a=f(\lg r)$ и $\lg \mu=f(\lg r)$ с высокой степенью точности аппроксимируются закономерностями (5.3.1) и (5.3.1а):

$$\lg a = \lg a_r = -0{,}20 + 1{,}43 \lg r \qquad (5.4.5)$$

и

$$\lg \mu = \lg \mu_r = 3{,}23 - 1{,}43 \lg r, \qquad (5.4.6)$$

где a_r — в м²/сут; r — в м.

Расчеты коэффициента водопроводимости по графикам площадного $S_{rt}=f(\lg r)$ и комбинированного (по автору) $S_{rt}=f[\lg(t/r^{2-\lambda})]$ прослеживания снижения УГВ показали, что $T_D=4200$ и $T=1200$ м²/сут. Значения T, определенные по графикам временного $S_{rt}=f(\lg t)$ и комбинированного (по С. Е. Джейкобу) $S_{rt}=f[\lg(t/r^2)]$ прослеживания снижения уровня,

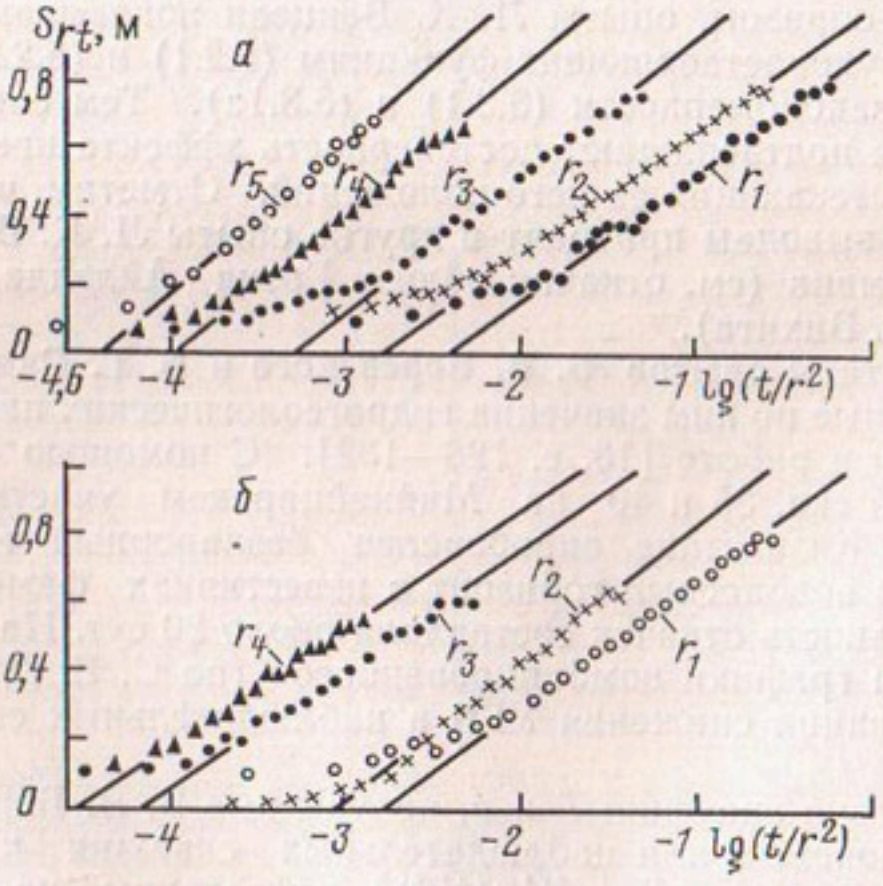


Рис. 5.17. Комбинированное (по С. Е. Джейкобу) прослеживание снижения УГВ по кусту 40: *а* — луч Ю; *б* — луч С (по данным Б. В. Боревского и Б. Г. Самсонова [13])

практически совпадают и значительно изменяются вдоль радиуса депрессионной воронки (см. функции $T=f(\lg r)$ на рис. 5.18 и 5.19, изображенные штриховыми кривыми *1*). На этом основании, как будет показано в следующем параграфе, определение T следует вести с учетом поправки λ, т. е. по графикам $S_{rt}=f[\lg(t/r^{2-\lambda})]$ (полученные таким образом функции $T=f(\lg r)$ на рис. 5.18 и 5.19 изображены горизонтальными кривыми *2*, свидетельствующими о постоянстве проводимости во всей области фильтрации).

Если учесть, что в данных гидрогеологических условиях $\lambda=1{,}43$, то мы обнаружим, что неустановившееся движение грунтовых вод в трещинно-карстовых известняках характеризуется первой разновидностью квазистационарного режима фильтрации. Отсюда можно заключить, что эффект квазилинейности распространяется на все водоносные горизонты независимо от их литологического состава, вида пустотности горной породы (пористые, трещинные, трещинно-карстовые и т. д.) и напорности (напорные и безнапорные).

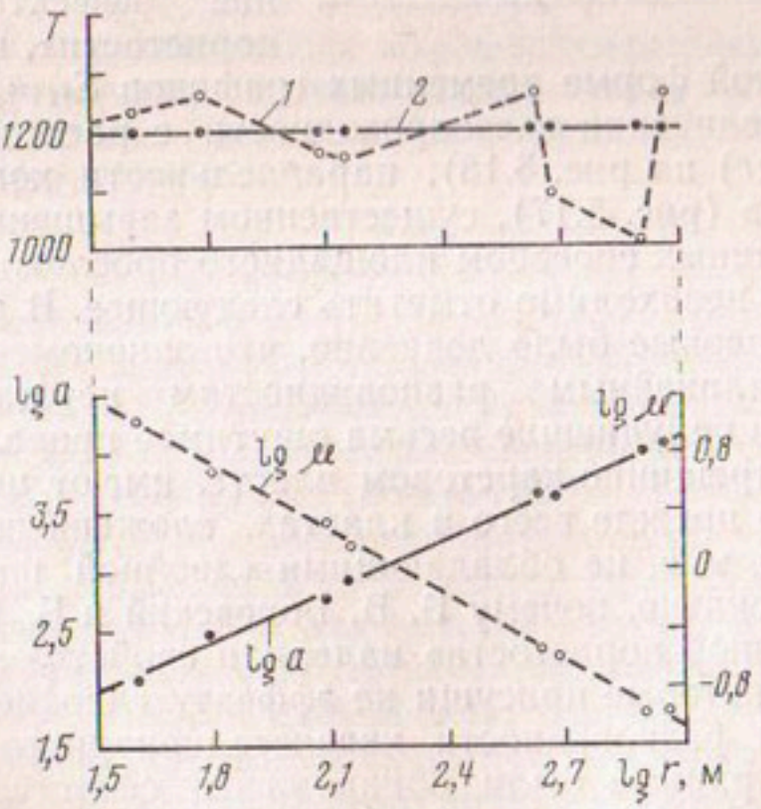


Рис. 5.18. Характер изменения вдоль координаты $\lg r$ параметров T (*1*, *2*), $\lg a$ и $\lg \mu$ при опытной откачке из куста 40 ($\lambda=1{,}43$): *1* — параметр T определен по методу С. Е. Джейкоба; *2* — то же, по методу автора (по данным Б. В. Боревского и Б. Г. Самсонова [13])

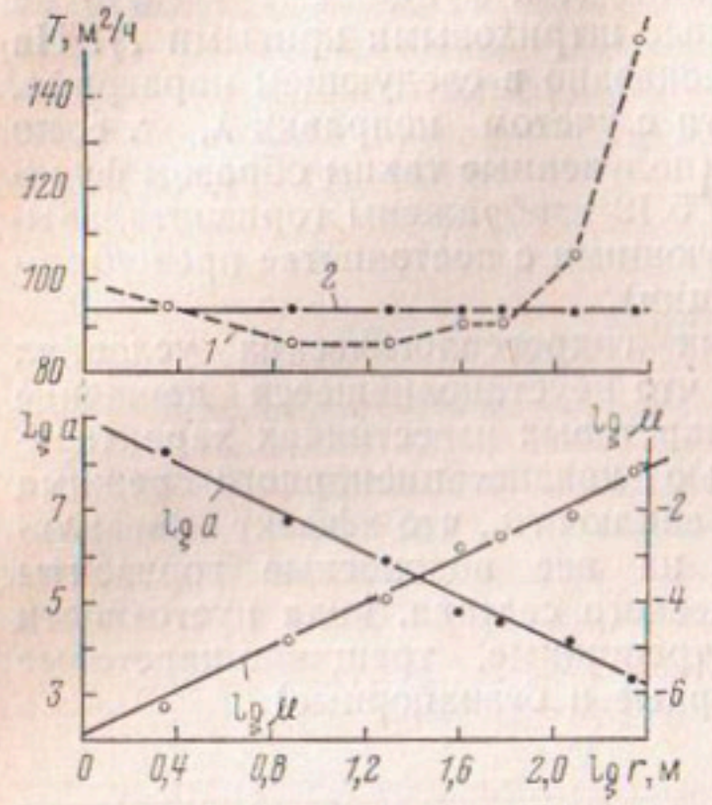


Рис. 5.19. Характер изменения по радиусу депрессионной воронки lg$r$ параметров T (*1*, *2*), lg a и lg μ при опытной откачке из дренажной скв. 7, пущенной в работу с дебитом 100 м³/ч (опыт 47, λ=—2,4): *1* — параметр T определен по методу С. Е. Джейкоба; *2* — то же, по методу автора

Анализируя результаты опытной кустовой откачки из скв. 40, Б. В. Боревский и Б. Г. Самсонов заключают, что в рассмотренных условиях трещинно-карстового пласта весьма ощутимо проявление эффекта «двойной пористости», что выражается в сложной форме временных графиков $S_{rt}=f(\lg t)$, закономерном увеличении пьезопроводности с расстоянием (кривая $\lg a=f(\lg r)$ на рис. 5.18), параллельности комбинированных графиков (рис. 5.17), существенном завышении параметров, рассчитанных способом площадного прослеживания [13]. В этой связи необходимо отметить следующее. В работах [53, 57, 61, 66] впервые было доказано, что закономерности, присущие квазилинейным разновидностям неустановившейся фильтрации и получившие весьма ощутимое проявление в рассмотренном трещинно-карстовом пласте, имеют широкое распространение прежде всего в пластах, сложенных песчаными отложениями, т. е. не обладающими «двойной пористостью». Поэтому непонятно, почему Б. В. Боревский и Б. Г. Самсонов эффект «двойной пористости» наделили свойствами и закономерностями, которые присущи не эффекту «двойной пористости», а первой разновидности квазистационарного режима и значительно раньше были обнаружены, сформулированы и исследованы в работах [53, 61, 67].

Опыты автора [53, 57, 82] были посвящены изучению закономерностей перераспределения напоров в зоне квазистационарного режима при пуске скважины с постоянным дебитом в пластах, однородных по проницаемости. Результаты опытных

кустовых откачек из артезианских скв. 2ц, 3ц, 4ц приведены в приложении. Анализ этих данных и позволил установить существование закономерности (5.3.1). К примеру, при изучении данных кустовой откачки из скв. 3 ц было обнаружено (см. [57], табл. 5), что в этом опыте величина $\ln a$ уменьшается по линейному закону с увеличением $\ln r$ от максимального значения вблизи возмущающей скважины до минимального на границе влияния депрессии, претерпевая резкий скачок у стенки возмущающей скважины. При этом проводимость пласта во всех точках депрессии сохраняется постоянной $T=527$ м²/сут и значительно превышает проводимость скважины $T_c=31$ м²/сут. Отсюда следует, что величины понижения уровня, рассчитанные при каком-либо одном постоянном значении коэффициента пьезопроводности и проводимости, будут иметь расхождения с действительными на величину, соответствующую действительному коэффициенту пьезопроводности и проводимости в данной точке при данных дебите и радиусе скважины. В этом случае максимальная погрешность получается при использовании параметров, определяемых по изменению уровня в возмущающей скважине. Из этого примера видно, что $a_r=a_r^0 r^{\lambda}$, где λ — угловой коэффициент графика $\ln a=f(\ln r)$; a_r^0 и a_r — величины коэффициента пьезопроводности пласта на расстоянии соответственно $r=1$ и r от оси возмущающей скважины. Здесь график функции $\lg a=f(\lg r)$ представляется прямой

$$\lg a = \lg a_r = 7{,}82 - 0{,}99 \lg r, \qquad (5.4.7)$$

где a_r — в м²/сут; r — в м.

Результаты опытных откачек из скв. 2 ц проанализированы в работах [53, 82] и позволили установить существование первой разновидности квазистационарного режима. Эти опыты показали, что устойчивость параметров λ, T и T_D при изменении интенсивности возмущения определяется прежде всего устойчивостью режимов водного питания и разгрузки пласта. При откачках из скв. 2 ц эта неустойчивость носит сложный характер: переменный относительно параметров λ, n, T и закономерный относительно проводимости T_D (см. табл. 5.4).

Для изучения характера проявления эффекта квазилинейности при работе вертикального дренажа в зоне Полесья было проведено около 80 опытных кустовых и групповых откачек с различными дебитами, различной продолжительности и в различные периоды года. Результаты наиболее характерных опытов приведены в приложении и на рис. 1.1—1.15, 3.4, 4.7—4.11, 5.1—5.7, 5.10, 5.11. Влияние Q на поведение параметров

Таблица 5.4

Влияние дебита скв. 2ц на изменение гидрогеологических параметров возмущенного пласта (здесь T, T_D — в м²/сут)

Q, м³/сут	134	180	240
T/T_D	173,9/220,8	142,6/205,3	162,7/188,7
λ/n	0,42/1,27	0,61/1,44	0,28/1,16

λ и n, определенных по графикам временного прослеживания снижения УГВ при работе дренажных скважин, отражено в табл. 5.2. Анализ полученных материалов показал, что в зоне регулярного режима неустановившееся движение грунтовых вод полностью соответствует третьей разновидности квазилинейной фильтрации. Поэтому эффект Н. С. Боултона, вызываемый изменением во времени водоотдачи в зоне аэрации, при проектировании дренажа в безнапорных пластах Полесья учитывать не рекомендуется.

В этой связи приведем выводы Б. Г. Самсонова по поводу применения эталонных кривых Н. С. Боултона для обработки результатов опытных откачек в безнапорных пластах [13]: «Использование эталонного метода Боултона на практике обнаруживает его чрезвычайную условность, причем нередки случаи, когда опытным кривым либо вообще не находится эталона, либо при относительно удовлетворительном совпадении опытных и эталонных кривых получаются нереальные величины параметров. Аналогичные суждения имеются и в иностранной литературе (Е. В. Бранд, 1967). Это обстоятельство заставляет возвратиться к методу Джейкоба как наиболее простому и надежному в практическом отношении. Для обоснования этого вывода можно привести следующие соображения: во-первых, во многих случаях при опробовании безнапорных горизонтов эффект Боултона практически не проявляется; во-вторых, при наличии эффекта Боултона участки графика S_{rt}—lg t, представленные для обработки методом Джейкоба, наблюдаются в пределах времени, достижимого практикуемой продолжительностью опытных откачек. Анализ опытных данных показывает, что величина запаздывания находится в пределах 1—8 суток».

Необходимо отметить, что понятию «время запаздывания

конечного представительного участка» (или «время запаздывания асимптотического участка») на графике комбинированного (по Джейкобу) прослеживания уровня в работе [13] дается два неоднозначных определения. Согласно первому определению, время запаздывания есть время, отсчитываемое с момента пуска скважины в работу, начиная с которого конечные участки графика $S_{rt}=f[\lg(t/r^2)]$ выходят на одну прямую (общую касательную). Согласно второму определению, под временем запаздывания понимается время $t_н$, начиная с которого: а) появляется квазистационарный участок, описываемый уравнением Тейса—Джейкоба, или б) начинает формироваться участок, отвечающий уравнению Тейса и переходящий далее в квазистационарный участок.

Очевидно, если в натурных условиях, начиная с некоторого момента времени $t_н$, появляется вторая (линейная) разновидность квазистационарной фильтрации, когда $\lambda=0$, то оба определения идентичны и имеют смысл. Если же наблюдаются первая и третья разновидности квазистационарного режима, то справедливым будет только второе определение, которое целесообразно применять и для напорных потоков. В этих условиях, как будет показано ниже, при появлении квазистационарного режима графики $S_{rt}=f[\lg(t/r^2)]$ образуют семейство параллельных прямых и никогда не выходят на общую асимптоту (касательную). Тогда время запаздывания равно времени появления квазистационарного режима $t_н$, которое для безнапорных пластов Полесья изменяется от нескольких до 30—40 мин (рис. 1.2, 1.6, 1.7, 5.3)

При $\lambda\neq0$ выход прямых С. Е. Джейкоба $S_{rt}=f[\lg(t/r^2)]$ на общую касательную начинается с момента $t_к$ — времени окончания квазистационарного режима и начала переходного режима. Если $t_у$ — время появления установившегося режима или время стабилизации фильтрационного потока, то продолжительность переходного режима, для которого характерны закономерности переходных процессов (это в основном затухающие экспоненты), составит $t_у—t_к$. Поэтому если время появления квазистационарного режима составляет в безнапорных пластах 1—8 сут и более [13], то в действительности его следует рассматривать как время окончания квазистационарного режима $t_к$. При проведении опытных откачек из дренажных скважин в зоне Полесья величина $t_к$ изменяется от 1 до 3—5 сут и находится в прямой зависимости от интенсивности возмущения (рис. 5.20).

Значительный интерес представляют результаты опытной кустовой откачки из грунтовой скважины, выполненные В. М.

Шестаковым и Т. Д. Стрельцовой [119]. Этими исследованиями было установлено, что в одном и том же однородном по проницаемости безнапорном горизонте значения T и T_D равны соответственно 1100 и 410 м²/сут. Следовательно, в данном горизонте перераспределение УГВ происходило в соответствии с закономерностями третьей разновидности квазистационарного режима, поскольку критерий квазилинейности потока $\lambda = -3{,}37$.

Чтобы иметь представление о границах существования линейной и квазилинейных разновидностей неустановившейся напорной и безнапорной фильтрации, аналогичным методом было обработано множество других опытных откачек, результаты которых удовлетворяют уравнениям (5.2.1) и (5.2.2). Диапазон изменения значений n и λ представлен на рис. 5.21 (сюда мы не включили значения этих параметров, наблюдаемые при опытных откачках из скважин вертикального дренажа в зоне Полесья). Для обобщения рассмотренных опытов экспериментальные величины n и λ помещены на график функции $\lambda = f(n)$, характеризуемой формулой (5.3.9). Из рис. 5.21 следует, что неустановившаяся линейная фильтрация ($\lambda = 0$) в строгой постановке должна рассматриваться как редкий случай (или редкая разновидность) неустановившегося движения подземных вод; в общем же случае это движение подчиняется теории неустановившейся квазилинейной фильтрации, когда критерий квазилинейности фильтрационного потока λ принимает ненулевые значения, а дифференциальные уравнения, характеризующие эту фильтрацию, являются неустойчивыми параметрическими уравнениями параболического типа [66, 67, 76, 82].

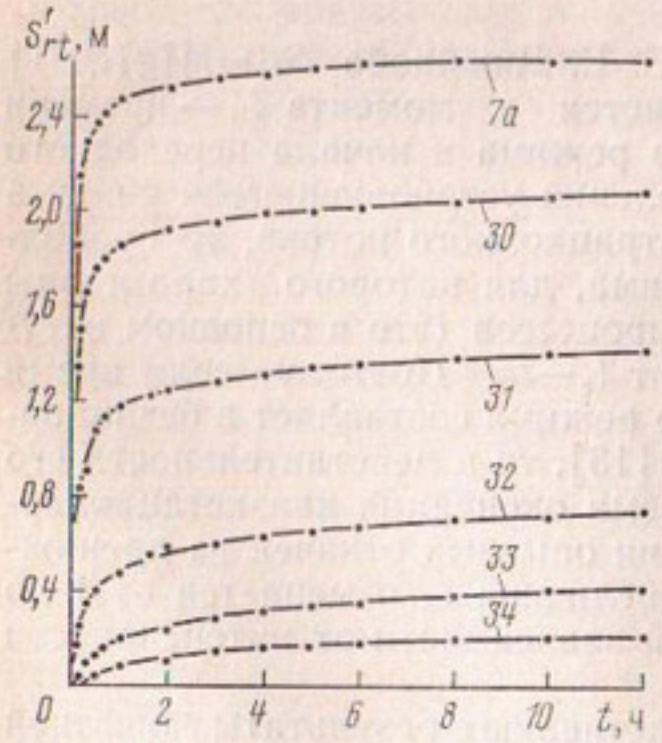


Рис. 5.20. Характер снижения УГВ во времени в различных наблюдательных скважинах при опытной откачке из дренажной скв. 7, пущенной в работу с дебитом 145 м³/ч (опыт 23). Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

Итак, анализ данных опытных откачек в однородных по проводимости средах показал, что во всех водоносных горизонтах величины коэффициента пьезопроводности и емкости пласта, определенные по формулам (3.2.5) и (5.2.7) с использованием графиков временного, площадного или комбинированного (по С. Е. Джейкобу) прослеживания снижения уровня в зоне квазистационарного режима, являются функцией координаты r. При этом величины проводимости T и T_D сохраняют одни и те же постоянные значения вдоль этой координаты, т. е. вдоль радиуса депрессионной воронки. Теоретические и экспериментальные исследования позволили установить, что в зоне квазистационарного режима графики этой функции с достаточной для практики точностью аппроксимируются в билогарифмических координатах прямой линией (5.3.1), т. е. имеет место степенная зависимость величины пьезопроводности и емкости пласта от координаты r. Параметр λ, являющийся показателем степени в этих зависимостях, выполняет роль *обобщенного показателя режима водного питания пласта.* Иначе говоря, параметр λ — это эмпирическая поправка к основной формуле неустановившейся фильтрации к скважинам, компен-

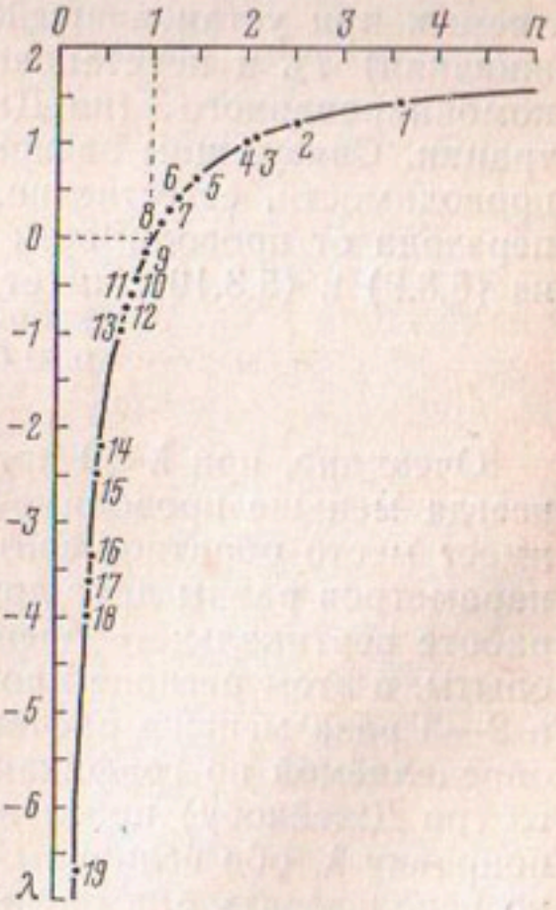


Рис. 5.21. Функция $\lambda=2(1-1/n)$ с экспериментальными значениями n и λ различных исследователей: *1* — [13]; *2* — откачка вблизи Эдмвейла [138]; *3* — [27]; *4* — [14]; *5* — скв. 2 ц, $Q=180$ м³/сут [82]; *6* — то же, $Q=134$ м³/сут [82]; *7* — то же, $Q=240$ м³/сут [82]; *8* — [107]; *9* — [110]; *10* — [114]; *11* — [8]; *12* — откачка вблизи Гранд Айслэнда [139]; *13* — скв. 3 ц, $Q=288$ м³/сут [53, 57]; *14* — откачка вблизи Брэдфорда, $Q=55$ фут³/мин [138]; *15* — откачка вблизи Скоттсблаффа (табл. 5.3); *16* — [119]; *17* — [18]; *18* — откачка в долине р. Арканзас, $Q=93$ фут³/мин [135]; *19* — откачка на ферме Вортман, $Q=72$ фут³/мин [136]

сирующая несоответствие между этой формулой и действительной картиной перераспределения уровней в пласте. Поправка λ легко определяется по двум наблюдательным скважинам с использованием формулы (5.3.9) и в равной мере присуща как напорным, так и безнапорным фильтрационным потокам.

Использование в формуле Тейса поправки λ позволяет существенно повысить достоверность прогнозов изменения пластового давления и особенно нормы осушения при работе вертикального дренажа. В то же время игнорирование этой поправки приводит к тому, что погрешность в оценке снижения УГВ при работе вертикального дренажа составляет $\pm$ (80—200) процентов и более и зависит от величины λ. Таким образом, независимо от того, какие толкования могут быть приданы закону (5.3.1) и параметру λ, их рекомендуется учитывать при построении новых и совершенствовании существующих моделей неустановившейся напорной и безнапорной фильтрации.

Важным моментом в эффекте квазилинейности является то, что при наличии этого эффекта, т. е. при ненулевых значениях λ, наблюдается, как правило, разница в величинах водопроводимости (или коэффициента фильтрации), определяемых при установившейся (графики площадного прослеживания) T_D и неустановившейся (графики временного или комбинированного (по Джейкобу) прослеживания) T фильтрации. Связующим звеном между этими величинами водопроводимости, естественно, является поправка λ. Формула перехода от проводимости T к проводимости T_D, как следует из (5.3.9) и (5.3.10), имеет вид

$$T_D = nT = 2T/(2-\lambda). \qquad (5.4.8)$$

Очевидно, при $\lambda<0$ проводимость пласта по Дюпюи T_D всегда меньше проводимости пласта по Тейсу T. При $\lambda>0$ имеет место обратное соотношение. При $\lambda=0$ величины этих параметров равны друг другу. Поскольку в зоне Полесья при работе вертикального дренажа всегда $\lambda<0$, то, как показали опыты, в этом регионе проводимость безнапорных пластов T_D в 2—3 раза меньше расчетной проводимости этих пластов T, определяемой по графикам временного или комбинированного (по Джейкобу) прослеживания снижения УГВ. Учитывая поправку λ, обе величины проводимости в равной мере можно использовать для оценки нормы осушения и дебита скважин по формуле (5.3.46).

§ 5.5. НОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ ОПЫТНЫХ ОТКАЧЕК

Существование параметра водообмена λ ставит ряд новых задач в области фильтрационных расчетов вертикального дренажа. Некоторые из этих задач можно решить, пользуясь обобщенной формулой Ч. В. Тейса (5.3.17).

Среди современных методов оценки гидрогеологических параметров по данным кустовых откачек наиболее надежен и популярен метод С. Е. Джейкоба. В этом методе опытные значения S_{rt}, фиксируемые по двум и более наблюдательным скважинам, обрабатываются по несколько видоизмененной формуле Тейса (3.2.1). Обработка заключается в построении так называемых графиков комбинированного прослеживания снижения уровня, удовлетворяющих преобразованию Джейкоба (5.2.3). Если $\lambda=0$, то опытные значения S_{rt} в координатах S_{rt}—$\ln(t/r^2)$ выстраиваются на одну прямую с угловым коэффициентом i и начальным отрезком A_k, равным понижению уровня в точке $r=1$ на момент времени $t=1$.

Комбинированный график (5.2.3) образуется путем параллельного переноса каждой прямой (5.2.1) влево на величину $-2\ln r$. Так как по формуле (3.2.1) $i_D=2i$, то при таком сдвиге графики (5.2.1), согласно Джейкобу, должны всегда накладываться на одну прямую $S_{rt}=f[\ln(t/r^2)]$ с угловым коэффициентом $i=i_D/2$ и начальным отрезком $A_k=\text{const}\neq f(r)$.

Анализ результатов опытных откачек показывает [82], что в большинстве случаев $i_D\neq 2i$. В этих условиях описанная модель комбинированного графика (5.2.3) претерпевает существенные изменения. Вместо того чтобы располагаться на одной прямой $S_{rt}=f[\ln(t/r^2)]$, опытные значения S_{rt}, удовлетворяющие в отдельности зависимостям (5.2.1) и (5.2.2), в координатах S_{rt}—$\ln(t/r^2)$ образуют семейство (лесенку) параллельных прямых с угловым коэффициентом i и начальными отрезками $A_k=f(r)$. В результате комбинированный график Джейкоба распадается на более простые (исходные) отрезки (5.2.1) и (5.2.2), т. е. комбинации (параллельного смещения и выстраивания в одну прямую) графиков (5.2.1) в данной системе координат не получается (см. рис. 1.9, 1.11, 5.15, 5.22, 5.23).

В литературе приводится множество примеров обработки данных кустовых откачек по методу Джейкоба, когда вместо одной прямой в координатах S_{rt}—$\ln(t/r^2)$ образуется семей-

ство параллельных и непараллельных прямых, в котором каждой наблюдательной скважине r соответствует свой график комбинированного прослеживания изменения уровня (см. рис. 5.17).

Результаты опытов Л. К. Венцеля, обработанные с помощью преобразования С. Е. Джейкоба (5.2.3), также указывают на то, что вместо общего для всех наблюдательных скважин графика $S_{rt}=f[\ln(t/r^2)]$ опытные значения S_{rt} образуют семейство комбинированных графиков (рис. 5.15).

Аналогичная картина наблюдается при обработке результатов опытных кустовых откачек из дренажных скважин в зоне Полесья. На рис. 5.22 приведены графики комбинированного (по Джейкобу) прослеживания снижения УГВ в наблюдательных скважинах 7а—34 при откачке из дренажной скв. 7, расположенной на участке вертикального дренажа в

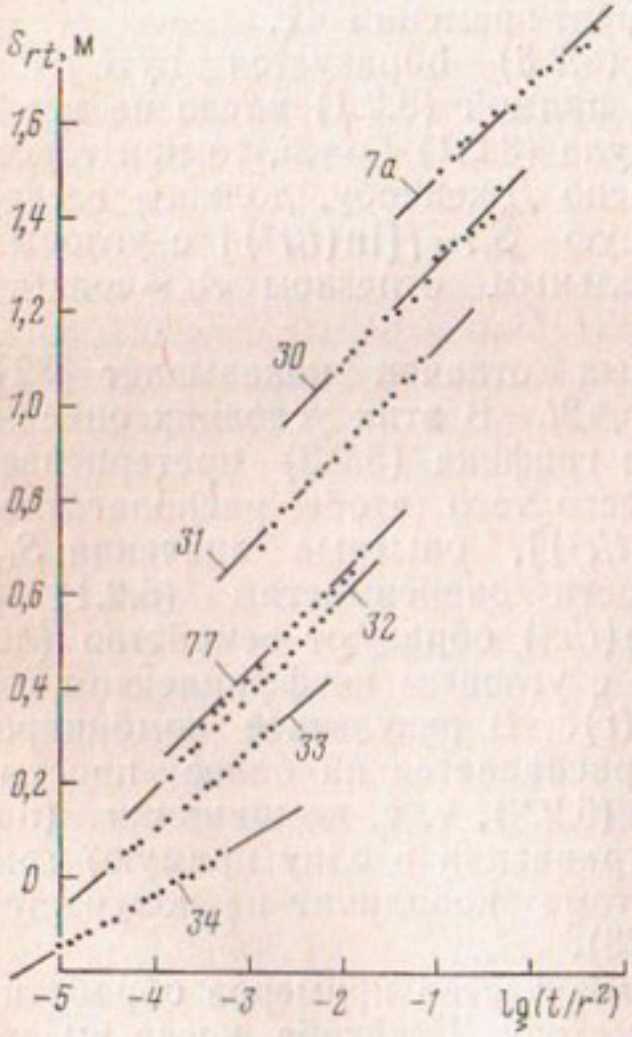


Рис. 5.22. Комбинированное (по Джейкобу) прослеживание снижения УГВ при откачке из дренажной скв. 7 с дебитом 100 м³/ч (опыт 47). Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

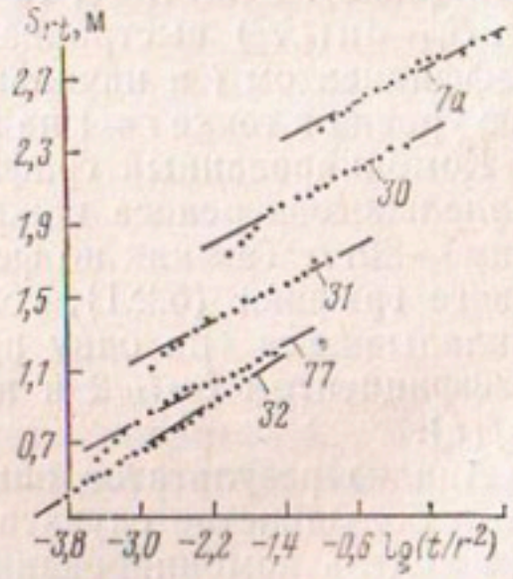


Рис. 5.23. Комбинированное (по Джейкобу) прослеживание снижения УГВ при откачке из дренажной скв. 7 с дебитом 140 м³/ч (опыт 49). Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

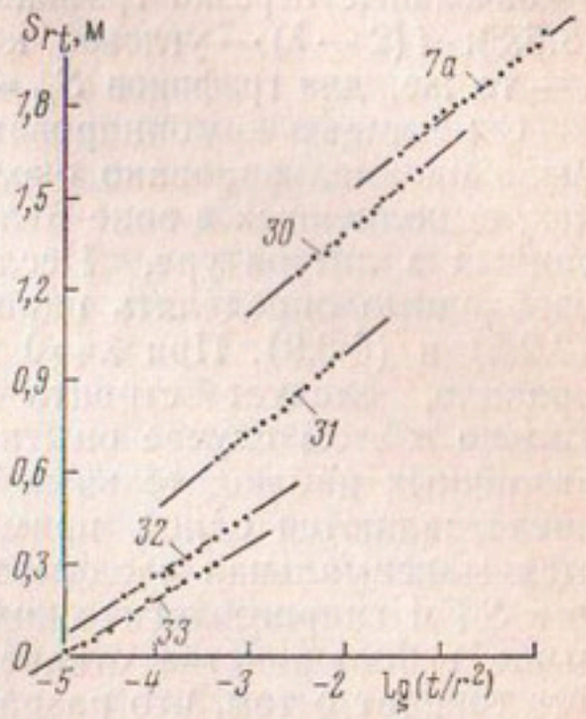


Рис. 5.24. Комбинированное (по Джейкобу) прослеживание восстановления УГВ после прекращения откачки из скв. 7, работавшей до остановки 24 ч с постоянным дебитом 125 м³/ч (опыт 22). Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

низовье Бобрика. Из рис. 5.22 видно, что каждой наблюдательной скважине соответствует свой график Джейкоба. То же самое получается и при обработке результатов других опытов (см. рис. 5.23 и 5.24). Это говорит о том, что метод Джейкоба нуждается в дальнейшем совершенствовании и обобщении для изучаемых нами случаев, когда $i_D \neq 2i$ или $\lambda \neq 0$.

Теоретические и натурные исследования этого явления позволили установить [53, 66, 76], что при $i_D \neq 2i$ неустановившееся движение подземных вод к скважинам подчиняется квазилинейным уравнениям параболического типа и с высокой степенью точности характеризуется обобщенной формулой Ч. В. Тейса (5.3.17), содержащей поправку λ. Эту формулу рекомендуется применять для обработки результатов опытных кустовых откачек. Графики временного, площадного и комбинированного (по автору) прослеживания изменения уровня, строящиеся по этой формуле, имеют вид [86]:

$$S_{rt} = A_r^0 + i \ln t = A_r^0 + i^* \lg t, \tag{5.5.1}$$

$$S_{rt} = A_t^0 - i(2-\lambda) \ln r = A_t^0 - i^*(2-\lambda) \lg r, \tag{5.5.2}$$

$$S_{rt} = A_k^0 + i \ln (t/r^{2-\lambda}) = A_k^0 + i^* \lg (t/r^{2-\lambda}), \tag{5.5.3}$$

где

$$A_r^0 = i \ln (2{,}25\, a_r^0 / r^{2-\lambda}) = i^* \lg (2{,}25\, a_r^0 / r^{2-\lambda}),$$

$$A_t^0 = i \ln 2{,}25\, a_r^0 t = i^* \lg 2{,}25\, a_r^0 t, \tag{5.5.4}$$

$$A_k^0 = i \ln 2{,}25\, a_r^0 = i^* \lg 2{,}25\, a_r^0$$

— начальные отрезки графиков соответственно (5.5.1), (5.5.2) и (5.5.3); $i(2-\lambda)$ — угловой коэффициент графика $S_{rt}=f(\ln r)$; i — то же, для графиков $S_{rt}=f(\ln t)$ и $S_{rt}=f[\ln(t/r^{2-\lambda})]$.

С помощью комбинированных графиков (5.2.3) и (5.5.3) было проанализировано около 100 опытных кустовых откачек, выполненных в зоне Белорусского Полесья, а также описанных в литературе. Исследования показали, что всегда необходимо определять параметр λ, используя зависимости (3.2.5) и (5.3.9). При $\lambda\neq 0$ комбинированные графики, как правило, следует строить в координатах S_{rt}—$\ln(t/r^{2-\lambda})$. Только в этом случае опытные значения S_{rt}, снимаемые в различных наблюдательных скважинах (точках пласта r), представляются одной прямой $S_{rt}=f[\ln(t/r^{2-\lambda})]$ и наблюдается максимальная сходимость расчетных и натурных величин S_{rt} и гидрогеологических параметров. Как указывалось выше, в большинстве откачек $i_D\neq 2i$ и, следовательно, $\lambda\neq 0$. Это говорит о том, что разработанный метод определения гидрогеологических параметров с помощью преобразования $S_{rt}=f[\ln(t/r^{2-\lambda})]$ находит широкое подтверждение в натурных опытах и может быть использован при проектировании вертикального дренажа и гидрогеологических изысканиях.

Для иллюстрации высокой точности и универсальности предлагаемого метода можно было бы привести множество примеров. Ограничимся несколькими. На рис. 5.25 представлен график комбинированного (по автору) прослеживания снижения уровня в четырех наблюдательных скважинах куста 40, построенный по тем же опытным данным, что и графики комбинированного (по Джейкобу) прослеживания на рис. 5.17 (опытные значения S_{rt} по остальным пяти скважинам лучей Ю и С располагаются внутри полосы, ограниченной пунктирными кривыми, и, таким образом, для всех девяти скважин образуют единый комбинированный график $S_{rt}=f[\lg(t/r^{2-\lambda})]$). Сравнение рис. 5.17 и 5.25 показывает, что метод С. Е. Джейкоба при $\lambda\neq 0$ не позволяет получать однозначные величины гидрогеологических параметров и, следовательно, не выполняет стоящей перед ним задачи, поскольку в однородной по проницаемости среде приводит к образованию не одного комбинированного графика, а семейства таких графиков, количество которых равно числу наблюдательных скважин (рис. 5.17). В то же время данное семейство прямых с помощью формулы (5.5.3) преобразуется в один комбинированный график (рис. 5.25), позволяющий получить однозначные величины гидрогеологических параметров. К примеру, проводимость пласта T, определенная по

графикам временного или комбинированного (по Джейкобу) прослеживания снижения уровня (рис. 5.17), в данном опыте является функцией расстояния r и говорит о неоднородности пласта (см. кривую *1* на рис. 5.18). В то же время эта же величина T, рассчитанная с помощью графика комбинированного (по автору) прослеживания (рис. 5.25), имеет постоянное значение во всех девяти наблюдательных скважинах и указывает на однородность пласта по проводимости (см. кривую *2* на том же рис. 5.18).

Преимущество предлагаемого метода в оценке водопроводимости можно показать и на другом примере. Если величина проводимости пласта T, определенная по графикам временного или комбинированного (по Джейкобу) прослеживания уровня при опытной откачке вблизи Скоттсблаффа (рис. 5.15), существенно возрастает с удалением наблюдательных скважин от возмущающей (кривая *1* на рис. 5.16), то та же величина T, определенная предлагаемым методом (рис. 5.26), сохраняет постоянное значение во всех 8 наблюдательных скважинах и, таким образом, свидетельствует об однородности пласта по проводимости (см. кривую *2* на рис. 5.16).

С помощью преобразования (5.5.3) были обработаны результаты опытных кустовых откачек из скважин вертикального дренажа в зоне Полесья. Дебиты скважин изменялись от 40 до 210 м³/ч. Продолжительность откачек составляла 24—210 ч. Откачки проводились в различные периоды года, но в основном в предпосевной и посевной периоды и летом. Результаты обработки наи-

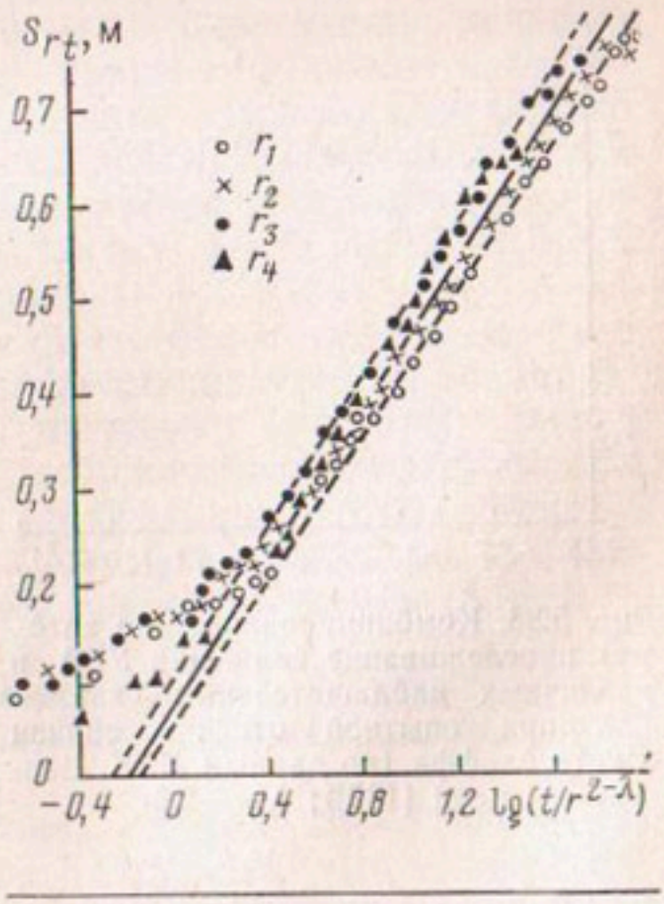


Рис. 5.25. Комбинированное (по автору) прослеживание снижения УГВ в наблюдательных скважинах куста 40 (по данным Б. В. Боревского и Б. Г. Самсонова [13]); $\lambda = 1{,}43$

более типичных опытов приведены на рис. 1.8, 1.10, 5.27—5.29.

Анализ данных материалов показывает, что во всех опытах преобразование (5.5.3) действительно преобразует графики временного и площадного прослеживания снижения УГВ в единый комбинированный график $S_{rt}=f[\lg(t/r^{2-\lambda})]$, позволяющий получить одни и те же значения T и T_D для всех наблюдательных скважин исследуемого створа. В то же время преобразование Джейкоба (5.2.3), с помощью которого были обработаны те же опыты, не выстраивает опытные значения S_{rt} на одну прямую, а образует семейство прямых, в котором каждой наблюдательной скважине соответству-

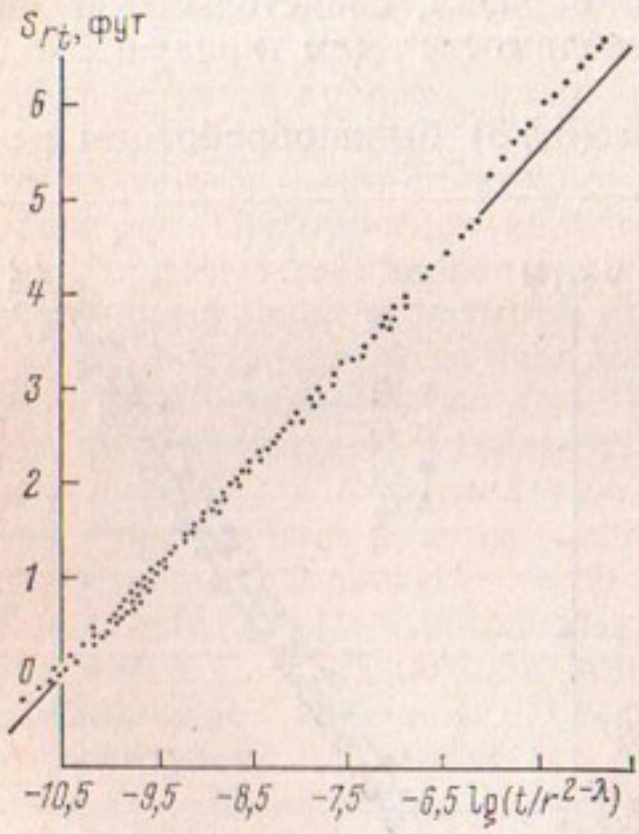


Рис. 5.26. Комбинированное (по автору) прослеживание снижения УГВ в различных наблюдательных скважинах при опытной откачке вблизи Скоттсблаффа (по данным Л. К. Венцеля [139]); $\lambda=-2{,}5$

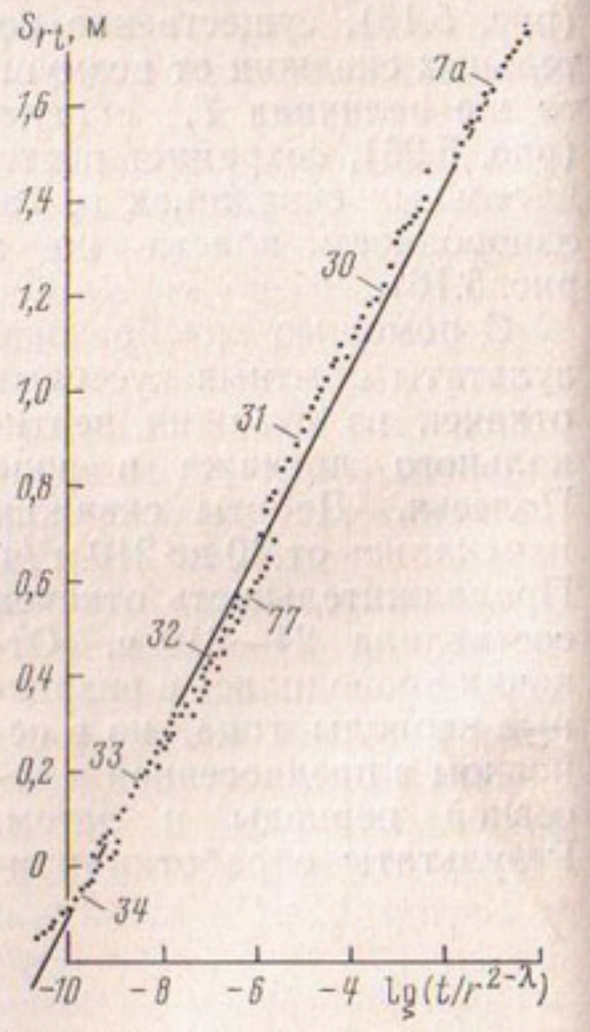


Рис. 5.27. Комбинированное (по автору) прослеживание снижения УГВ при откачке из дренажной скв. 7 с дебитом 100 м³/ч (опыт 47, $\lambda=-2{,}4$). Цифры у кривых означают номера наблюдательных скважин

ет свой график комбинированного прослеживания со своим начальным отрезком и своим угловым коэффициентом, т. е. со своими значениями проводимости и уровнепроводности (рис. 1.9, 1.11, 5.22—5.24). Это еще раз доказывает, что при ненулевых значениях λ метод Джейкоба не отражает реальной картины перераспределения уровней в пласте и, таким образом, не позволяет получать достоверные и однозначные величины гидрогеологических параметров. Собственно, этого и следовало ожидать исходя из существования эффекта квазилинейности и функции (5.3.1), как раз и указывающей на наличие закономерного расхождения между опытными и теоретическими (по Тейсу) значениями S_{rt}. Открытие этого явления со всей очевидностью указывало на то, что графики комбинированного прослеживания изменения уровня необходимо строить с помощью обобщенного преобразования (5.5.3), содержащего поправку λ.

Обработка результатов опытных кустовых откачек с помощью преобразования (5.5.3) производится следующим образом. Сперва для всех наблюдательных скважин, по которым замерялись понижения S_{rt} в процессе откачки, в системе координат S_{rt}—$\lg(t/r^2)$ одного и того же масштаба строятся графики комбинированного (по Джейкобу) прослеживания снижения уровня. Если для каждой наблюдательной скважины получается свой график комбинированного прослеживания, то сразу надо ставить вопрос об определении поправки λ по формуле (5.3.9). Оценить параметр λ можно и другим способом. Для этого с использованием углового коэффициента i^* графика Джейкоба для каждой наблюдательной скважины по формуле (3.2.5) рассчитывается величина $\lg a$. Полученные значения $\lg a$ подставляются в формулу (5.3.9) и определяется значение параметра λ.

Практика, однако, показывает, что более надежным способом определения λ является графо-аналитический. Он заключается в том, что по опытным значениям $\lg a$, полученным в наблюдательных скважинах r, в билогарифмической системе координат $\lg a$—$\lg r$ строится график $\lg a = f(\lg r)$. Угловой коэффициент этого графика и будет равен величине λ. Примеры построения таких графиков приведены на рис. 5.10, 5.16, 5.18, 5.19.

Значения $\lg a$ можно рассчитать также по формуле (3.2.5) с использованием графиков временного прослеживания снижения уровня.

Когда параметр λ определен, график $S_{rt} = f[\lg(t/r^{2-\lambda})]$ строится следующим образом. Пусть в наблюдательной

скв. 30, расположенной на расстоянии $r=7{,}4$ м от дренажной скв. 7, в момент времени $t=2{,}5$ ч наблюдалось понижение $S_{rt}=1{,}9$ м при дебите 145 м³/ч. Параметр λ в этом опыте равен — 3,70. Для построения комбинированного графика определяем: $\lg t=\lg 2{,}5=0{,}398$ и $\lg r=\lg 7{,}4=0{,}869$. Тогда на графике $S_{rt}=f[\lg(t/r^{2-\lambda})]$ абсциссе $\lg(t/r^{2-\lambda})=\lg t-(2-\lambda)\lg r=0{,}398-5{,}7\cdot 0{,}869=-4{,}555$ будет соответствовать ордината $S_{rt}=1{,}9$. Аналогично для каждого последующего значения S_{rt} в данной наблюдательной скважине рассчитывается соответствующее ему значение $\lg(t/r^{2-\lambda})$, в котором величина $(2-\lambda)\lg r=4{,}953$ будет постоянной, а $\lg t$ — переменной.

Когда опытные значения S_{rt} по всем наблюдательным скважинам нанесены на график $S_{rt}=f[\lg(t/r^{2-\lambda})]$, образуется поле точек, которые, как правило, в зоне регулярного режима с высокой степенью точности размещаются вдоль общей прямой, которая и будет графиком комбинированного (по автору) прослеживания. Поскольку этот график объединяет все наблюдательные скважины и характеризуется одним угловым

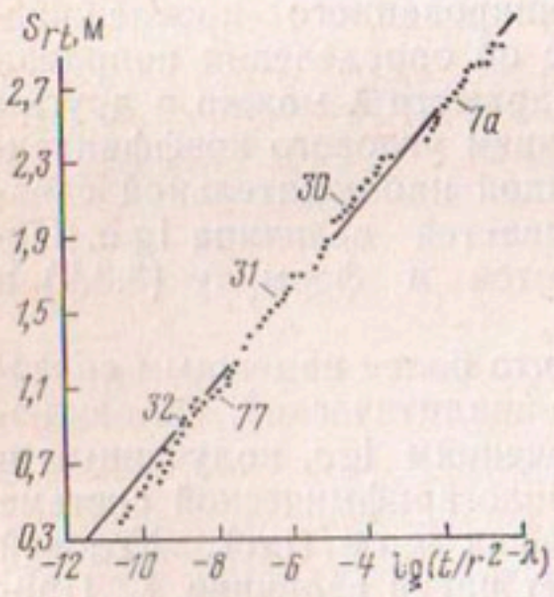


Рис. 5.28. Комбинированное (по автору) прослеживание снижения УГВ в наблюдательных скв. 7а — 32 при откачке из дренажной скв. 7 с дебитом 140 м³/ч (опыт 49); $\lambda=-3{,}79$

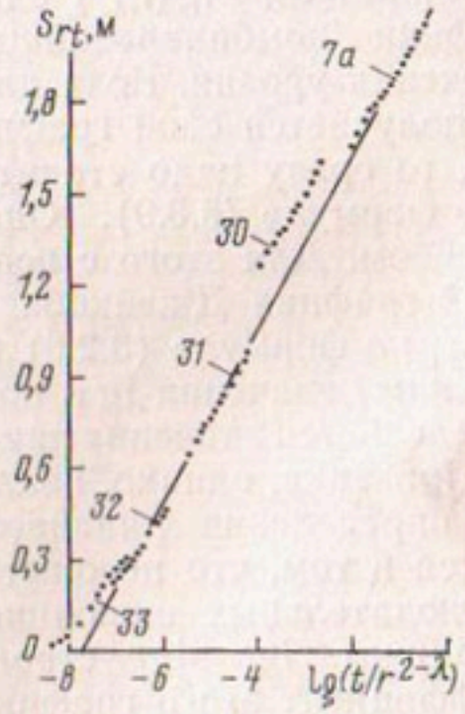


Рис. 5.29. Комбинированное (по автору) прослеживание восстановления УГВ в наблюдательных скв. 7а—33 после прекращения откачки из дренажной скв. 7, работавшей до остановки 24 ч с дебитом 125 м³/ч (опыт 22); $\lambda=-1{,}65$

коэффициентом i^*, то, естественно, для всей области фильтрации получается одно и то же постоянное значение водопроводимости.

Формула (5.3.17) и вытекающее из нее преобразование (5.5.3) позволяют определять гидрогеологические параметры и по данным восстановления УГВ после прекращения откачки (см. рис. 5.24 и 5.29). Опыты показали, что на территории ПОМС при восстановлении УГВ зависимости (5.3.49) и (5.3.52) имеют вид:

$$T = 15{,}0 + 0{,}6\,Q, \tag{5.5.5}$$

$$\lambda = 2{,}0 - 0{,}03\,Q, \tag{5.5.6}$$

где Q — в м³/ч; T — в м²/ч.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что разработанный метод определения гидрогеологических параметров с помощью преобразования (5.5.3) имеет ряд преимуществ перед методом Джейкоба и подтверждается опытами отечественных и зарубежных исследователей. На этом основании данный метод рекомендуется использовать при проектировании вертикального дренажа и в практике гидрогеологических изысканий.

Глава 6

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

Мы рассмотрели закономерности формирования УГВ и поведения гидрогеологических параметров в зоне квазистационарного (регулярного) режима при пуске скважины в работу. Однако на практике наблюдательные скважины нередко располагаются в удаленных областях возмущения, за пределами этой зоны. Поэтому установим границы распространения зоны квазистационарного режима и рассмотрим особенности поведения УГВ и гидрогеологических параметров в удаленных областях возмущения. Одновременно выясним закономерности восстановления УГВ в зоне регулярного режима и за ее пределами после остановки дренажных скважин. Исследование будем вести на примере гидрогеологических параметров i^*, a, T, μ, рассчитываемых соответственно по формулам (3.2.3), (3.2.5), (3.2.6) и (5.2.7) с использованием графиков временного и комбинированного прослеживания снижения и восстановления УГВ (рис. 1.6—1.11, 5.22—5.24, 5.27—5.29) *).

§ 6.1. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В УДАЛЕННЫХ ОБЛАСТЯХ ВОЗМУЩЕНИЯ

На рис. 6.1 и 6.2 приведены характерные графики функций $i^*=f(r)$ и $i^*=f(\lg r)$, построенные по данным опытных кустовых откачек из дренажных скважин опытного участка вертикального дренажа на ПОМС. Эти графики показывают,

*) **Костюкович П. Н.** О размещении наблюдательной сети при производстве опытных откачек. В кн.: Современные методы исследований и обработки данных в гидрогеологии, вып. 4. Ташкент, Тр. ГИДРОИНГЕО, 1978.

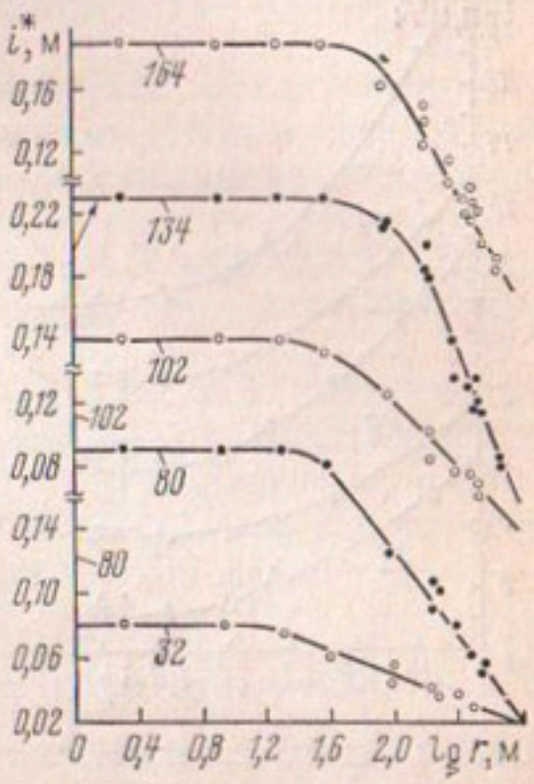


Рис. 6.1. Характер изменения параметра $i^*=0{,}183\ Q/T$ по радиусу депрессионной воронки при откачках из дренажной скв. 1. Цифры у кривых означают дебит скважины в м³/ч

что граница r_k области потока с постоянными величинами параметров i^* и T, называемая зоной регулярного режима, зависит от интенсивности возмущения и возрастает от 15—30 м при дебитах 30—40 м³/ч до 60—100 м и более при дебитах 150—160 м³/ч (рис. 6.1). График функции $\lg r_k = f(Q)$ аппроксимируется выражением

$$\lg r_k = 1{,}15 + 0{,}005\,Q, \qquad (6.1.1)$$

где Q — в м³/ч; r_k — в м.

Из рис. 6.1 и 6.2 видно, что радиус r_k круговой области потока с постоянными величинами i^* и T примыкает к опытной скважине и составляет не более 15—25% от величины уста-

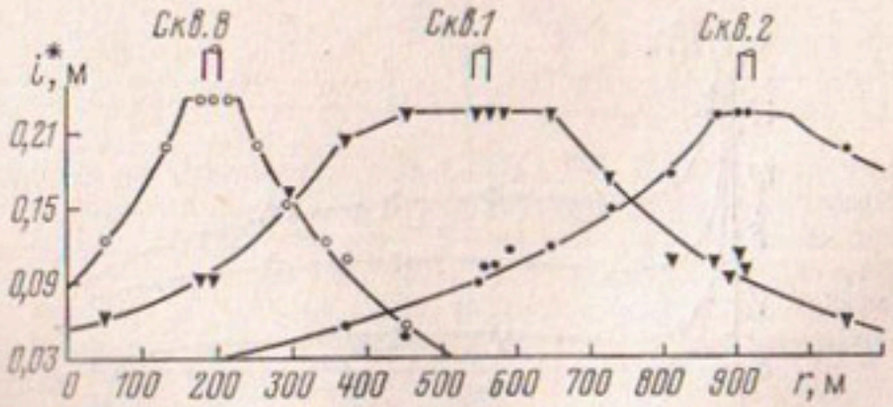


Рис. 6.2. Характер изменения параметра $i^*=0{,}183\ Q/T$ по диаметру депрессионных воронок при опытных откачках из дренажных скв. 8, 1, 2, работавших с дебитами соответственно 105, 134 и 132 м³/ч (опыты 64, 70, 76)

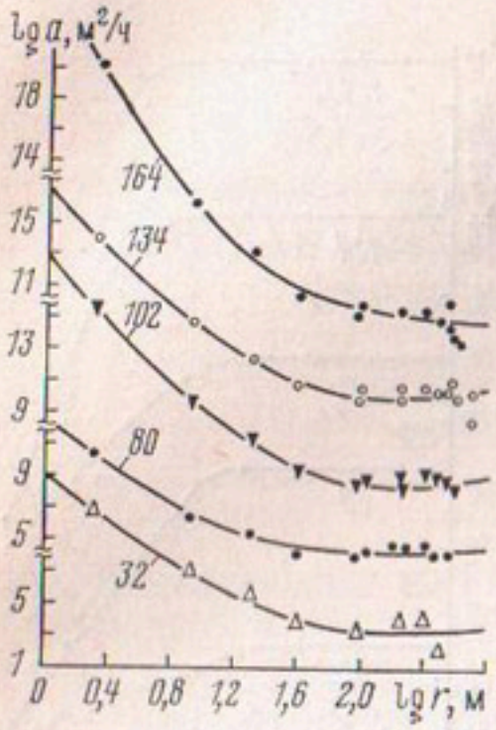


Рис. 6.3. Поведение функции $\lg a = f(\lg r)$ в зоне регулярного режима и за ее пределами при опытных откачках из дренажной скв. 1. Цифры у кривых означают дебит скважины в м³/ч

новившегося радиуса влияния депрессионной воронки. Это обстоятельство надо учитывать при размещении наблюдательной сети и оценке гидрогеологических параметров по данным кустовых откачек.

Натурные опыты показали (рис. 6.1), что за пределами границы r_k, т. е. для $r > r_k$, в однородных по проводимости пластах параметр i^* закономерно уменьшается с увеличением расстояния r по зависимости

$$i^*(r) = i^* + \alpha \lg (r/r_k), \qquad (6.1.2)$$

где $i^*(r)$ — величина параметра i^* в точке пласта $r > r_k$; α — угловой коэффициент прямой $i^*(r) = f(\lg r)$. Всегда $\alpha < 0$.

Выражения (6.1.1) и (6.1.2) могут найти широкое применение при проектировании вертикального дренажа и в практике гидрогеологических изысканий, поскольку позволяют сократить до одной количество наблюдательных скважин за

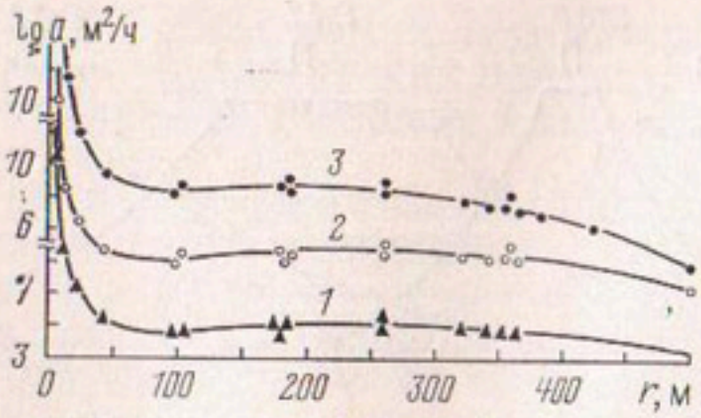


Рис. 6.4. Характер изменения логарифма коэффициента уровнепроводности по радиусу депрессионной воронки (створ А—А) при опытных откачках из дренажной скв. 1 с дебитами 102 (*1*), 134 (*2*) и 164 м³/ч (*3*). Опыты 69—71

пределами зоны r_k и с достаточной для практики точностью определить положение кривой депрессии в удаленных областях возмущения.

Расчеты снижения уровней в удаленных областях возмущения выполняются с большой точностью, если используется величина коэффициента уровнепроводности, характерная для этих областей. Выше мы установили, что в зоне регулярного режима ($r \leqslant r_k$) функция $\lg a = f(\lg r)$ имеет вид (5.3.1). Важно выяснить поведение этой функции за пределами данной зоны, т. е. при $r > r_k$.

Натурными опытами установлено (рис. 6.3—6.5), что в условиях Полесья при осушении торфяников, подстилаемых песками, параметры функции $\lg a = f(\lg r)$ зависят от интенсивности возмущения и для зоны 2 м $\leqslant r \leqslant$ 100 м имеют следующие осредненные значения (везде $r_k = 100$ м):

при дебитах 30—40 м³/ч

$$\lg a_r = 7{,}5 - 1{,}7 \lg r, \text{ для } r > 100 \text{ м } \lg a_r = 4{,}0; \quad (6.1.3)$$

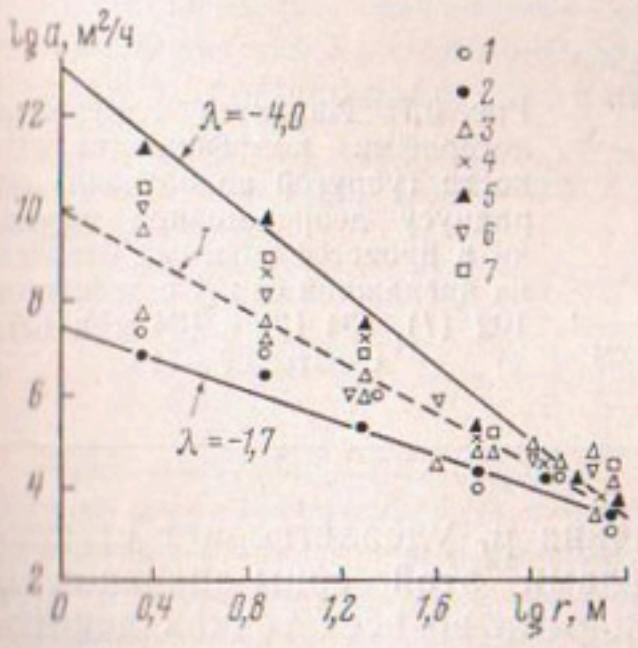


Рис. 6.5. Влияние интенсивности возмущения на положение кривых $\lg a = f(\lg r)$ при работе дренажной скв. 7 с дебитами 40 (*1*), 59 (*2*), 80 (*3*), 110 (*4*), 125 (*5*), 140 (*6*) и 145 м³/ч (*7*). Осредненная кривая *I* аппроксимируется формулой $\lg a_r = 10{,}0 - 2{,}7 \lg r$, где $r \leqslant 160$ м; для значений $r > 160$ м имеем $a_r = 10^4$ м²/ч (участок вертикального дренажа на ПОМС)

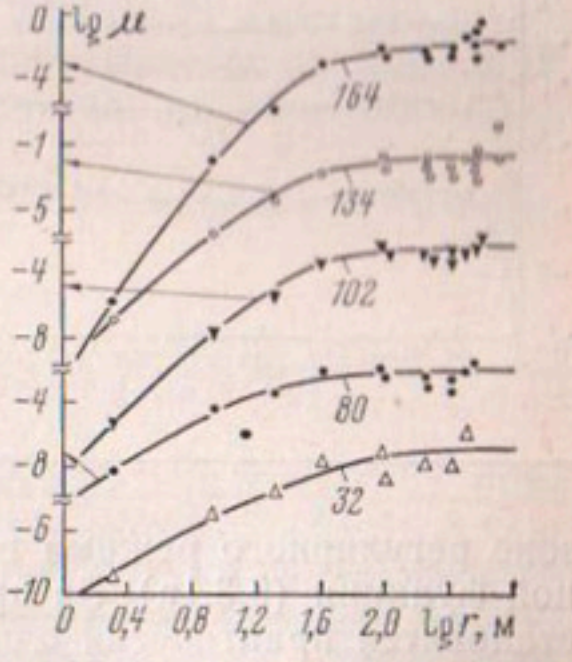


Рис. 6.6. Поведение функции $\lg \mu = f(\lg r)$ в зоне регулярного режима и за ее пределами при опытных откачках из дренажной скв. 1. Цифры у кривых означают дебит скважины в м³/ч

при дебитах 100—120 м³/ч

$$\lg a_r = 10{,}5 - 3{,}0 \lg r, \text{ для } r > 100 \text{ м } \lg a_r = 4{,}0; \quad (6.1.4)$$

при дебитах 150—170 м³/ч

$$\lg a_r = 13{,}0 - 4{,}2 \lg r, \text{ для } r > 100 \text{ м } \lg a_r = 4{,}5. \quad (6.1.5)$$

Здесь a_r — в м²/ч; r — в м.

Характер изменения коэффициента упругой водоотдачи (емкости) пласта μ_r в зоне регулярного режима и за ее пределами аналогичен описанным закономерностям изменения коэффициента уровнепроводности вдоль радиуса депрессионной воронки r. Типичные графики функций $\lg\mu_r = f(r)$ и $\lg\mu_r = f(\lg r)$ приведены на рис. 6.6 и 6.7. Из них следует, что в

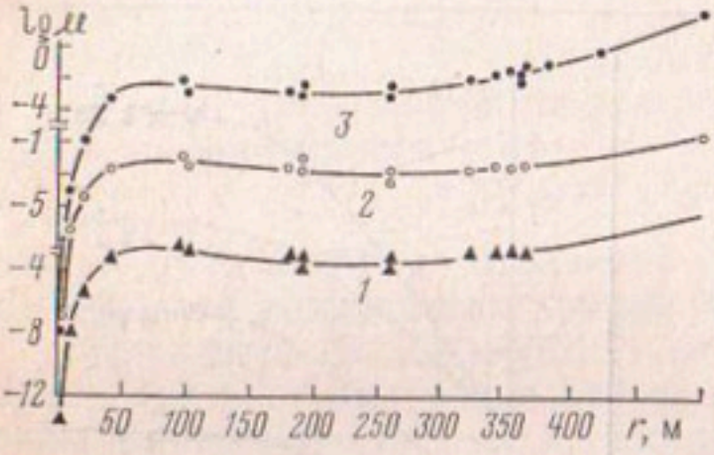


Рис. 6.7. Характер изменения логарифма коэффициента емкости (упругой водоотдачи) по радиусу депрессионной воронки в процессе опытных откачек из дренажной скв. 1 с дебитами 102 (*1*), 134 (*2*) и 164 м³/ч (*3*). Опыты 69—71

зоне регулярного режима величина μ_r удовлетворяет степенной функции (5.3.1а). За пределами этой зоны значения μ_r становятся практически одинаковыми во всех точках депрессионной воронки и равны 0,01—0,001 при любых Q. Наоборот, для $r < r_k$ величины μ_r существенно зависят от Q. Степень этой зависимости резко уменьшается по мере удаления точек от возмущающей скважины. Вблизи возмущающей скважины при увеличении Q от 50—70 до 160—170 м³/ч значения μ_r уменьшаются от 10^{-8}—10^{-9} до 10^{-15}—10^{-18}.

Полученные зависимости имеют место также и при восстановлении УГВ после остановок дренажных скважин.

§ 6.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УГВ ПОСЛЕ ОСТАНОВОК ДРЕНАЖНЫХ СКВАЖИН

Пусть в некоторый момент времени $t=0$ скважина пущена в эксплуатацию с постоянным дебитом Q. В момент времени t_0 скважина мгновенно остановлена и началось восстановление (поднятие) пониженного уровня. Требуется определить положение неустановившейся депрессионной поверхности в любой точке пласта на любой момент времени после остановки скважины. Д. Р. Хорнер установил [13, 126, 130], что если t_0 — продолжительность откачки (работы скважины), а t — продолжительность восстановления, то положение депрессионной поверхности на любой момент времени t после остановки скважины характеризуется формулой

$$S_{rt} = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t}{t_0 + t} = \frac{0{,}183\,Q}{T} \lg \frac{t}{t_0 + t}, \quad (6.2.1)$$

где S_{rt} — величина восстановления уровня в точке r на момент времени t, отсчитываемого от начала восстановления, т. е. от момента t_0. Величина S_{rt} отсчитывается от положения депрессионной поверхности, фиксируемой в момент остановки скважины t_0.

Применим (6.2.1) для двух моментов времени восстановления уровня

$$S_{rt_2} - S_{rt_1} =$$

$$= \frac{Q}{4\pi T}[\ln t_2 - \ln t_1 + \ln(t_0 + t_1) - \ln(t_0 + t_2)]. \quad (6.2.2)$$

Для значений $t \ll t_0$ имеем $\ln(t_0+t_1) \approx \ln(t_0+t_2)$. В этом случае выражение (6.2.2) переходит в формулу (3.2.3) и указывает на то, что при восстановлении уровня также имеется зона, в которой графики временного прослеживания восстановления уровня $S_{rt}=f(\lg t)$ параллельны друг другу, т. е. имеют общий угловой коэффициент i^*.

Для проверки этого вывода были обработаны результаты восстановления УГВ при опытных кустовых откачках из ряда дренажных скважин в зоне Полесья. Опыты подтвердили существование зоны с постоянными величинами параметров i^* и T, рассчитываемых соответственно по формулам (3.2.3) и (3.2.6) (рис. 6.8 и 6.9). За пределами указанной зоны, как видно из рис. 6.8 и 6.1, функции $i^*(r)$ при снижении и восстановлении уровня ведут себя идентично и удовлетворяют за-

висимости (6.1.2). То же самое можно сказать и относительно изменения параметра T по радиусу депрессионной воронки при восстановлении и снижении уровня (см. рис. 6.9).

Это обстоятельство можно использовать для обоснования возможности определения гидрогеологических параметров при восстановлении уровня по формулам, полученным для пуска скважины в работу. Поэтому в работе [53] величины коэффициентов пьезопроводности a и емкости μ при восстановлении уровня рекомендовалось определять по тем же формулам (3.2.5) и (5.2.7), которые применяются для расчета этих параметров по данным снижения уровня.

Натурными опытами установлено, что при восстановлении уровня графики функций $\lg a = f(r, \lg r)$ и $\lg \mu = f(r, \lg r)$, в которых параметры a и μ рассчитаны по формулам (3.2.5) и (5.2.7), в большинстве случаев ведут себя точно так же, как и при снижении уровня (рис. 6.10, 6.11).

В работах [13, 113] для определения коэффициента

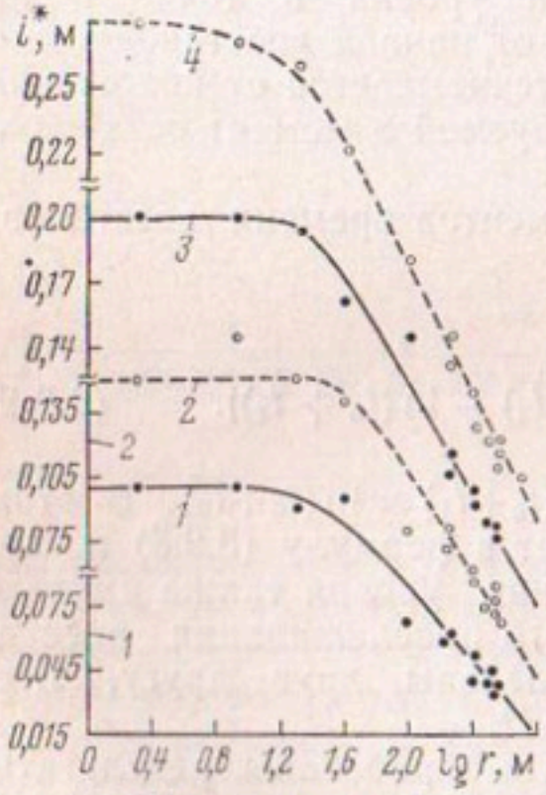


Рис. 6.8. Характер изменения параметра $i^* = 0{,}183\ Q/T$ по радиусу депрессионной воронки при восстановлении УГВ после остановки дренажной скв. 1, работавшей до остановки с дебитами 61 (*1*), 80 (*2*), 102 (*3*) и 164 м³/ч (*4*)

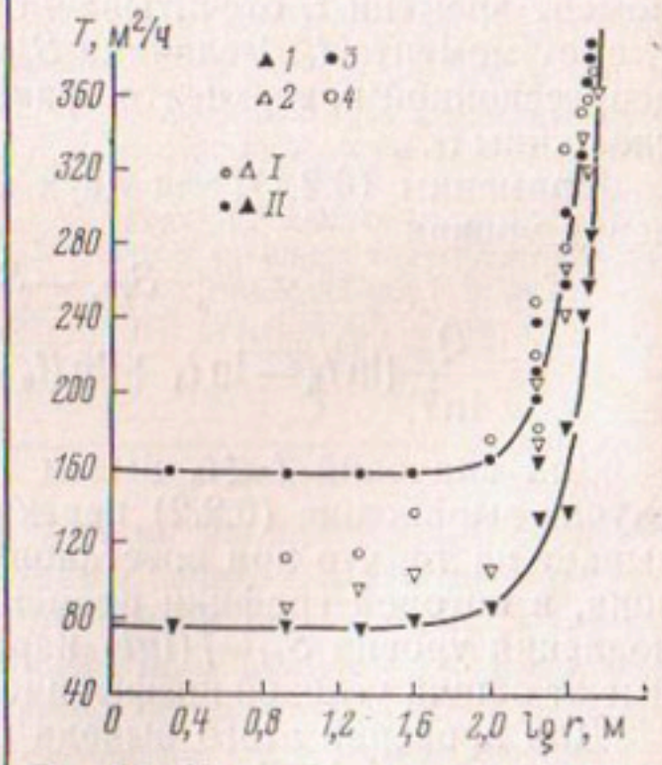


Рис. 6.9. Характер изменения по радиусу депрессионной воронки коэффициента водопроводимости при снижении (*I*) и восстановлении (*II*) уровня в процессе откачек из дренажной скв. 1 с дебитами 80 (*1, 2*) и 164 м³/ч (*3, 4*). Опыты 68, 71

пьезопроводности по данным восстановления уровня рекомендуется зависимость

$$\lg a = S_{rt_0}/c + 2\lg r - \lg 2{,}25\, t_0, \qquad (6.2.3)$$

где

$$c = 0{,}183\, Q/T \qquad (6.2.4)$$

— угловой коэффициент графика временного прослеживания восстановления уровня $S_{rt} = f\{\lg[t/(t_0 + t)]\}$, характеризуемого формулой (6.2.1); S_{rt_0} — величина понижения уровня в точке r в момент остановки скважины t_0. От положения S_{rt_0} отсчитываются величины восстановления уровня S_{rt}. Продолжительность восстановления t отсчитывается от момента времени $t = 0$.

Указывается [13, 113], что зависимость (6.2.3) находит широкое подтверждение в натурных условиях при обработке данных восстановления уровня после прекращения откачек.

Путем несложных преобразований можно показать, что формула Б. Г. Самсонова (6.2.3) представляет собой выражение (5.3.1), опубликованное значительно раньше в работах

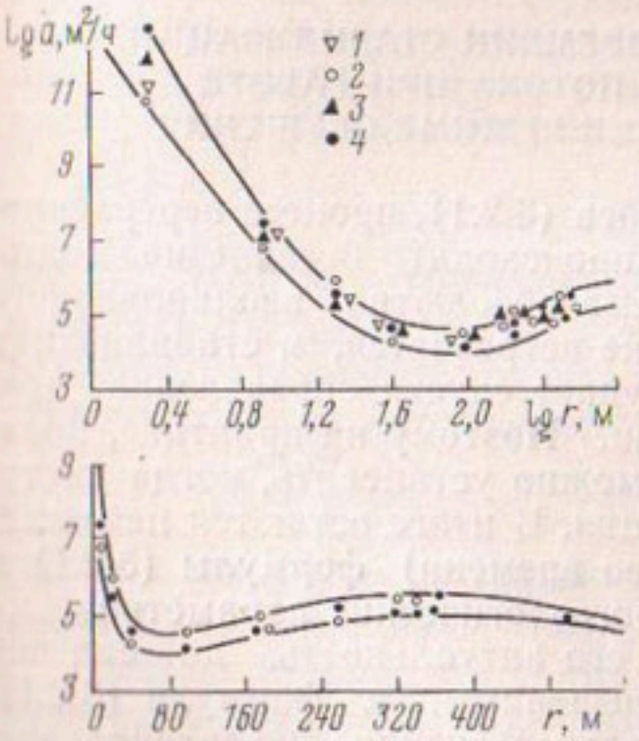


Рис. 6.10. Характер кривых $\lg a = f(r, \lg r)$ при восстановлении УГВ после остановок дренажной скв. 1, работавшей до остановок с дебитами 32 (*1*), 61 (*2*), 102 (*3*) и 164 м³/ч (*4*). Опыты 66, 67, 69 и 71

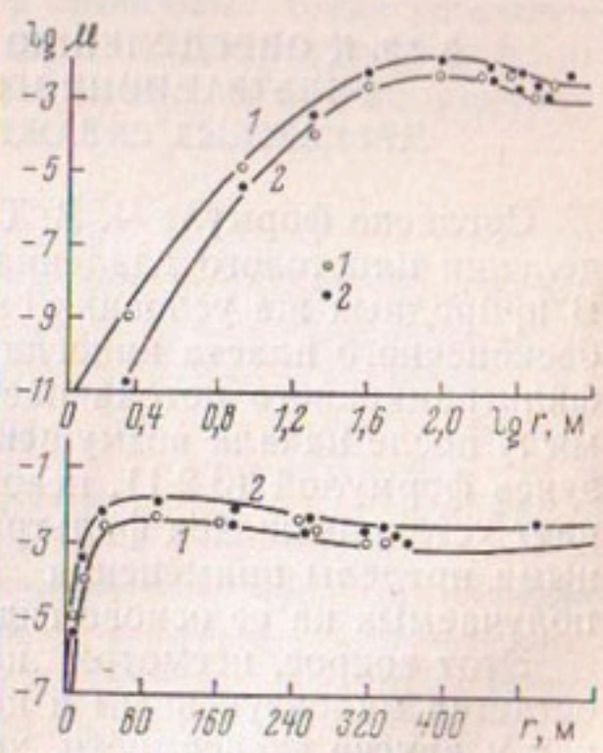


Рис. 6.11. Функции $\lg \mu = f(r, \lg r)$ при восстановлении УГВ после остановок дренажной скв. 1, работавшей до остановок с дебитами 61 (*1*) и 164 м³/ч (*2*). Опыты 67 и 71

[53, 57, 61, 66] как закон изменения коэффициента пьезопроводности вдоль координаты r в зоне регулярного режима. Действительно, поскольку понижения S_{rt_0} удовлетворяют формулам (3.2.1) и (5.2.2), то после замены величины S_{rt_0} в (6.2.3) ее значением по (5.2.2) получаем

$$\lg a = (A_{t_0}/c - \lg 2{,}25\, t_0) + (2 - i_D^*/c) \lg r, \qquad (6.2.5)$$

где A_{t_0} — величина понижения уровня в точке $r=1$ на момент времени $t_0 = \text{const}$.

Вводя обозначения

$$\lg a_r^0 = A_{t_0}/c - \lg 2{,}25\, t_0 = \text{const}, \qquad (6.2.6)$$

$$\lambda = 2 - i_D^*/c = \text{const}, \qquad (6.2.7)$$

обнаруживаем, что выражения (6.2.5) и (6.2.3) представляют собой закономерность (5.3.1). Это еще раз подтверждает достоверность и широкое распространение в натурных условиях эффекта квазилинейности и вытекающих из него положений.

§ 6.3. К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВРЕМЕНИ СТАБИЛИЗАЦИИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА ПРИ РАБОТЕ ДРЕНАЖНЫХ СКВАЖИН В РЕЖИМЕ ОСУШЕНИЯ

Согласно формуле Ч. В. Тейса (3.2.1), процесс перераспределения пластового давления происходит бесконечно долго. В природных же условиях схема абсолютно изолированного бесконечного пласта никогда не встречается, и стабилизация фильтрационного потока наступает спустя определенное время t_y после начала возмущения. Поэтому на практике, пользуясь формулой (3.2.1), невозможно установить, когда наступает установившаяся фильтрация. В итоге остаются неизвестными пределы применения (во времени) формулы (3.2.1) и получаемых на ее основе гидрогеологических параметров.

Этот вопрос, несмотря на его актуальность, до сих пор остается малоизученным и нерешенным, и формула (3.2.1), как и другие зависимости, характеризующие перераспределение уровней в полубесконечных и открытых конечных пластах, применяется для любых по продолжительности интервалов времени (при проектировании водозаборов подземных вод, например, неустановившаяся фильтрация рассчитывается на 20—40 лет вперед).

Такая методика расчета неустановившейся фильтрации в

природных условиях приводит к определенным погрешностям, которые можно оценить, если проанализировать один из типичных примеров расчета неустановившегося движения подземных вод, содержащихся в учебниках и методических руководствах.

Результаты опытной кустовой откачки, приведенные в работе [8, табл. 19], могут служить таким примером. Анализ данных этой откачки приведен в [63, 69]. Пользуясь полученными параметрами i^* и a и формулой (3.2.1), мы произвели расчеты понижения уровня в возмущающей и наблюдательных скважинах. Погрешность расчетов определялась по формуле

$$\Delta_{rt} = (S_{rt} - S'_{rt})/S'_{rt}, \qquad (6.3.1)$$

где Δ_{rt} — отклонение фактических понижений уровня S'_{rt} от теоретических S_{rt}, рассчитываемых по формуле (3.2.1), в точке r в момент времени t при дебите $Q = \text{const}$.

Исследования показали, что погрешность расчетов Δ_{rt} возрастает с течением времени и удалением расчетных точек от центра возмущения по строго определенной зависимости. Путем построения соответствующих графиков было установлено, что функции $\Delta_{rt} = f(\ln t)$, начиная с некоторого момента времени, для любых точек пласта являются прямолинейными и исходят из одной и той же точки $\ln \bar{t}$ [63, 69]

$$\Delta_{rt} = \gamma_r \ln (t/\bar{t}), \qquad (6.3.2)$$

где γ_r — угловой коэффициент прямолинейного участка графика $\Delta_{rt} = f(\ln t)$ в точке r; $\ln \bar{t}$ — отрезок оси $\ln t$, отсекаемый продолжением прямолинейных участков графиков $\Delta_{rt} = f(\ln t)$.

Функция $\gamma_r = f(\ln r)$ имеет вид

$$\gamma_r = \delta_r \ln (r/\bar{r}), \qquad (6.3.3)$$

где δ_r — угловой коэффициент графика $\gamma_r = f(\ln r)$; $\ln \bar{r}$ — отрезок оси $\ln r$, отсекаемый графиком $\gamma_r = f(\ln r)$.

Графики функции $\Delta_{rt} = f(\ln r)$ для любых значений t прямолинейны и исходят из одной точки $\ln \bar{\bar{r}}$:

$$\Delta_{rt} = \gamma_t \ln (r/\bar{\bar{r}}), \qquad (6.3.4)$$

где γ_t — угловой коэффициент графика $\Delta_{rt} = f(\ln r)$ в момент времени t; $\ln \bar{\bar{r}}$ — отрезок оси $\ln r$, отсекаемый графиками $\Delta_{rt} = f(\ln r)$.

С некоторого момента времени функция $\gamma_t = f(\ln t)$ имеет вид

$$\gamma_t = \delta_t \ln(t/\bar{\bar{t}}), \tag{6.3.5}$$

где δ_t — угловой коэффициент прямолинейного участка графика $\gamma_t = f(\ln t)$; $\ln \bar{\bar{t}}$ — отрезок оси $\ln t$, отсекаемый продолжением прямолинейного участка графика $\gamma_t = f(\ln t)$.

Графики рассмотренных функций (6.3.2) — (6.3.5) приведены в работах [63, 69].

Учитывая (6.3.3) и (6.3.5), из (6.3.2) и (6.3.4) получаем зависимости для расчета величины ошибки в любой точке пласта в любой момент времени при пользовании формулой (3.2.1):

$$\Delta_{rt} = \delta_r \ln(r/\bar{r}) \ln(t/\bar{t}) \tag{6.3.6}$$

или

$$\Delta_{rt} = \delta_t \ln(r/\bar{\bar{r}}) \ln(t/\bar{\bar{t}}). \tag{6.3.7}$$

Из (6.3.1) и (3.2.1) получаем

$$S_{rt} = \frac{i}{1+\Delta_{rt}} \left[-\mathrm{Ei}\left(-\frac{r^2}{4at}\right)\right], \tag{6.3.8}$$

где поправка Δ_{rt} рассчитывается по (6.3.6) или (6.3.7); $i = Q/4\pi T$; $a = \mathrm{const} \neq f(r)$ — коэффициент пьезопроводности.

При использовании формулы (5.3.17) будет иметь место только «временная» поправка на определение фактических понижений S'_{rt}, поскольку поправка по координате r в этом случае компенсируется закономерностью (5.3.1).

Таким образом, сопоставление реальных и идеальных графиков временного прослеживания изменения уровня показывает, что теоретические величины понижений уровня отклоняются от фактических по определенной зависимости. Отсюда можно заключить, что реальные графики временного прослеживания уровня характеризуются определенной функцией. Это явление можно объяснить тем, что в природных условиях перетекание между пластами всегда имеет место и при наличии возмущения также характеризуется определенной закономерностью [63].

Для апробирования полученных формул были проведены многочисленные опыты на водозаборных и дренажных скважинах с целью изучения характера реальных графиков временного прослеживания изменения уровня $S'_{rt} = f(\ln t)$ в «бесконечных» пластах с момента пуска (остановки) скважины до стабилизации уровня. Во всех случаях имели место за-

висимости (6.3.2) — (6.3.5). Это свидетельствует о том, что реальные графики $S_{rt}' = f(\ln t)$ имеют прямолинейный участок на весьма ограниченном диапазоне развития неустановившейся фильтрации $\Delta t_к = t_к - t_н$, где $t_н$ и $t_к$ — соответственно начало и конец прямолинейного участка; $\Delta t_к$ — продолжительность квазистационарного режима. Если $t_у$ — время стабилизации фильтрационного потока, то промежуток времени $\Delta t_п = t_у - t_к$ следует назвать продолжительностью переходного режима.

В работе [76] предложен графо-аналитический способ определения времени стабилизации фильтрационного потока $t_у$ и продолжительности развития квазистационарного режима $\Delta t_к$ применительно к опытным кустовым откачкам. Способ требует наличия определенного опыта обработки экспериментальных графиков $S_{rt}' = f(\lg t)$ и $S_{rt}' = f(t)$ в рассматриваемых гидрогеологических условиях и основан на использовании зависимости (5.3.43) или

$$\partial S/\partial t = i/t_у = i^*/2{,}3\, t_у \qquad (6.3.9)$$

по расчету теоретической скорости снижения уровня в зоне регулярного режима.

Если в данных гидрогеологических условиях стабилизация фильтрационного потока наступает в момент времени $t_у$, когда расчетная скорость снижения уровня $\partial S/\partial t$ равна $V_р$ м/сут, то время стабилизации $t_у$ можно рассчитать по формуле

$$t_у = i/V_р = i^*/2{,}3\, V_р = 0{,}08\, Q/TV_р, \qquad (6.3.10)$$

где i, i^* — в м; Q — в м³/сут; T — в м²/сут.

Очевидно, в момент времени $t_у$ действительная скорость снижения уровня $V_д$ в зоне регулярного режима будет значительно меньше расчетной $V_р$.

Из (6.3.10) следует, что с увеличением дебита скважины время стабилизации фильтрационного потока возрастает по линейной зависимости. Это говорит о том, что продолжительность опытных откачек должна назначаться в зависимости от величины запроектированного дебита или понижения уровня.

При опытных кустовых откачках из безнапорных горизонтов Полесья стабилизация уровней наступает при $V_р = (0{,}02—0{,}03)$ м/сут, если дебиты скважин изменяются от 30 до 240 м³/ч, а величина $V_р$ рассчитывается для зоны регулярного режима, где значения i^* постоянны (эта зона заключается в интервале $2\text{ м} \leqslant r \leqslant (30—100)$ м). Тогда, согласно формуле (6.3.10), продолжительность неустановившегося перио-

да фильтрации $t_у$ при увеличении дебита скважин от 30 до 240 м³/ч будет возрастать от 1,5 до 20 сут, поскольку значения параметра i^* при этом также увеличиваются от 0,07—0,09 до 0,09—1,1 м. В таких условиях $\Delta t_к \leqslant (0{,}5—0{,}7)\ t_у$.

§ 6.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАНОВИВШЕЙСЯ БЕЗНАПОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ К ДРЕНАМ

Теория установившейся безнапорной фильтрации к дренам построена на предположении, что свободная (депрессионная) поверхность грунтового потока представляет собой линию тока. Это предположение приводит к известным парадоксам формулы Дюпюи для установившейся фильтрации грунтовых вод к совершенной скважине

$$Q = \frac{\pi k_D (h_r^2 - h_0^2)}{\ln (r/r_0)} = \frac{\pi k_D (H^2 - h_r^2)}{\ln (R/r)} = \frac{\pi k_D (H^2 - h_0^2)}{\ln (R/r_0)} \qquad (6.4.1)$$

и представляет собой главную трудность как для разработки теории притока к несовершенным дренам, так и для точных решений задач свободной фильтрации и до настоящего времени не получило экспериментального подтверждения. Поэтому для изучения характера движения грунтовых вод к дренам были проведены специальные опыты на фильтрационных лотках [53, 59, 73]. Они показали, что в случае грунтовых скважин с затопленным фильтром прямолинейный характер индикаторных кривых $Q=f(S_c)$ соблюдается до точки перехода промежутка нависания ΔH в промежуток высачивания Δh, т. е. до точки, когда свободная поверхность грунтового потока начинает опускаться уже по перфорированной части фильтра. Этот факт и характер индикаторных кривых $Q=f(S_c)$ доказывают, что грунтовые скважины с затопленным фильтром и закрытым дном работают как артезианские совершенные скважины в пласте, мощность которого m равна длине затопленной части фильтра h_0. Отсюда следует, что закономерности формирования депрессионной поверхности грунтового потока и пьезометрической поверхности напорного потока практически идентичны. Из этого вывода вытекают следующие положения, также подтверждаемые опытами.

При работе скважины с затопленным фильтром и закры-

тым дном длина затопленной части фильтра h_0, т. е. мощность фильтрационного потока, остается постоянной. Поэтому и наблюдается прямолинейность графиков $Q=f(S_c)$ и $\Delta H=f(S_c)$, где $S_c=H-h_c$ — понижение уровня внутри скважины; $\Delta H=h_0-h_c$ — величина промежутка нависания, наблюдаемого у дрен с затопленным фильтром.

При работе совершенной грунтовой скважины длина затопленной части фильтра h_0, т. е. мощность фильтрационного потока, при увеличении понижения в скважине S_c (и по ее внешней стенке S_0) уменьшается. Это значит, что совершенная грунтовая скважина работает как артезианская, заложенная в пласте, мощность которого m изменяется и всегда равна длине фильтра h_0.

Аналогично совершенной грунтовой скважине работает несовершенная с незатопленным фильтром и закрытым дном. При этом, очевидно, мощность потока также равна длине затопленной части фильтра h_0.

При работе несовершенной грунтовой скважины с проницаемыми стенками и дном мощность потока равна сумме длины затопленной части фильтра и мощности активной зоны фильтрации (или расстояния от дна скважины до подошвы пласта в случае незначительной его мощности). Отсюда следует, что скважины, работающие только дном, будут иметь прямолинейные графики $Q=f(S_c)$, $\Delta H=f(S_c)$ и $\Delta H=f(Q)$.

Отмеченные выводы дают основание считать, что движение подземных вод как в артезианских, так и в грунтовых пластах подчиняется теории напорной фильтрации. Это значит, что депрессионные и пьезометрические поверхности однотипных грунтовых и артезианских потоков также аналогичны и характеризуются одними и теми же уравнениями. Многочисленные эксперименты, проведенные в фильтрационных лотках на скважинах и горизонтальных дренах, подтвердили эти положения. В частности, было обнаружено, что депрессионная поверхность одномерного грунтового потока при установившемся режиме также прямолинейна (в разрезе) и, следовательно, аналогична пьезометрической поверхности одномерного напорного потока. Отсюда следует, что затопленные горизонтальные дрены работают как артезианские и должны рассчитываться по формулам теории напорной фильтрации [53, 58, 59, 73].

Полученные выводы о движении грунтовых вод к дренам позволяют в большинстве случаев механически переносить теорию напорной фильтрации к решению задач безнапорной фильтрации. Приведем примеры.

Воспользуемся уравнением Лапласа для осесимметричного потока

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial S}{\partial r} = 0. \qquad (6.4.2)$$

Его решение дает

$$r\,(dS/dr) = c_1 \text{ или } dS/dr = c_1/r. \qquad (6.4.3)$$

Интегрируя последнее выражение, получаем общее уравнение установившейся депрессионной поверхности при напорной и безнапорной осесимметричной фильтрации

$$S_r = c_1 \ln r + c_2. \qquad (6.4.4)$$

Для определения постоянных c_1 и c_2 воспользуемся граничными условиями: на границах области фильтрации, т. е. на контуре стока (внутренняя граница):

$$S|_{r=r_0} = S_0,\ dS/dr|_{r=r_0} = Q/2\pi k_0 h_0 r_0 \qquad (6.4.5)$$

и на контуре питания (внешняя граница)

$$S|_{r=R} = 0,\ dS/dr|_{r=R} = Q/2\pi k_0 h_0 R, \qquad (6.4.6)$$

а также во внутренних точках потока

$$S|_r = S_r,\ dS/dr|_r = Q/2\pi k_0 h_0 r, \qquad (6.4.7)$$

где Q — расход потока (дебит скважины); $S_0 = H - h_0$ — понижение депрессионной поверхности в пласте во внешней стенке возмущающей скважины радиуса r_0; h_0 — мощность фильтрационного потока на контуре стока (при безнапорной фильтрации $h_0 = f(S_0)$, при напорной $h_0 = \text{const}$); $H = h_0 + S_0 = h_c + S_c$ — то же, на расстоянии радиуса влияния R.

Решая задачу (6.4.5) — (6.4.7) для уравнения Лапласа, определим, что при любых граничных условиях $c_1 = Q/2\pi k_0 h_0$, а значения постоянной c_2 составляют: $S_0 - c_1 \ln r_0$ — для контура стока; $-c_1 \ln R$ — для контура питания; $S_r - c_1 \ln r$ — для внутренних точек области фильтрации.

Учитывая значения c_1 и c_2, из (6.4.4) получаем формулу расхода и депрессионной поверхности для установившейся напорной и безнапорной фильтрации к скважине [53, 58, 59, 64, 71—74]

$$Q = \frac{2\pi k_0 h_0 (S_0 - S_r)}{\ln (r/r_0)} = \frac{2\pi k_0 h_0 S_r}{\ln (R/r)} = \frac{2\pi k_0 h_0 S_0}{\ln (R_0/r_0)}, \qquad (6.4.8)$$

где k_0 — величина коэффициента фильтрации, определяемая по данной формуле.

При h_0=const выражение (6.4.8) аналогично известной формуле Дюпюи для осесимметричной напорной фильтрации и, следовательно, позволяет одними и теми же способами моделировать напорные и безнапорные фильтрационные поля. Действительно, поскольку при моделировании на электропроводной бумаге мощность фильтрационного потока (толщина бумаги) остается постоянной (h_0=const), то из (6.4.8) получаем [64, 74]

$$Q = Q_м - bS_0^2, \qquad (6.4.9)$$

где Q—расход напорного или безнапорного потока мощностью h_0 при понижении уровня S_0 на контуре стока; $Q_м = bHS_0$— опытное значение расхода потока (силы тока), снимаемое с прибора ЭГДА и соответствующее расходу напорного потока мощностью $H = h_0 + S_0$ при понижении уровня S_0 на контуре стока; $\Delta Q = bS_0^2$—расход напорного потока мощностью S_0 при понижении уровня S_0 на контуре стока; $b = 2\pi k_0/\ln(R/r_0)$.

С помощью формулы (6.4.9) осуществляется переход от значений расхода $Q_м$ напорного потока мощностью H к значениям расхода Q безнапорного потока той же мощности и при тех же понижениях уровня S_0 на контуре стока. Делается это следующим образом. Пусть требуется смоделировать работу дренажа в безнапорном пласте мощностью H. Для этого данный пласт заменяем напорным мощностью H с теми же фильтрационными свойствами и граничными условиями. В напорном пласте моделируется поставленная задача и в приборе замеряются опытные значения $Q_м$ и депрессионные поверхности. Затем по формуле (6.4.9) полученные величины $Q_м$ пересчитываются на реальные Q, соответствующие работе дренажа в безнапорном пласте мощностью H.

По аналогии с (6.4.8) единичный односторонний приток грунтовых вод к каналу (галерее) будет определяться выражением

$$q = \frac{k_0 h_0 (S_n - S_{n+1})}{r_{n+1} - r_n} = \frac{k_0 h_0 S_r}{R - r} = \frac{k_0 h_0 S_0}{R}. \qquad (6.4.10)$$

Формулы (6.4.8) и (6.4.10) можно получить и другим способом. Для этого грунтовой поток к скважине разделим горизонтальной плоскостью, проходящей на расстоянии S_0 от статического уровня (или на удалении h_0 от подошвы пласта),

на два потока: нижний (напорный) $Q_н$ и верхний (безнапорный) $Q_в$. Тогда, согласно (6.4.1), общий расход потока будет состоять из суммы расходов $Q_н$ и $Q_в$:

$$Q = \frac{\pi k_D (H^2 - h_0^2)}{\ln (R/r_0)} = \frac{2\pi k_D h_0 S_0}{\ln (R/r_0)} + \frac{\pi k_D S_0^2}{\ln (R/r_0)}, \quad (6.4.11)$$

где первое и второе слагаемые равны расходам соответственно нижнего и верхнего потоков

$$Q_н = \frac{2\pi k_D h_0 S_0}{\ln (R/r_0)}; \quad Q_в = \frac{\pi k_D S_0^2}{\ln (R/r_0)}. \quad (6.4.12)$$

На рис. 6.12 равенство (6.4.11) представлено графически. Кривая *1* относится к общему расходу грунтового потока Q согласно формуле Дюпюи (6.4.1). Кривые *2* и *3* изображают соответственно слагаемым в двукратном равенстве (6.4.11) расходы нижнего $Q_н$ (кривая *2*) и верхнего $Q_в$ (кривая *3*) потоков. Кривая *4* представляет собой график функции $Q = f(S_0/H)$, характеризуемой формулами (6.4.8) и (6.4.10).

Второе слагаемое в равенстве (6.4.11), определяющее величину расхода верхнего потока $Q_в$, представляет собой максимальный расход безнапорного потока, мощность которого на контуре питания равна S_0, а на контуре стока — нулю, т. е. здесь $h_0 = 0$. Но в этом случае, согласно закону Дарси, расход также равен нулю, т. е. $Q_в = 0$, и никакого потока существовать не может. Отсюда следует, что при движении грунтовых вод к дренам расход потока равен расходу нижнего (напорного) потока и определяется формулами (6.4.8) или (6.4.10).

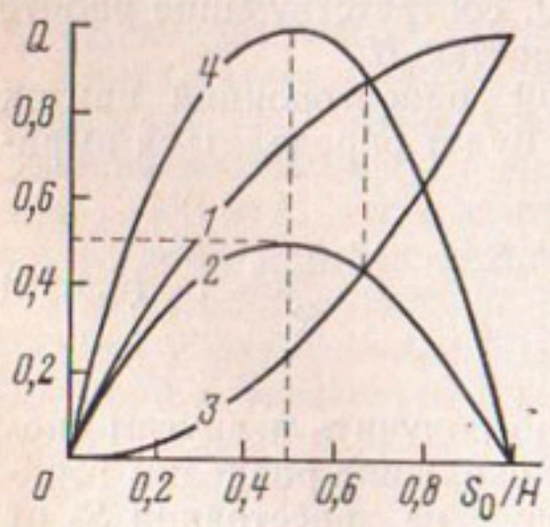


Рис. 6.12. Функции $Q = f(S_0/H)$ для установившихся грунтовых потоков согласно теории безнапорной фильтрации Дюпюи и автора

Опыты на физических моделях полностью подтверждают эти выводы (см. рис. 6.13).

Проанализируем полученные зависимости.

Нулевые значения дебита, очевидно, будут наблюдаться при $h_0=S_0=0$. Эти условия соответствуют закону Дарси и, таким образом, лишают зависимости (6.4.8) и (6.4.10) тех принципиальных противоречий или парадоксов, которые присущи формулам Дюпюи для безнапорной фильтрации и, в частности, выражению (6.4.1). Как известно, согласно этим формулам Дюпюи, при $h_0=0$ наблюдается максимальный расход потока $Q=Q_{max}$, чего быть не может по физическим причинам.

Для определения условий, при которых будет наблюдаться максимальный дебит, необходимо исследовать зависимости (6.4.8) и (6.4.10) на условный экстремум. Ограничимся условием, что $R=\text{const}$ и $H=\text{const}$. Тогда при

$$S_0 = h_0 = H/2 \qquad (6.4.13)$$

будет наблюдаться максимум функции $Q=f(h_0, S_0)$.

Условие (6.4.13) показывает, что формулы (6.4.8) и (6.4.10) соответствуют закону Дарси и находят полное подтверждение в первой теории гравитационной фильтрации

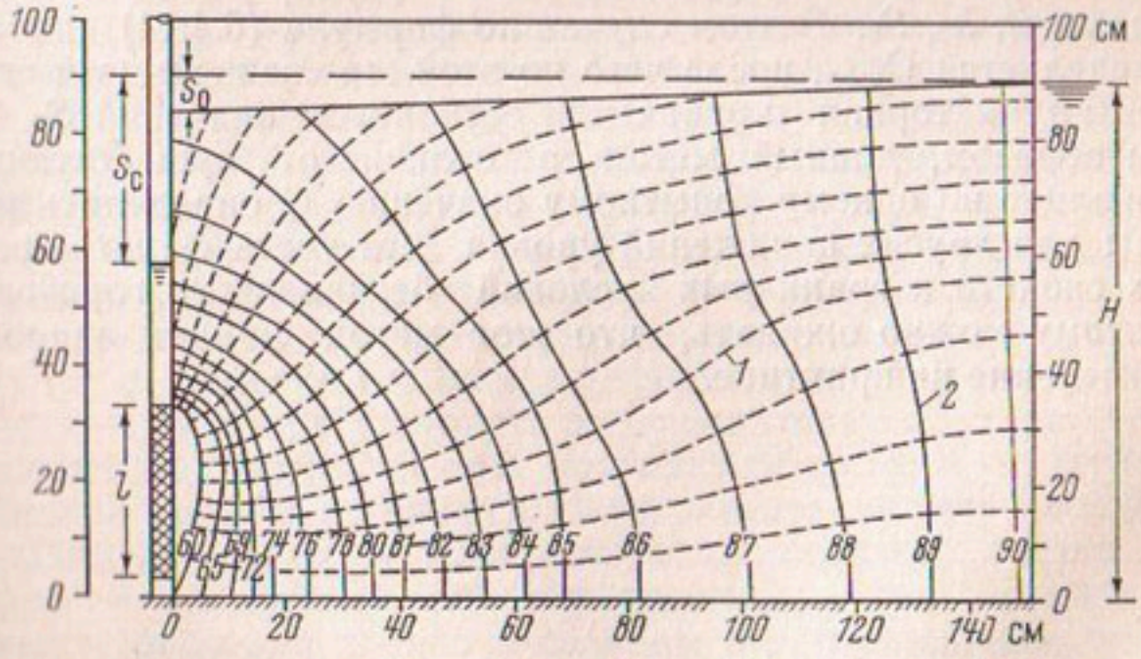


Рис. 6.13. Характер размещения линий тока (*1*) и линий равного напора (*2*) при установившейся безнапорной фильтрации к скважине с затопленным фильтром длиной $l=30$ см (по данным опытов в фильтрационном лотке); $Q=5{,}75$ см³/с; $S_c=32{,}9$ см; $\Delta H=27{,}1$ см; $H=90{,}2$ см

И. Козени и последующих теоретических и экспериментальных исследованиях промежутка высачивания [53, 58, 59].

Согласно этим исследованиям, при $R=\text{const}$ и $H=\text{const}$ максимальный расход грунтового потока также наблюдается при $S_0=h_0=H/2$.

График функции $Q=f(h_0, S_0)$, характеризуемой формулами (6.4.8) и (6.4.10), представляет собой параболу

$$Q = 4S_0h_0Q_{max}/H^2 = 4S_0(H-S_0)Q_{max}/H^2, \qquad (6.4.14)$$

которая изображена на рис. 6.12 в виде кривой *4* и указывает на то, что значения Q, рассчитываемые по формулам (6.4.1) и (6.4.8), совпадают только при $S_0=2H/3$, когда $k_0=2k_D$. В общем же случае из (6.4.1) и (6.4.8) имеем следующее соотношение между параметрами k_D и k_0 [59]:

$$k_D = 2k_0h_0/(H+h_0). \qquad (6.4.15)$$

Соотношение (6.4.15) справедливо для опытных откачек, когда параметры k_D и k_0 рассчитываются соответственно по формулам (6.4.1) и (6.4.8) с использованием фиксированных значений Q и S_r.

Функция (6.4.14) является универсальной для индикаторных кривых всех грунтовых потоков и позволяет легко определять величины дебита дрен для любых расчетных значений S_0, если имеется хотя бы один опыт с фиксированными величинами Q, h_0, S_0. В этом случае по формуле (6.4.14) сначала определяется Q_{max}, после чего по этой же зависимости строится индикаторная кривая для остальных значений S_0. Таким образом, данный метод в отличие от существующих позволяет по одному опытному значению Q определять расходы для других понижений уровня без учета фильтрационных свойств и граничных условий безнапорного горизонта. Поэтому можно ожидать, что этот метод найдет широкое применение на практике.

Глава 7

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА В ЗОНЕ ПОЛЕСЬЯ

В зоне Полесья переувлажнение сельскохозяйственных угодий носит временный (сезонный) характер и неустойчиво в различные по водности годы. Поэтому осушение таких земель (и прежде всего торфяников) необходимо вести в основном ранней весной и осенью, когда наблюдается избыточное увлажнение почвы [47, 79, 84].

Однако до настоящего времени для регулирования водного режима таких угодий применяются в основном мелиоративные системы одностороннего (осушительного) действия, представленные различными схемами горизонтального дренажа (закрытого и открытой сети), в которых проводящая сеть, как правило, выполняется в виде непрерывных магистральных каналов, не изолированных от осушаемого пласта пленкой. Опыт эксплуатации этих систем показывает, что в водобалансовом отношении они чаще всего несовершенны, поскольку непрерывно в течение всего года дренируют осушаемый массив и прилегающие к нему территории, отводя как избыточные (в посевной период), так и необходимые растениям влагозапасы. Это приводит к тому, что на землях, переувлажняемых до проведения мелиораций, после мелиоративных работ нередко возникает дефицит влаги в почве и появляется острая необходимость в дополнительном увлажнении этих земель, переосушенных проводящей сетью и отрегулированными водоприемниками. В результате возник вопрос о разработке таких осушительно-увлажнительных систем, которые не допускали бы переосушения почв проводящей сетью и работали только в периоды переувлажнения, отводя с массива избыточные грунтовые и поверхностные воды.

Таким требованиям отвечают мелиоративные системы с механической откачкой дренажного стока. Среди этих систем большой интерес представляют осушительно-оросительные системы на базе различных сочетаний горизонтального дре-

нажа с вертикальным. Исследованиями Г. В. Богомолова, А. И. Ивицкого, В. С. Усенко, М. Ф. Козлова, А. А. Желобаева, автора, В. Ф. Карловского, Г. И. Пастухова, А. И. Мурашко, А. Т. Шпакова, Г. А. Халметова, Ю. А. Чирвы, В. Е. Алексеевского установлено, что в соответствующих гидрогеологических условиях такие мелиоративные системы обладают наилучшими технико-экономическими и водобалансовыми показателями. Ниже приводится характеристика некоторых вариантов таких систем, рассматриваются их конструкции и параметры дренажных скважин (ДС), особенности работы вертикального дренажа (ВД) в различных гидрогеологических и эксплуатационных условиях, указываются оптимальные схемы ВД для природных зон Полесья, приводятся основные технико-экономические показатели систем вертикального дренажа (СВД).

§ 7.1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОПЫТНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО УЧАСТКА ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

Схема участка приведена на рис. 7.1 и подробно описана в работах [100, 101], а также в § 4.3.

Опытный участок построен как один из возможных вариантов управляемой осушительно-оросительной системы периодического действия, позволяющей оперативно регулировать УГВ и влажность почвы в любых погодных условиях. Основной принцип действия этой системы — управление УГВ путем изменения режима откачек из ДС. Этот способ применим в условиях устойчивого и обильного грунтового и атмосферного питания. При слабом или неустойчивом водном питании, когда дренирующее действие магистральных каналов, а также испарение и транспирация могут создать дефицит влаги в почве на всем массиве, управление водным режимом территории осуществляется за счет орошения подземными водами, откачиваемыми из отдельных ДС.

Мелкозалежные торфяники опытного участка залегают на песчаной толще мощностью около 50 м [100, 101]. Водопроводимость этой толщи T, определенная с помощью графиков комбинированного (по автору) прослеживания снижения УГВ при опытных откачках из дренажной скв. 7, с увеличением дебита Q возрастает по зависимости [85]

$$T = 13{,}7 + 0{,}77Q, \qquad (7.1.1)$$

где T — в м²/ч; Q — в м³/ч.

Величина проводимости этих песков T_D, определенная по графикам площадного прослеживания снижения УГВ, также возрастает с увеличением дебита скважины по зависимости

$$T_D = 27{,}4 + 0{,}08\,Q, \qquad (7.1.2)$$

где T_D — в м²/ч; Q — в м³/ч.

Корреляционная связь между параметрами T_D и T аппроксимируется выражением

$$T_D = 24{,}0 + 0{,}137\,T. \qquad (7.1.3)$$

Таким образом, с увеличением дебита скважин от 60 до 150—170 м³/ч расчетные значения T возрастают от 1400 до 3000 м²/сут; аналогично величины T_D возрастают от 750 до 950 м²/сут. Если принять, что эффективная мощность безнапорного потока при данной глубине скважин, равной в среднем 30 м, составляет около 40—45 м, то получим, что водопроницаемость песчаной толщи по Дюпюи равна 20 м/сут, по Тейсу — 50 м/сут. Отсюда находим, что в данных условиях $\lambda = -3{,}0$.

Совершенно иные величины коэффициента фильтрации подстилающих песков получены по эмпирическим формулам с использованием результатов гранулометрического анализа песков. Между этими параметрами установлена следующая зависимость:

$$k_D = 2k_X = 2{,}6\,k_З, \qquad (7.1.4)$$

где k_X — величина коэффициента фильтрации по А. Хазену; $k_З$ — то же, по И. Зауербрею.

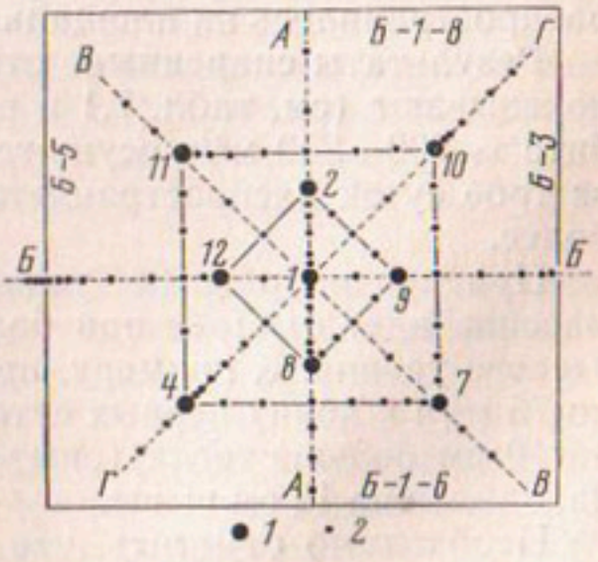


Рис. 7.1. Схема размещения дренажных и наблюдательных скважин опытного участка вертикального дренажа на Полесской опытно-мелиоративной станции (ПОМС): *1* — дренажные скважины; *2* — наблюдательные скважины

Формула (7.1.4) справедлива прежде всего для мелкозернистых песков Полесья.

Опыт эксплуатации СВД на участке показал, что технологии строительства ДС следует уделять большое внимание. В дальнейшем целесообразно применять шахтные колодцы диаметром 1,5—2,5 м и глубиной до 15—18 м, оборудованные лучевыми забивными фильтрами, погружными электронасосами и камерами (станциями управления и контроля) поверхностного типа. Питание скважин электроэнергией должно осуществляться в основном по воздушным ЛЭП.

§ 7.2. ОСУШИТЕЛЬНОЕ ДЕЙСТВИЕ ГРУППОВЫХ ОТКАЧЕК

Групповые откачки проводились при различных сочетаниях ДС. Проанализируем откачки из скв. 9 и 12, расположенных на центральном поперечнике Б—Б между каналами Б-3 и Б-5 (рис. 7.1). Расстояние между скважинами 717 м. Скв. 9 удалена от канала Б-3 на 585 м, скв. 12 находится на расстоянии 710 м от канала Б-5.

При совместной работе скв. 9 и 12 снижение УГВ в центре участка (наблюдательные скв. 1а, 73) происходило весьма интенсивно и к концу первых суток составило 11 см при дебите каждой скважины 50 м³/ч (опыт 30) и 15 см — при дебитах 75 м³/ч (опыт 31). При откачке с расходами скважин по 75 м³/ч после трех суток осушения (опыт 36) понижение УГВ в наблюдательной скв. 1 (междренье) достигло 26 см (табл. 7.1). Таким образом, осушительное действие двух ДС, работавших с суммарным расходом 150 м³/ч, за трое суток распространилось на площадь до 90—110 га.

Результаты спаренных откачек из ДС 2 и 8, 4 и 7, 4 и 11 показывают (см. табл. 7.1 и рис. 7.2), что при суммарном дебите ~200—250 м³/ч осушительное действие двух скважин за трое суток распространяется на площадь до 80—100 га и более.

При прочих равных условиях осушение заболоченного массива идет быстрее при более высоком залегании статического уровня. К примеру, при работе скв. 9 и 12 с дебитами по 75 м³/ч к концу первых суток снижение УГВ в скв. 1а было на 10 см больше тогда (опыт 36), когда статический уровень находился на 12 см выше.

Необходимо отметить, что при работе вертикального дренажа в предпосевной и посевной периоды, когда УГВ распо-

Таблица 7.1

Основные показатели осушительного действия двух дренажных скважин при их совместной работе

№ скв.	Расстояние между скважинами, м	Дебит каждой скважины, м³/ч	Понижение УГВ в междренье, см	Продолжительность работы скважин, сут	Площадь, осушаемая одной скважиной, га
9 и 12	717	Скв. 9 — 50 Скв. 12—50	11,0	1	30—40
		Скв. 9 — 75 Скв. 12—75	15,0	1	30—40
			26,0	3	40—50
2 и 8	721	Скв. 2 — 96 Скв. 8 — 85	21,0	1	40—50
4 и 7	999	Скв. 4—140 Скв. 7—140	28,0	2	50—60
4 и 11	1002	Скв. 4—140 Скв. 11—135	16,0	3	50—60
7	$r = 500$	145	10,0	1	50—60

лагаются вблизи земной поверхности или совпадают с ней, при дебитах скважин 130—160 м³/ч норма осушения в междреньях возрастает в первые трое суток работы дренажа в среднем на 12—20 см/сут. В последующие 3—4 сут скорость опускания УГВ резко замедляется и составляет 7—10 см/сут. Аналогично происходит восстановление пониженного уровня после остановки насосов.

Во всех опытах с увеличением дебита скважин возрастают как радиусы влияния депрессионных воронок, так и продолжительность распространения последних.

С целью выяснения осушительного действия более мощных систем взаимодействующих ДС в 1973 г. были проведены две групповые откачки из 4 скважин большого и малого квадратов [100, 101]. Большой квадрат состоит из скв. 4, 7, 10, 11 и имеет стороны длиной по 1 км, параллельные ограждающим каналам (рис. 7.1). Скважины расположены по углам квадрата.

Откачка из скв. 4, 7, 10, 11 началась 14 мая в 10 ч и окончена 19 мая в 10 ч. С 7 по 14 мая выпало 47,1 мм осадков и к началу опыта УГВ установились в среднем по участку на глубине 30 см от поверхности земли.

Откачка из скв. 10 проводилась с помощью эрлифта, из остальных трех скважин — с помощью погружных насосов. Дебиты скв. 4, 7, 10, 11 составляли соответственно 135, 140, 115, 170 м³/ч. Суммарный расход опытной установки —

560 м³/ч. За период откачки, продолжавшейся 120 ч, было сброшено 67,2 тыс. м³ воды.

Результаты понижения УГВ в центре участка приведены в табл. 7.2.

Анализ полученных материалов показывает, что норма осушения в 50—60 см, необходимая для производства полевых работ на торфяниках, была достигнута в центре участка уже на третьи сутки работы ВД. После пяти суток осушения УГВ находились здесь на глубине 82 см от поверхности земли. Таким образом, практически за трое суток четыре скважины, откачивающие в сумме 560 м³/ч воды, совместно с ограждающими каналами осушили 400 га мелкозалежных торфяников. Если учесть, что каналы дренировали три полосы шириной по 100—200 м, т. е. осушили в среднем 80 га, то придем к выводу, что четыре скважины за трое суток обеспечили предпосевную норму осушения на площади 320 га. Это значит, что каждая ДС за трое суток осушила в среднем 80 га заболоченных земель. Если бы статический УГВ находился на поверхности земли, то при данном режиме работы

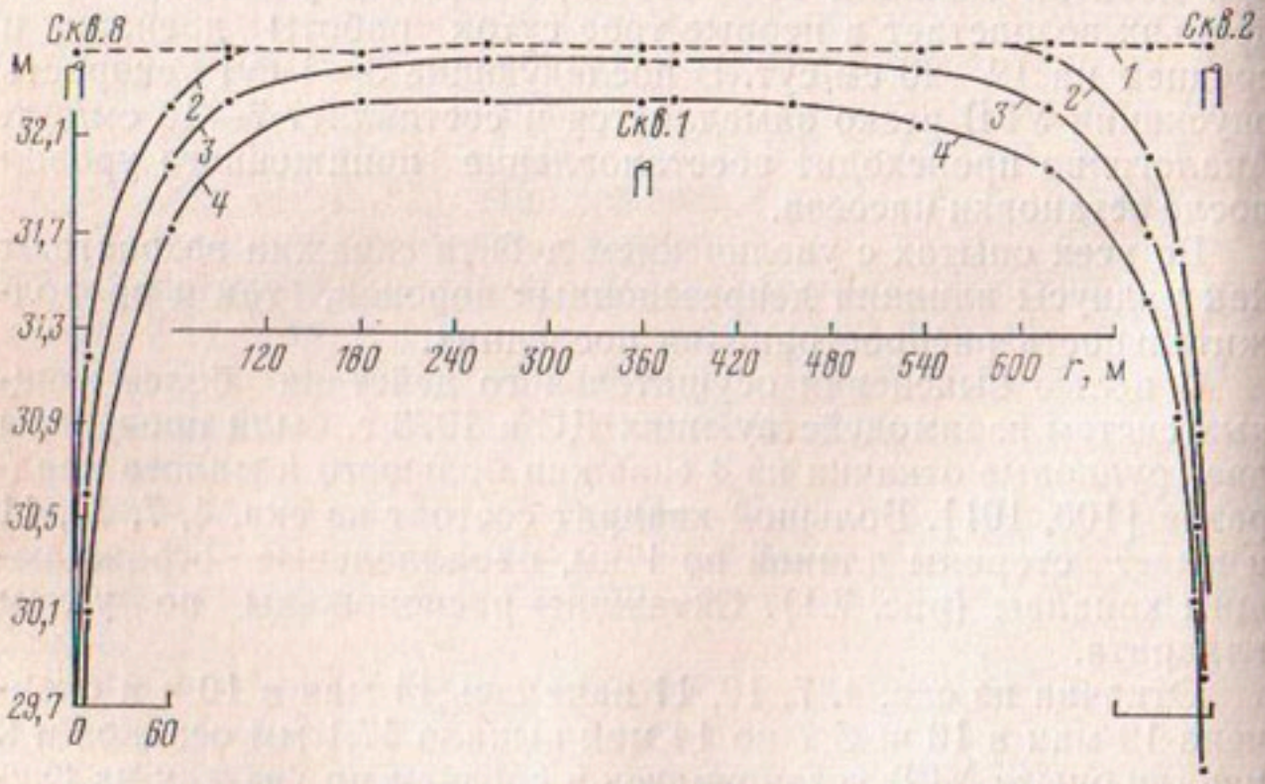


Рис. 7.2. Положение кривых депрессий по створу А—А в различные моменты времени после одновременного пуска в работу дренажных скв. 2 и 8 с дебитами соответственно 96 и 85 м³/ч (опыт 77): *1* — положение статического уровня до начала осушения; *2* — положение депрессионной поверхности спустя 10 мин после начала осушения; *3* — то же спустя 3 ч; *4* — спустя 24 ч

Таблица 7.2

Средние величины понижения УГВ в центре участка (скв. 1) при работе четырех скважин большого квадрата

Продолжительность осушения, сут	1	2	3	4	5
Понижение УГВ от статического, см	13	29	37	44	52
Глубина УГВ от поверхности земли, см	43	59	67	74	82

ВД предпосевная норма осушения была бы достигнута за 6—7 сут.

Чтобы выяснить закономерность понижения УГВ в центре участка, проанализируем данные табл. 7.2 с помощью графика $S_{rt}=f(\lg t)$. Получим, что при данном режиме эксплуатации ВД понижение УГВ в центре участка увеличивается во времени по следующей зависимости:

$$S_t = 13{,}0 + 52{,}0 \lg t, \qquad (7.2.1)$$

где S_t — понижение УГВ на момент времени t, см; t — продолжительность работы ВД, сут.

Аналогичный вид имеют графики временного прослеживания снижения УГВ на междуречьях при спаренной работе двух ДС (табл. 7.1).

Из (7.2.1) следует, что на 10-е сутки работы четырех скважин УГВ в центре участка опустились бы на глубину 95 см от поверхности земли.

Рассмотрим результаты групповой откачки из скв. 8, 9, 2, 12, расположенных по углам малого квадрата со сторонами по 500 м (рис. 7.1). Расстояние по диагонали квадрата между скв. 2 и 8 равно 721,45 м, между скв. 9 и 12—717 м.

Откачка из скважин малого квадрата проводилась в 1973 г. с 12 ч 26 октября до 11 ч 29 октября. В это время УГВ в центре участка находились на глубине 110 см от поверхности земли. Дебиты скв. 8, 9, 2, 12 составляли соответственно 70, 70, 80, 90 м³/ч. Суммарный дебит установки замерялся водосливом на выходе потока из главного сбросного трубопровода и составлял 310 м³/ч.

При работе скважин малого квадрата средние величины понижения УГВ в центре участка (скв. 1а, 73) составили 30,

41 и 48 см соответственно на 1, 2 и 3-и сутки осушения. Интенсивность снижения УГВ здесь аппроксимируется формулой

$$S_t = 30{,}0 + 37{,}5 \lg t, \qquad (7.2.2)$$

где S_t — понижение УГВ в момент времени t, см; t — продолжительность осушения, сут.

Из формулы (7.2.2) следует, что на 3—4-е сутки работы четырех скважин с суммарным дебитом 310 м³/ч в центре участка, т. е. на расстоянии 360 м от скважин, была достигнута предпосевная норма осушения. Это говорит о том, что четыре дренажные скважины малого квадрата за четверо суток осушили около 160 га заболоченных земель.

Восстановление УГВ после остановки скважин происходило весьма интенсивно первые несколько часов. За это время неравномерность залегания депрессионной поверхности, особенно заметная вблизи дренажных скважин, полностью исчезала, и на всей территории участка УГВ принимали практически горизонтальное положение (рис. 7.3). В последующем пониженные УГВ восстанавливались с различными скоростями и до раз-

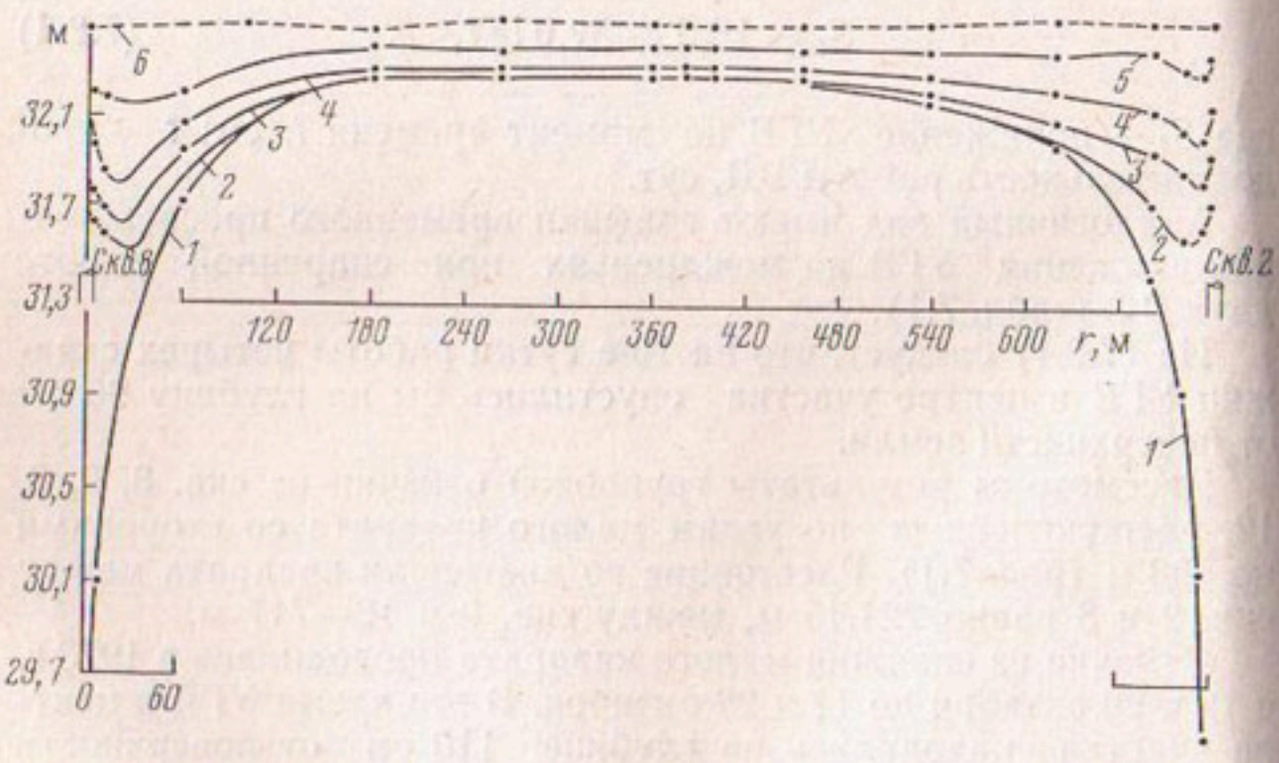


Рис. 7.3. Характер восстановления кривой депрессии по створу А—А в различные моменты времени после остановки дренажных скв. 2 и 8, работавших до этого 24 ч одновременно (кривая *1*) с суммарным дебитом 181 м³/ч (опыт 77): *2* — положение кривой депрессии спустя 6 мин после остановки; *3* — 15 мин; *4* — 1 ч; *5* — 10 ч; *6* — статический уровень до начала откачки

личных отметок в зависимости от положения статического УГВ на смежных массивах. Отсюда следует, что в дальнейших исследованиях необходимо прежде всего отработать режимы эксплуатации ВД в различные по водности годы и в различных гидрогеологических и мелиоративных условиях.

Возникающая неравномерность осушения в виде глубоких воронок депрессии, где перепады уровней могут достигать 2—3,5 м, имеет место в радиусе до 20—30 м вокруг ДС и наблюдается только в период откачек. После отключения насосов вблизи ДС наблюдается интенсивное восстановление пониженного уровня, воронки депрессии исчезают практически в течение 1—6 ч и начинается быстрое выравнивание УГВ в пределах всей осушенной зоны. Заполнение воронок депрессии после прекращения откачек происходит как за счет подтока подземных вод из более глубоких водоносных горизонтов, так и в результате перераспределения напоров между зонами с повышенным и пониженным (вблизи ДС) залеганием УГВ, т. е. за счет поступления грунтовых вод из периферийных участков осушаемого массива и последующего понижения уровня на этих участках [100, 101].

§ 7.3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

Системы вертикального дренажа (СВД) широко применяются в аридной зоне для борьбы с засолением орошаемых земель и регулирования их водно-солевого режима. В гумидной зоне перед СВД стоят совершенно иные задачи, определяемые закономерностями изменения режима водного питания заболоченных массивов и неустойчивостью естественного переувлажнения и переосушения почв в годовом и многолетнем разрезе. Отсюда следует, что технико-экономические и водобалансовые показатели СВД зоны Полесья будут существенно отличаться от аналогичных характеристик СВД аридной зоны. К этим показателям относятся прежде всего количество и параметры дренажных скважин (ДС) и насосно-силового оборудования, режим (время, интенсивность и продолжительность) работы системы, тип и конструкция проводящей сети, среднегодовые и сезонные значения модуля дренажного стока и т. д. Например, в Голодной степи глубины дренажных и наблюдательных скважин составляют соответственно 50—60 и 40—45 м, в зоне Полесья — 18—25 и 3—8 м; продолжительность работы СВД в Голодной степи составляет 9—10 мес в году, в Полесье она

не будет превышать 15—30 сут в режиме осушения и столько же в режиме орошения.

Существующие рекомендации и указания по проектированию ВД в основном предназначены для зоны орошения. Проверка этих рекомендаций на материалах полевых исследований ВД в Полесье показала, что содержащиеся в них теоретические и модельные представления нередко значительно отличаются от результатов работы ВД в этой зоне. Возникла необходимость в разработке аналогичных рекомендаций по проектированию ВД на осушаемых землях Полесской низменности. Ниже приводятся основные положения этих рекомендаций, полученные на основании обобщения 6-летнего опыта проектирования, строительства и эксплуатации опытно-производственных участков ВД в центральной и западной частях Припятского Полесья. Ввиду того что натурные исследования выполнены на ограниченных площадях и в благоприятных мелиоративных и гидрогеологических условиях [100, 101], многие вопросы фильтрационных, водобалансовых, гидравлических и технико-экономических расчетов еще не проверены и требуют дальнейшего изучения. Поэтому в рекомендациях помещены лишь те разработки, которые на данном этапе изученности могут быть использованы в проектных решениях как вполне приемлемые [26].

Вертикальный дренаж — весьма простая мелиоративная система. Она состоит из осушительной и проводящей сети и водоприемника. Осушительная сеть представлена ДС глубиной 18—25 м, на которых устанавливается насосно-силовое оборудование. К каждой скважине подводится ЛЭП.

Проводящая сеть состоит из мелких каналов или подземных трубопроводов различного напора и диаметра. Роль проводящей сети заключается в отводе и перераспределении вод, поступающих от ДС.

Водоприемником могут служить неотрегулированные реки, наливные водоемы, пруды и т. д. Перекачка дренажного стока в такие водоприемники осуществляется как непосредственно погружными насосами, так и насосными станциями. При наличии отрегулированного водоприемника дренажный сток можно отводить по мелким каналам.

Работает ВД следующим образом. При достаточно устойчивом и обильном водном питании заболоченных земель оптимальная норма осушения на полях поддерживается периодическим включением и отключением ДС. Неравномерность залегания УГВ в таких эксплуатационных и гидрогеологических условиях исчезает практически спустя 0,5—0,8 сут после оста-

новки насосов [100, 101]. Во избежание пескования скважин, перегрузки фильтра и насосно-силового оборудования, а также с целью достижения равномерно-квазистационарного режима осушения СВД рекомендуется эксплуатировать при небольших (80—100) или средних (130—150 м³/ч) значениях дебита скважин. Обладая высокой дренирующей способностью, скважины позволяют в кратчайшие сроки (в течение 5—12 сут) понизить УГВ до оптимальной нормы осушения, необходимой для производства предпосевных и посевных работ.

Модули дренажного стока в предпосевной период на СВД зоны Полесья зависят от интенсивности дренирования и в первые 4—8 сут работы дренажа составляют 0,5—0,8 л/с·га, если дебит скважин равен 100—160 м³/ч и расстояние между ними варьирует от 900 до 1000 м. В этих условиях норма осушения (глубина залегания УГВ) в первые 3—4 сут работы системы растет на 17—9 см/сут; в последующие 3—5 сут скорость опускания УГВ резко замедляется и снижается до 7—4 см/сут. К примеру, в центральной части Припятского Полесья при модуле дренажного стока, равном 0,6 л/с·га, скорость снижения УГВ $\partial h/\partial t$ в первые 9 сут работы дренажа изменяется по зависимости

$$\partial h/\partial t = 16{,}0 - 13{,}3 \lg t, \qquad (7.3.1)$$

где $\partial h/\partial t$ — в см/сут; t — в сут.

Когда между ДС достигнуто понижение УГВ, равное 3/4 оптимальной нормы осушения, скважины отключаются. Происходит выравнивание УГВ по всей осушаемой площади: восстановление вблизи ДС и некоторое понижение на междренье. В дальнейшем путем изменения режима и продолжительности работы ДС осуществляется полное, т. е. двустороннее, регулирование влажности почвы осушаемых земель.

При слабом и неустойчивом водном питании, а также в засушливые периоды, когда интенсивное испарение и транспирация приводят к значительному понижению УГВ и начинается процесс естественного переосушения почв, управление водным режимом территории на СВД осуществляется путем орошения ее грунтовыми водами, откачиваемыми из отдельных ДС. Грунтовые воды перекачиваются в дождевальные установки как напрямую погружными насосами, установленными на ДС, так и оросительными насосными станциями через бассейны суточного регулирования и подогрева воды или другие аккумулирующие емкости (тупиковые каналы, пруды и т. д.). При интенсивности полива в 5 м³/ч·га одна ДС может обеспечить орошение площади от 20 (при дебите 100 м³/ч) до 50 га (при

дебите 250 м³/ч). Эти площади можно значительно увеличить за счет использования регулирующих емкостей и уменьшения интенсивности полива до 2 м³/ч·га. Использование грунтовых вод на орошение становится еще более экономичным при наличии высокодебитных бесфильтровых скважин и шахтных колодцев большого диаметра глубиной до 20 м, оборудованных лучевыми фильтрами и соответствующими насосами.

Влагозарядка корнеобитаемого слоя почвы успешно осуществляется также методом площадного заводнения (подтопления) путем забора воды из одних ДС и закачки ее в переосушенный пласт через другие скважины. При этом вокруг нагнетательных скважин УГВ подтопляют зону аэрации и образуются бугры грунтовых вод. Последние быстро растекаются и приводят к равномерному повышению УГВ на площади до 20 га и более. Способ опробирован в условиях Полесской опытно-мелиоративной станции, прост в эксплуатации и рекомендуется для внедрения как один из эффективных приемов подпочвенного увлажнения [100, 101].

Продолжительность работы ВД в режиме осушения и в режиме орошения в сумме не превышает 1,5—3,0 месяца за сезон.

Таким образом, СВД представляют собой технически совершенные и экономичные осушительно-увлажнительные системы сезонного действия, позволяющие оперативно регулировать водный режим осушаемых земель в любых погодных условиях при полном исключении переосушения почв мелиоративной сетью. Для создания таких систем необходимо изучить закономерности формирования УГВ и поверхностного стока в различных гидрогеологических и мелиоративных условиях при различных масштабах осушения заболоченных водосборов. При этом главной задачей исследований является отыскание оптимальных соотношений горизонтального и вертикального дренажей с орошением. Решение данной проблемы позволит выявить место вертикального и горизонтального дренажа, а также их сочетаний в мелиоративных системах Полесской низменности [26].

§ 7.4. РАЙОНИРОВАНИЕ ПРИПЯТСКОГО ПОЛЕСЬЯ ПО УСЛОВИЯМ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

Основными геоморфологическими элементами Полесской низменности являются широкие поймы рек и возвышающиеся над ними три надпойменные террасы. Перепады в отметках земной поверхности этих элементов весьма незначительны и в ряде районов низменности практически отсутствуют. Эта осо-

бенность рельефа Полесья играет важную роль при разработке бассейновых схем мелиорации и, в частности, при выборе параметров водоприемника и зависящего от них способа дренирования массива: горизонтального открытого или закрытого дренажа, крупных закрытых дренажных систем с подземными коллекторами большого диаметра (500—800 мм), безуклонного дренажа с механической откачкой, польдерных систем на затапливаемых речными водами землях и т. д.

При оценке условий, определяющих выбор тех или иных разновидностей ВД, геоморфологические особенности района уже не играют существенной роли. Здесь определяющее значение имеют гидрогеологические условия водосборов: литологическое строение и водопроницаемость подстилающих отложений до глубины 20—30 м, водообильность и напорность водоносных пластов и характер гидравлической связи между ними, тип водного питания болотных массивов и его устойчивость при проведении осушительных мелиораций на больших площадях, взаимосвязь поверхностного стока с подземным и т. д. И если геоморфологические условия Полесья весьма неблагоприятны для строительства крупных осушительно-увлажнительных систем на базе горизонтального дренажа, то гидрогеологические условия этого региона как бы сами указывают на необходимость применения здесь управляемых дренажных систем сезонного действия, основанных на различных сочетаниях вертикального дренажа с горизонтальным при широком использовании грунтовых вод для орошения [26].

Приведенная в главе 1 характеристика гидрогеологических условий Припятского Полесья, а также материалы натурных исследований ВД и послужили основой для разработки схемы районирования этого региона по условиям применения ВД (рис. 7.4). Из схемы видно, что по эффективности применения ВД заболоченные водосборы Полесья могут быть подразделены на четыре крупных региона, характеризующихся различными гидрогеологическими условиями и соответствующим типом водного питания [84].

I. Район, наиболее благоприятный для применения СВД (в сочетании с польдерными и другими способами осушения на механическом водоподъеме). Охватывает центральную часть Полесья: поймы, первую, вторую и третью террасы Припяти и ее главнейших притоков, т. е. занимает основные болотные массивы низменности (Пинские, Туровские, Ольховские и Гричинские болота, болотные массивы южнее Днепровско-Бугского канала, в районе оз. Червоное, по долинам Стохода, Стыри, Горыни, Ствиги и др.). В этом районе широко развиты

преимущественно низинные болота, представленные заиленными торфяниками травяно-осоково-тростникового и осоково-тростникового типов. Мощность торфа незначительная (от 0,3 до 3,0 м). Минеральным основанием болот является мощная толща мелко- и среднезернистых древнеаллювиальных и террасовых песков, обобщенный коэффициент фильтрации которых составляет, по Дюпюи, 10—20 м/сут и более. Выдержанных водоупоров под песками нет, поэтому четвертичная толща имеет прямую гидравлическую связь с водами палеогена и вместе с палеогеновыми песками образует весьма водообильный водоносный горизонт грунтовых вод (рис. 7.5).

Основной источник водного питания болот — воды рек и атмосферные осадки. Паводковые воды задерживаются на заболоченных участках до 2—3 мес и создают длительный подпор грунтовым водам второй и третьей надпойменных террас Припяти и ее притоков.

В рассматриваемом районе орошение осушаемых земель может быть полностью обеспечено за счет использования запа-

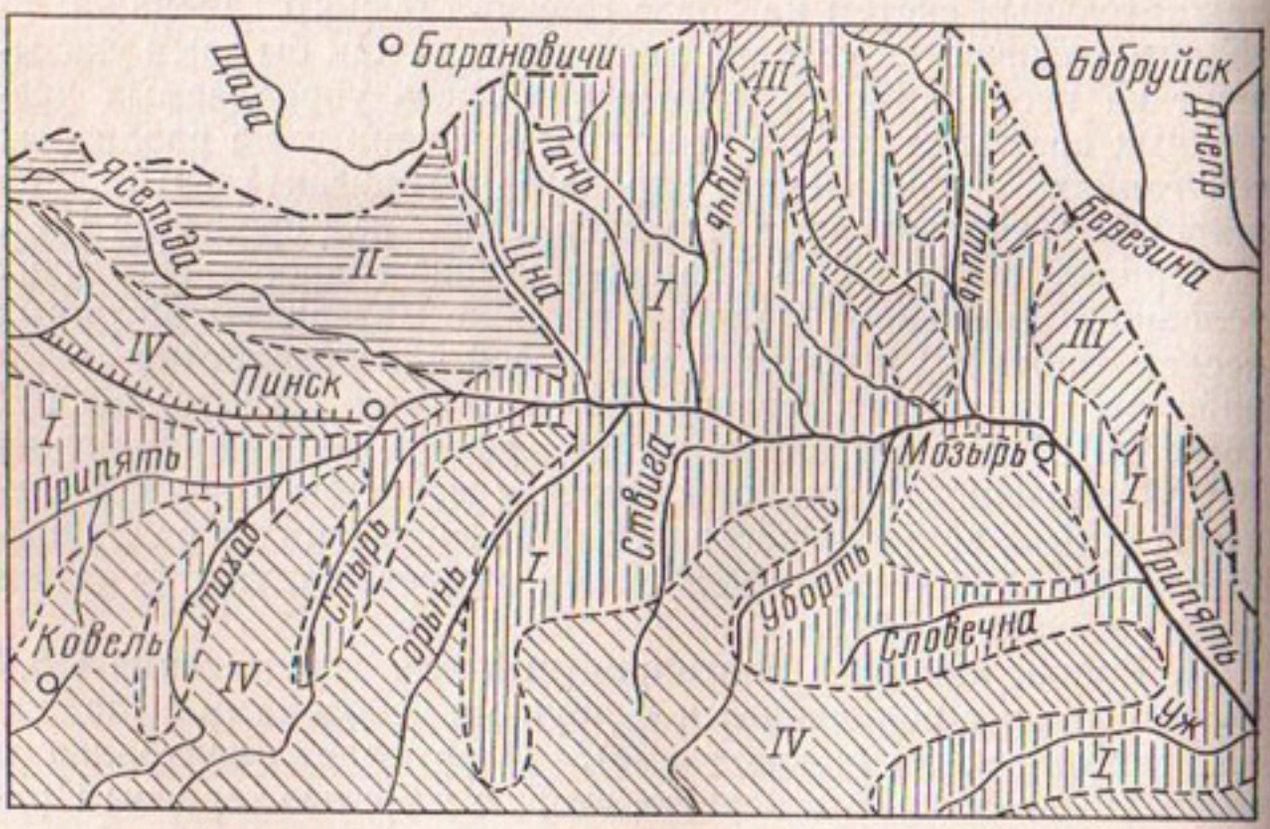


Рис. 7.4. Схема районирования Припятского Полесья по условиям применения вертикального дренажа: *I, II, III, IV* — выделенные районы с различными гидрогеологическими условиями

сов грунтовых вод, быстро восполняющихся в осенне-весенние периоды талыми и дождевыми водами.

II. Район с хорошими гидрогеологическими условиями для применения различных СВД. Он занимает плоское водораздельное плато между Ясельдой и Цной и сложен донной мореной днепровского оледенения. На водоразделе много обширных понижений, занятых крупными болотами низинного и переходного типов. В этих понижениях донная морена часто размыта и изобилует гидравлическими «окнами», через которые происходит напорное питание торфяников и подстилающих их покровных песков. По этой причине многие болотные массивы района отличаются водообилием даже в засушливые периоды года (рис. 7.5). Регулирование водного режима рассматриваемых болот также целесообразно производить с помощью различных сочетаний ДС с открытой или закрытой горизонтальной сетью. Эти мелиоративные системы могут включать в себя закрытые коллекторы большого диаметра и разгрузочные (самоизливающие) скважины-колодцы, снимающие напор в межморенных горизонтах. Разгрузочные скважины должны закладываться прежде всего в местах расположе-

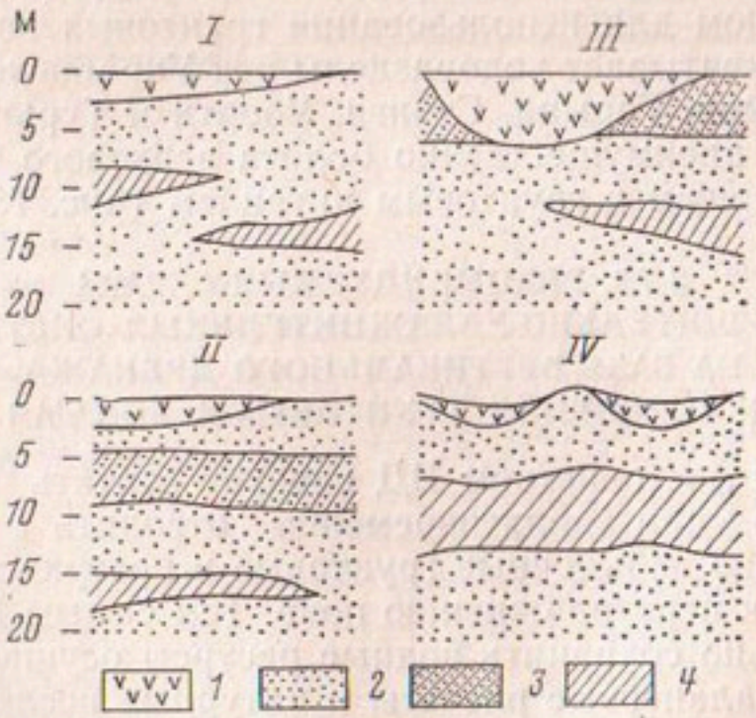


Рис. 7.5. Гидрогеологические условия применения ВД в зоне Полесья: *I, II, III, IV* — номера районов на схеме; *1* — торфяники; *2* — пески; *3* — моренные суглинки; *4* — глины

ния «окон» и на периферии болотного массива (для перехвата бокового притока напорных вод). Они могут подключаться как к каналам, так и к закрытым коллекторам.

III. Район с удовлетворительными условиями для применения ВД. Он занимает восточную и северо-восточную части Белорусского Полесья (рис. 7.4) и характеризуется наличием локальных болот переходного типа. Болота приурочены в основном к поймам мелких рек и небольшим понижениям на водоразделах (бассейны Брагинки, Ведрочи, Закованки и др.). Болотные отложения представлены торфом мощностью 3—4 м, иловатыми песками и суглинками, залегающими на межморенных флювиогляциальных средне- и крупнозернистых песках мощностью 5 м и более. Флювиогляциальные пески подстилаются выдержанной днепровской мореной, которая является первым от поверхности региональным водоупором.

Болота рассматриваемого района сильно обводнены и характеризуются устойчивым грунтово-напорным питанием. Наиболее перспективны в этих условиях системы комбинированных дренажей, основанные на различных сочетаниях открытого или закрытого горизонтального дренажа с вертикальным (в том числе его вакуумными (сифонными) разновидностями).

IV. Район с благоприятными условиями для применения горизонтального дренажа с редкой сетью ДС, предназначенных в основном для использования грунтовых вод на орошение. Район охватывает водоразделы рек Украинского Полесья: Стохода, Стыри, Горыни, Ствиги, Уборти и Турьи. Здесь распространены преимущественно болота верхового типа со слабым атмосферным и грунтовым питанием (рис. 7.4, 7.5).

§ 7.5. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ СХЕМЫ ОСУШИТЕЛЬНО-УВЛАЖНИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА И ОРОШЕНИЯ ГРУНТОВЫМИ ВОДАМИ

Основным достоинством ВД следует считать способность своевременно или заблаговременно отводить с осушаемого массива только избыточные грунтовые и поверхностные воды, приводящие к переувлажнению почв. Тем самым ВД позволяет максимально сохранить водные ресурсы осушаемых территорий. Водобалансовые расчеты и натурные исследования показали, что дискретный принцип работы СВД приводит к тому, что объем среднегодового дренажного стока на таких системах на $\sim$30—80% меньше, чем на самотечных системах непрерывного действия, лежащих в основе современных способов осушения. Эта разница в объемах дренажного

стока, равная в среднем 1300—1800 м³/га за сезон, и составляет тот запас ежегодно восполняемых грунтовых вод, который не отводится ВД в виде безвозвратного стока и может быть использован для орошения в засушливые периоды. Это говорит о том, что СВД не переосушают почву и, следовательно, в большинстве случаев позволяют практически отказаться от дорогостоящего искусственного увлажнения торфяников, осушаемых этими системами.

СВД целесообразно строить в виде различных комбинаций из ДС, горизонтального дренажа (открытого или закрытого) и насосных станций. В этих системах водоотводящая и распределительная сеть может быть представлена мелкими каналами или подземными трубопроводами. Для условий Припятского Полесья широкое распространение должны найти открытые или полуоткрытые СВД, состоящие из редкой сети неглубоких каналов, усиленной одним-двумя рядами ДС, располагаемых между каналами или вдоль них [26, 47, 79, 84].

Оптимальные варианты СВД, рекомендуемые для регулирования водного режима осушаемых болотных массивов [84], приведены на рис. 7.6. Система А представляет собой сочетание редкой сети неглубоких каналов с рядами ДС, располагаемых между каналами. Сброс дренажных вод от скважин в водоотводящие каналы осуществляется по подземным трубопроводам.

Система Б является усовершенствованной моделью А и состоит из редкой сети неглубоких каналов, усиленной двумя рядами ДС, которые размещаются между каналами. Сброс откачиваемых вод от скважин в каналы также осуществляется по закрытым трубопроводам

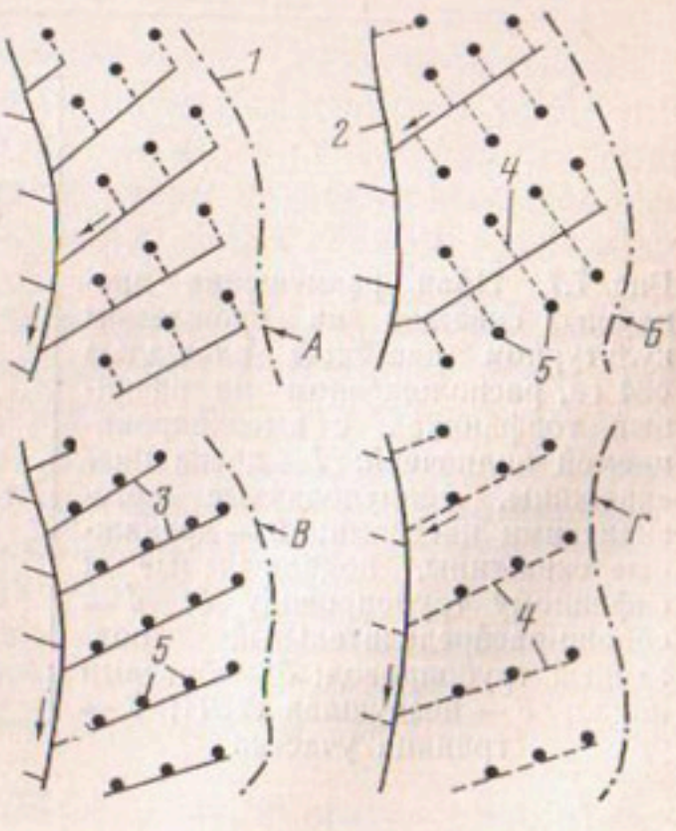


Рис. 7.6. Схемы крупных СВД: *1* — граница осушаемого массива; *2* — водоприемник; *3* — мелкие каналы сбросной сети; *4* — подземные трубопроводы проводящей сети; *5* — дренажные скважины

(в ряде случаев для этих целей могут использоваться мелкие каналы).

Системы А и Б легко переоборудуются в полностью закрытые или открытые осушительно-увлажнительные системы периодического действия.

Система В принципиально не отличается от рассмотренных выше систем, но обладает рядом существенных особенностей. Эта мелиоративная система состоит из редкой сети неглубоких каналов, вдоль которых размещаются ДС. Подземные трубопроводы здесь отсутствуют. Откачиваемые воды непосредственно от скважин поступают в водоотводящие каналы и далее к насосной станции.

Система Г является усовершенствованной моделью В и представляет собой закрытую мелиоративную систему, состоящую из сети подземных коллекторов большого диаметра, вдоль которых располагаются ДС. Дренажный сток поступает напрямую от скважин в сбросные коллекторы. Эта система может быть полностью автоматизированной.

На основе приведенных схем можно разработать ряд других вариантов крупных осушительно-увлажнительных систем на базе ВД. К примеру, система Г может служить основой для разработки новой мелиоративной системы закрытого типа, состоящей из сети подземных коллекторов, ДС и линий сифонного водозабора. Часть ДС оборудуется погружными насоса-

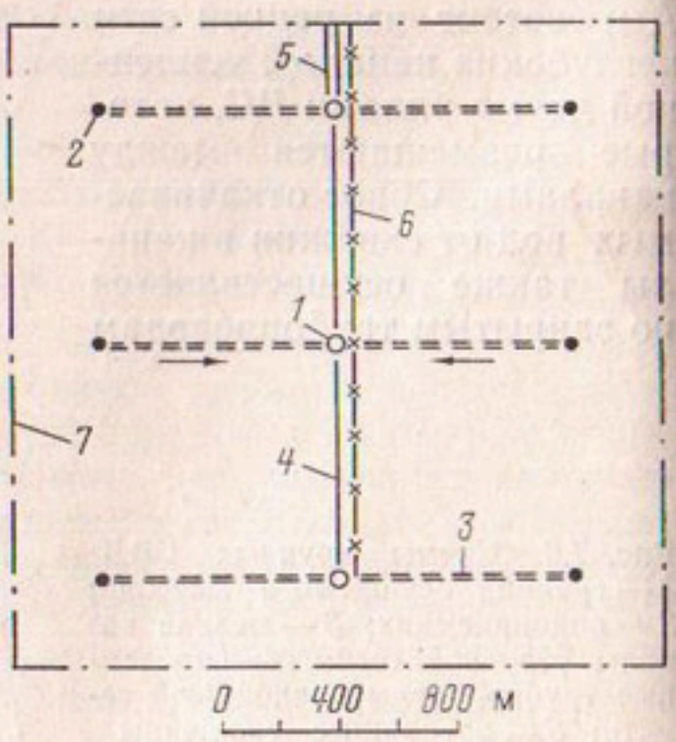


Рис. 7.7. План размещения дренажных скважин на орошаемом культурном пастбище площадью 484 га, расположенном на низинных торфяниках с высокопроницаемой подпочвой: *1* — дренажные скважины, оборудованные артезианскими насосами; *2* — дренажные скважины, подключаемые к сифонному трубопроводу *3*; *4* — сборно-распределительный подземный трубопровод; *5* — сбросный канал; *6* — воздушная ЛЭП; *7* — граница участка

ми, а остальные подсоединяются к сифонному трубопроводу и работают под вакуумом. Благодаря тому, что УГВ располагаются вблизи земной поверхности и ДС имеют высокие удельные дебиты (~15—30 м³/ч на 1 м понижения), в условиях Полесья сифонный ВД характеризуется высокими технико-экономическими показателями и особенно эффективен при использовании грунтовых вод для орошения.

В зависимости от природных условий, применяемой дождевальной техники и сельскохозяйственного использования осушаемых земель рассмотренные СВД могут быть положены в основу построения других комбинаций крупных осушительно-увлажнительных систем сезонного действия. Например, для регулирования водного режима участков низинных торфяников площадью 350—500 га, расположенных в I районе (см. рис. 7.4), целесообразно применять сифонные разновидности ВД (рис. 7.7). Наличие здесь ДС, подключаемых к сифонному трубопроводу и не оборудованных погружными насосами, позволяет значительно (до 40—60%) сократить протяженность ЛЭП и тем самым создает простор для действия сельскохозяйственной и широкозахватной дождевальной техники. Другие комбинации ВД описаны в работах [100, 101].

§ 7.6. НОВАЯ ОСУШИТЕЛЬНО-УВЛАЖНИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Временный характер переувлажнения сельскохозяйственных земель требует, чтобы мелиоративные системы работали периодически, т. е. были управляемыми, и не допускали переосушения почв проводящей сетью. Этим требованиям удовлетворяет новая осушительно-увлажнительная система, разработанная автором *).

Предлагаемая мелиоративная система по принципу действия является периодической (сезонной) и отличается тем, что с целью обеспечения двустороннего регулирования водного режима осушаемых земель при недопущении их переосушения осушительной и проводящей сетью, сохранения рек-водоприемников в их естественном состоянии, повышения водобалансовых и технико-экономических показателей мелиоративных систем и создания условий для автоматического управления ими *проводящая сеть выполнена в виде отдельных отрезков каналов (бессточных или тупиковых, не впадающих в какой-*

*) См.: **Костюкович П. Н.** Тупиковые каналы. «Сельское хозяйство Белоруссии», 1978, № 5.

либо водоем или водоток, замкнутых), соединенных между собой и с насосной станцией подземными трубопроводами, на которых устанавливается регулирующее и измерительное оборудование, позволяющее автоматически управлять режимом работы всей системы.

Предлагаемая осушительно-увлажнительная система включает (рис. 7.8): тупиковые (замкнутые) каналы *1*; дрены-осушители *2;* коллекторы или мелкие каналы осушительной сети *3,* впадающие в бессточные каналы; насосную станцию *4*; подземные трубопроводы *5,* соединяющие отрезки каналов между собой, с насосной станцией и водоприемником; регулирующее, распределительное и измерительное оборудование *6;* водоприемник *7.*

Работает система следующим образом. В периоды высокого стояния УГВ (весной, осенью, при длительных обильных дождях летом и т. д.), когда наблюдается избыточное увлажнение почвы, тупиковые каналы *1* заполнены водой, осушительная сеть находится в подпоре и не работает. Для того чтобы она начала отводить воду с переувлажненного массива, включается насосная станция *4* и вода из тупиковых каналов по водоотводящим трубопроводам *5* перекачивается в наливные бассейны, пруды, водоемы, другие водораспределительные водоводы или напрямую в водоприемник *7.*

Забор воды из бессточных каналов приводит к падению уровня в них. В результате этого устья дренажных коллекторов *3,* впадающих в тупиковые каналы, освобождаются от подпора и создаются условия для работы дренажа *2.* Мелиоративная

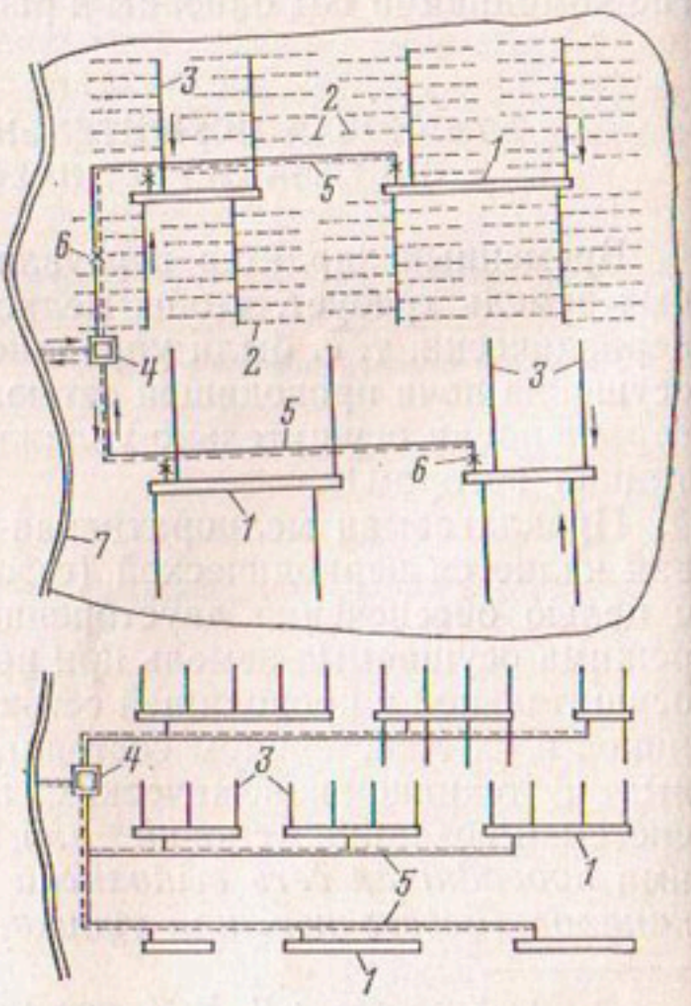


Рис. 7.8. Схема новой осушительно-увлажнительной системы периодического действия

сеть начинает сбрасывать избыточную воду с переувлажненного массива в бессточные каналы. Происходит осушение земель. Этот процесс находится в прямой зависимости от режима забора воды из бессточных каналов. Регулируя величину и продолжительность этого забора, можно управлять водным режимом осушаемой территории как во времени, так и по площади массива, обеспечивая требуемое осушение или увлажнение в различных местах поля.

В засушливые годы вода из тупиковых каналов, подогретая солнечными лучами, может использоваться для дополнительного увлажнения переосушенных земель. Эту же задачу можно решать и обратным методом, используя насосную станцию для подачи воды из водоисточника (водоема, дренажных скважин, реки и т. д.) в тупиковые каналы, из которых она будет поступать самотеком в дрены и увлажнять почву.

Во избежание перегрузки неотрегулированных рек-водоприемников в весенние периоды режим дренирования осушаемого массива (или режим работы насосных станций) подбирается таким образом, чтобы подача дренажного стока в водоприемники осуществлялась задолго до начала половодья, т. е. еще ранней весной или в зимнее время. В этом случае реки будут загружены более равномерно, максимальные расходы половодий резко уменьшатся за счет искусственного растяжения их продолжительности в сторону зимнего периода (путем сброса дренажного стока до начала половодья) и надобность в регулировании рек-водоприемников практически отпадет или будет незначительной.

Замкнутые отрезки каналов связываются между собой и с водоприемником с помощью сети подземных трубопроводов, специальных водораспределительных устройств и насосных станций (стационарных или передвижных, с всасывающими и напорными линиями). Обладая значительными емкостями, отрезки каналов также выполняют роль собирателей и накопителей дренажного стока, поступающего в них самотеком по обычным дренам-осушителям или открытым мелким каналам осушительной сети. Замкнутые каналы как емкости могут иметь различные размеры (длину, глубину и ширину) и формы в плане (прямолинейные, угловидные, замкнутые и т. д.) в зависимости от рельефа осушаемого массива и его площади, объема поступающего в них дренажного стока, режима работы всей системы. В соответствующих гипсометрических условиях роль замкнутых каналов могут выполнять естественные понижения и впадины, горные выработки и т. д.

Одна насосная станция через систему подземных трубопро-

водов и водорегулирующих устройств может откачивать воду из нескольких замкнутых каналов. В зависимости от эксплуатационных задач, выполняемых той или иной насосной станцией, в одной мелиоративной системе могут применяться насосные станции с различными параметрами, как передвижные, так и стационарные, с напорными и всасывающими линиями.

Тупиковые каналы принимают дренажный сток как из дрен-осушителей или самотечных каналов, так и сами, выполняя роль не только проводящей и регулирующей сети, но и осушительной. Таким образом, возможны различные комбинации отрезков каналов с осушительной, проводящей и регулирующей сетью, водоприемником (водопользователем) и насосными станциями.

Соединение отрезков каналов, расположенных на различных расстояниях друг от друга, производится различными способами. Широкое применение может получить параллельное соединение замкнутых каналов, вдоль которых прокладывается одна-две ветки подземных трубопроводов постоянного и переменного сечения. Каждый отрезок канала непосредственно подсоединяется к общему трубопроводу через водозаборное устройство, оборудованное задвижкой или другим регулирующим приспособлением. Эта мелиоративная система может быть полностью автоматизированной (рис. 7.8).

Расчеты показывают, что в условиях Полесья один тупиковый канал может осушать от 30 до 120 га торфяников. При этом длина каналов будет составлять 200—500 м и более.

Применение предлагаемой осушительно-увлажнительной системы периодического действия обеспечивает по сравнению с существующими мелиоративными системами следующие преимущества.

1. Использование дискретной проводящей сети вместо непрерывной самотечной позволяет значительно сократить протяженность глубоких магистральных каналов; это уменьшает объемы земляных работ, неуправляемость мелиоративной системы в целом и, главное, масштабы переосушения почв проводящей сетью, что в свою очередь резко уменьшает потребность в дополнительном увлажнении осушаемых земель и позволяет более рационально использовать водные ресурсы осушаемых территорий.

2. Открываются возможности для создания полностью автоматизированных мелиоративных систем сезонного действия с высокими технико-экономическими и водобалансовыми показателями.

3. Отпадает необходимость в «решительном» и повсеместном регулировании (спрямлении) рек-водоприемников, что позволит сохранить многие реки, а следовательно, и окружающие их природу и микроклимат в естественном состоянии.

Стоимость строительства мелиоративных систем на базе дискретной проводящей сети составит в среднем 1000—1500 руб/га. Для их применения перспективны прежде всего водоразделы и пойменные земли Полесья, временно переувлажняемые территории Сибири, Дальнего Востока и Нечерноземной зоны страны.

Наряду с рассмотренной проводящей сетью весьма перспективной представляется нам комбинированная, т. е. непрерывно-дискретная, проводящая сеть, выполненная в виде различных комбинаций открытых лотков и каналов (в том числе тупиковых и непрерывных) с закрытыми трубопроводами большого диаметра ($\sim$0,5—0,8 м и более). Трубопроводы осуществляют функции магистральных каналов 1-го и 2-го порядков и прокладываются с определенным уклоном в сторону насосной станции или водоприемника. Оборудованные регулирующими и измерительными устройствами (задвижками, колодцами-регуляторами, расходомерами и т. д.) в узловых точках мелиоративной системы, такие трубопроводы образуют систему каскадов с различными величинами подпора и стока. В результате система позволяет управлять дренажным стоком (а следовательно, и положением УГВ) как во времени, так и по площади массива.

Аналогично каскадное регулирование поверхностного стока на реках и каналах с помощью шлюзов- и труб-регуляторов, располагаемых на определенных расстояниях друг от друга на протяжении всей длины водотоков, должно стать одним из основных приемов регулирования и перераспределения водных ресурсов полесских водосборов.

§ 7.7. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

Основной задачей гидрогеологических расчетов СВД является прогноз формирования УГВ в предпосевной и посевной периоды при работе ДС в различных режимах и в различные по водности годы. Вторая задача заключается в оценке суммарной величины дренажного стока, отводимого с осушаемого массива для поддержания оптимального водного режима почв или используемого для орошения. На этом основании отчеты по гидрогеологическим изысканиям должны содержать следующие материалы [26].

А. Гидрогеологические карты в масштабе генерального плана (1: 10 000—1 : 25 000), содержащие сведения по величине и изменению гидрогеологических параметров (водопроводимости, коэффициентов фильтрации и уровнепроводности, водоотдачи, емкости) и литологии пород по разрезу и площади массива до глубины 20—25 или 35—40 м при глубине ДС соответственно 15—20 или 30—35 м.

Б. Характерные инженерно-геологические и гидрогеологические разрезы по всем гидрогеологическим и геофизическим створам.

В. Гидрогеологические схемы и прогнозные карты.

1. Гидрогеологические схемы составляются на основе обобщения, схематизации и типизации исходных материалов по геологии, гидрологии и гидрогеологии данного региона и включают информацию о гидрогеологических параметрах и граничных условиях водоносных горизонтов, вовлекаемых в зону дренирования. Схема должна давать четкое представление о том, к каким расчетным моделям следует приводить осушаемый пласт, отдельные его части или весь дренируемый массив при последующих проектных расчетах или моделировании мелиоративной системы.

При разработке гидрогеологических схем особое внимание следует уделять оценке рода и устойчивости граничных условий водоносных горизонтов. В частности, при описании граничных условий на подошве безнапорного пласта необходимо иметь в виду, что перетекание подземных вод нижележащих водоносных горизонтов в дренируемый проявляется постепенно (не сразу после возникновения разности напоров), изменчиво во времени и обычно происходит через «окна» в разделяющих водоупорах. В безнапорных пластах «бесконечно» большой мощности необходимо, как правило, определять или рассчитывать глубину зоны дренирования или, иначе, мощность активной зоны фильтрации (по Е. А. Замарину) и устанавливать характер ее колебания при изменении режима работы ДС. Точность решения этой задачи в гидрогеологических условиях Полесья определяет достоверность оценки гидрогеологических параметров и последующих фильтрационных и водобалансовых расчетов [79, 85].

Для определения перетекания подземных вод из смежных водоносных горизонтов в возмущенный наряду с известными методами, основанными на гипотезе А. Н. Мятиева—Н. К. Гиринского, рекомендуется пользоваться *методом депрессионных воронок* [53]. В основе этого метода лежит явление образования самостоятельной пьезометрической или безна-

порной воронки депрессии в смежном пласте, из которого началось перетекание в основной (возмущенный) водоносный горизонт под действием разности напоров между ними. Эту воронку депрессии будем называть смежной или сопредельной, а воронку депрессии возмущенного пласта — основной. Смежная воронка депрессии развивается до размеров, соответствующих максимальной (установившейся) величине перетекания в основной горизонт, из которого производится откачка. Если перетекание появляется в обоих смежных пластах, расположенных непосредственно за подошвой и кровлей основного горизонта, то в каждом из этих пластов образуется своя воронка депрессии. В многопластовых системах воронки депрессии смежных пластов создают разность напоров и в остальных пластах, граничащих со смежными или расположенными далее по разрезу. Возникает перетекание из одного смежного пласта в другой и образуется несколько смежных воронок депрессий. Этот процесс гидравлического взаимодействия (интерференции) смежных пластов будем называть сложным перетеканием.

В плане центры смежных депрессионных поверхностей практически совпадают с центром воронки депрессии основного горизонта и указывают на то, что величину перетекания можно определять с помощью смежных воронок депрессий. Действительно, зная проводимость смежного пласта и размеры образовавшейся в нем воронки депрессии, по известным формулам легко рассчитать расход фильтрационного потока, протекающего в смежном пласте. Величина этого расхода и будет равна суммарной величине перетекания.

Метод депрессионных воронок разработан на основе обобщения натурных исследований сложного перетекания, имевшего место при производстве опытных групповых откачек и водопонижения в слоистых толщах [53]. Его преимущества перед методами, основанными на гипотезе А. Н. Мятиева — Н. К. Гиринского, заключаются в следующем:

а) для оценки перетекания методом депрессионных воронок нет надобности определять начальный градиент напора, проводимость разделяющих слабопроницаемых слоев и зависимый от них коэффициент (параметр) перетекания;

б) метод позволяет прогнозировать изменение режима перетекания во времени в зависимости от продолжительности и интенсивности дренирования основного горизонта;

в) метод дает возможность расчленить дебит скважины на отдельные составляющие, равные величинам перетекания из смежных пластов и расходу потока основного горизонта.

2. Гидрогеологические прогнозные карты составляются для крупных мелиоративных систем, площадь которых не менее 2—3 тыс. га. Карты составляются на базе гидрогеологических схем и намечаемых мелиоративных и водохозяйственных мероприятий методами моделирования и гидрогеологических расчетов. На карты наносятся прогнозные характеристики водного режима осушаемой и прилегающих территорий, которые будут иметь место через 3—5 и 10—12 лет эксплуатации мелиоративной системы.

Прогнозные карты должны содержать прежде всего сведения о расчетном положении УГВ и модуле дренажного стока в характерные по водности годы. В районах расположения водохранилищ на карты наносятся границы распространения подпора и величины фильтрационных потерь. Во всех случаях на картах отмечаются площади, переосушаемые в летнее время и требующие дополнительного увлажнения. Для этих площадей указываются характерные величины дефицита влаги в почве, выраженные в миллиметрах слоя поверхностного стока, и необходимые нормы водопотребления.

Г. Результаты опытно-фильтрационных работ, проводимых с целью оценки водообильности дренируемой толщи и определения ее гидрогеологических параметров.

Основным видом таких работ, выполняемых для обоснования проектов ВД, должны быть опытные кустовые и групповые откачки.

1. Опытные кустовые откачки должны проводиться с расчетом одна откачка в среднем на 250—300 га осушаемого массива при простых гидрогеологических условиях (I и II регионы на схеме районирования Припятского Полесья) и одна откачка на 150—200 га в условиях грунтово-напорного питания.

На болотных массивах площадью 400—500 га, характеризующихся простыми гидрогеологическими условиями, в период изысканий может проводиться одна кустовая откачка, если по смежной территории имеются данные о водообильности и водопроницаемости пластов, полученные при гидрогеологических съемках масштаба 1 : 100 000 и крупнее. Однако в тех случаях, когда на данном водосборе существует массив с подобным геолого-литологическим строением, осушаемый ВД, то оценку гидрогеологических условий изучаемого объекта следует производить по данным лабораторных определений водных и физико-механических свойств водовмещающих пород, широко используя метод гидрогеологических аналогий.

2. Опытные кустовые откачки целесообразно проводить из

разведочно-эксплуатационных скважин, которые в последующем могут быть использованы как дренажные. Такие скважины необходимо оборудовать сетчатыми, щелевыми или комбинированными фильтрами длиной не менее 15—17 м. Фильтры могут быть выполнены также из пористого бетона, стеклопластиковых и других (полиэтиленовых и пластмассовых) материалов. Глубина скважин должна составлять 20—30 м, диаметр водоподъемной колонны — 12—14 дюймов.

При наличии в разрезе прослоя плотных глин мощностью 2—3 м и более, расположенного в интервале глубин от 8 до 20 м, для опытных откачек рекомендуется сооружать бесфильтровые скважины. В этом случае нижний торец обсадной колонны устанавливается под подошвой глинистого слоя на расстоянии 0,5—1,0 м. Прокачка производится эрлифтом до прекращения выноса песка.

Опытные групповые откачки проводятся на первых эксплуатационных скважинах в период строительства ВД.

3. При выполнении опытных кустовых откачек измеряются снижение и восстановление УГВ и дебит скважины непрерывно в течение всей откачки. Частота замеров снижения УГВ должна составлять: в первые 2 ч откачки — через 10—20 мин, в последующие 8 ч — через 30 мин, спустя 10 ч после начала откачки — через 1 ч. Измерения восстановления УГВ необходимо вести в среднем в 2 раза чаще.

Продолжительность проведения откачек и замеров восстановления УГВ может быть рассчитана по формулам [26]:

продолжительность откачки

$$\Delta t_c = 15{,}0 + 0{,}6\,Q; \qquad (7.7.1)$$

продолжительность восстановления

$$\Delta t_в = 5{,}0 + 0{,}25\,Q, \qquad (7.7.2)$$

где время Δt_c и $\Delta t_в$ — в ч, дебит Q — в м³/ч.

В условиях грунтово-напорного питания продолжительность откачек Δt_c и замеров восстановления УГВ $\Delta t_в$ может быть увеличена на 40—60% по сравнению с рассчитанной по данным формулам.

4. Для выполнения кустовых откачек закладывается наблюдательная сеть из грунтовых колодцев или скважин глубиной 3—6 м (близко расположенные наблюдательные скважины должны быть на 3—4 м длиннее, чем скважины, расположенные на удалении более 15 м от центральной). Скважины располагаются по створу на расстоянии 3, 10, 20, 30, 50 м от центральной (опытной). При выполнении длительных откачек

с большими дебитами дополнительно устанавливаются 2 наблюдательные скважины (колодцы) глубиной 3—4 м на расстоянии 70 и 100 м от опытной.

§ 7.8. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОСУШИТЕЛЬНО-УВЛАЖНИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

Натурные исследования ВД проводились в условиях I и II районов [100, 101]. На основании этих опытов, а также проектных и теоретических разработок в первом приближении установлено [47, 79, 84, 100, 101], что мелиоративные системы, базирующиеся на различных модификациях вертикального и горизонтального дренажа, в условиях Полесья будут иметь следующие основные характеристики (предварительные данные).

1. ВД наиболее эффективен в гидрогеологических условиях, когда болотные образования подстилаются мощной (более 15 м) толщей песчаных отложений, водопроницаемость которых, определенная по Дюпюи, составляет 5 м/сут и более. В этих условиях, широко распространенных в Полесье, одна ДС в системе комбинированного дренажа может осушать (при соблюдении известных предпосевных и технико-экономических нормативов) в среднем 40—80 га заболоченных земель. При этом продолжительность осушения (сработки избыточных напоров до установления оптимальной нормы осушения в междренной зоне) будет составлять: весной 8—15, летом (при выпадении обильных дождей) 4—7 сут. Это значит, что за вегетационный период ВД в режиме осушения будет работать не более 20—30 сут, причем в летние месяцы будет эксплуатироваться при средних загрузках насосов в основном 40—60% всего количества ДС.

2. При достаточно устойчивом водном питании оптимальная норма осушения на массиве поддерживается периодическим включением и отключением насосов. Неравномерность залегания УГВ в таких эксплуатационных и гидрогеологических условиях исчезает практически спустя 0,3—0,5 сут после остановки насосов [100, 101].

В засушливые периоды и при слабом и неустойчивом водном питании влажность почвы на СВД легко регулируется орошением путем откачки грунтовых вод из отдельных ДС и подачи их (через бассейны суточного регулирования и подогрева воды) в дождевальные установки.

Использование СВД становится еще более экономичным

при строительстве систем сифонного и всасывающего водозабора на базе высокодебитных бесфильтровых скважин и скважин большого диаметра глубиной 12—17 м, оборудованных лучевыми фильтрами и экономичными насосами.

3. ДС должны иметь следующие параметры: глубина 20—25 м, диаметр фильтровой колонны 12—14 дюймов, длина фильтра 15—18 м, толщина гравийной обсыпки фильтра не менее 7—8 см, дебит скважин должен составлять 120—160 м³/ч и более при понижении уровня воды в скважине на 6—12 м. В ДС целесообразно устанавливать погружные насосы ЭЦВ-10 или ЭЦВ-12 различных модификаций. Рекомендуется бурить скважины большого диаметра роторными станками с обратной промывкой.

4. Опыт проектирования, строительства и натурных исследований ВД показал, что экономические характеристики осушительно-увлажнительных систем на базе ВД будут иметь следующие значения.

Элементы СВД	Стоимость строительства
ДС глубиной 25 м без оборудования	3—6 тыс. руб.
ДС в системе ВД с насосно-силовым оборудованием	8—12 тыс. руб.
ДС в системе ВД с сифонным водозабором (с учетом соединительных трубопроводов и насосно-силового оборудования на водопонижающей скважине)	6—10 тыс. руб.
Осушительная система на базе комбинированного дренажа (редкая сеть неглубоких каналов, усиленная ДС)	500—800 руб/га
Осушительная система на базе комбинированного дренажа с применением сифонного водозабора	400—600 руб/га
Осушительно-увлажнительная система на базе комбинированного дренажа и орошения грунтовыми водами	1200—1800 руб/га

5. Гидрогеологические условия Припятского Полесья позволяют применять СВД на площади не менее 700 тыс. га. Если учесть, что экономический эффект от внедрения осушительно-увлажнительных систем на базе ВД по сравнению с традиционными системами на базе горизонтального дренажа и водохранилищ составляет, по предварительным данным [100, 101], не менее 200 руб/га, то внедрение СВД на таких площадях даст экономию не менее 140 млн. руб.

6. Для совершенствования осушительно-увлажнительных систем на базе ВД необходимо осуществлять [47, 84]:

всемерное уменьшение глубин ДС и увеличение их диаметра до 1,0—1,5 м с целью уменьшения мощности активной зоны дренирования, повышения водозахватной способности фильтров и улучшения условий эксплуатации скважин;

широкое использование пластмассовых и асбестоцементных труб вместо дорогостоящих стальных при обсадке ДС, установке фильтров и прокладке подземных трубопроводов;

бурение ДС большого диаметра роторными станками с обратной промывкой, строительство высокодебитных скважин, применение фильтров из пористых (в том числе стеклопластиковых и других полимерных) материалов, достаточно устойчивых к агрессивному воздействию грунтовых вод;

разработку оптимальных схем комбинированного дренажа с целью отвода с переувлажняемых земель только избыточных поверхностных и грунтовых вод, приводящих к переувлажнению почв, недопущения переосушения мелиорируемых земель и последующего отказа от их интенсивного дополнительного увлажнения.

§ 7.9. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Переход на управляемые мелиоративные системы периодического (сезонного) действия требует инженерной оценки и прогнозирования роли гидрогеологических факторов в формировании водного режима осушаемых и прилегающих к ним территорий. Решение этой проблемы позволит существенно повысить качество проектирования (и прежде всего гидрогеологического обоснования) СВД.

Среди задач, имеющих принципиальное значение для повышения точности гидрогеологических расчетов мелиоративных систем, главное место занимают задачи о достоверности исходной гидрогеологической информации. Такой информацией, характеризующей водообильность, водопроницаемость, водоотдачу, приемистость, баланс и режим водного питания пласта, являются расчетные гидрогеологические параметры и граничные (краевые) условия осушаемых водоносных горизонтов. Для территории Припятского Полесья, где водоносные пласты четвертичной и меловой толщ гидравлически взаимосвязаны и в зоне активного водообмена выделяется до 10 самостоятельных водоносных слоев и комплексов, эти задачи имеют большое научное и практическое значение. Поэтому уже в ближайшие годы необходимо выполнить комплекс теоретических и натурных исследований по разработке

гидрогеологических основ проектирования мелиоративных систем и, в частности, методов оценки достоверности и репрезентативности гидрогеологической информации, включая данные о параметрах перетекания и величине грунтового питания осушаемых массивов.

Решение данной проблемы невозможно без выяснения закономерностей формирования и изменения граничных условий пластов и мощности (глубины) зоны дренирования [79, 85]. Задача усложняется еще и тем, что теория граничных условий водоносных горизонтов и комплексов находится в стадии интенсивного развития.

Постановка данной проблемы мелиоративной гидрогеологии вытекает также из наметившегося перехода к разработке бассейновых и межбассейновых схем мелиорации и комплексного использования водных ресурсов. Разработка таких схем в свою очередь требует составления оперативных и долгосрочных прогнозов изменения водного режима и, в частности, подземного и поверхностного стоков на осушаемых и прилегающих к ним территориях. Отечественный и зарубежный опыт составления аналогичных прогнозов показывает, что для эффективного решения этой проблемы необходимо привлечение ЭВМ и физико-математического моделирования гидромелиоративных систем. Результатом этих исследований должны стать постоянно действующие модели бассейновых схем мелиорации.

Задачи гидрогеолого-мелиоративных исследований, вытекающие из рассмотренной проблемы, а также диктуемые масштабами и целями современных осушительно-оросительных мелиораций, наиболее полно освещены в работах [5, 9, 10, 37, 40, 47, 79, 84, 85, 100, 101]. Решению этих задач в определенной степени будут способствовать материалы и выводы, содержащиеся в данной монографии. Основные из них могут быть сформулированы следующим образом.

1. В зоне Припятского Полесья переувлажнение сельскохозяйственных угодий неустойчиво и носит временный (сезонный) характер. Поэтому осушение таких земель (и прежде всего торфяников) необходимо вести в отдельные промежутки времени, когда наблюдается избыточное увлажнение почвы (в основном ранней весной и осенью). Применяемые же мелиоративные системы основаны на самотечной проводящей сети (магистральных каналах) и в водобалансовом отношении несовершенны, поскольку непрерывно в течение всего года дренируют массив и прилегающие к нему территории. Это приводит к тому, что на переувлажняемых землях после

проведения мелиоративных работ возникает дефицит влаги в почве и появляется острая необходимость в дополнительном увлажнении (орошении) этих земель. В результате данные системы не в состоянии обеспечить двустороннего регулирования водного режима осушаемых массивов без дополнительного их увлажнения за счет интенсивного использования зарегулированного поверхностного или подземного стока [47, 79]. По этой причине чрезвычайно актуален вопрос о разработке различных моделей технически совершенных и экономичных осушительно-оросительных систем периодического (сезонного) действия. На таких системах оптимальный водно-воздушный режим почв достигается путем периодического отвода с заболоченного массива только избыточных поверхностных и грунтовых вод, приводящих к переувлажнению территории, без применения (или при ограниченном применении в засушливые годы) дополнительного увлажнения. Этим требованиям удовлетворяют прежде всего осушительные системы с механической откачкой дренажного стока и, в частности, различные сочетания самотечного (горизонтального) дренажа с вертикальным.

Системы вертикального дренажа состоят из осушительной и проводящей сети и водоприемника. Осушительная сеть может быть представлена как дренажными скважинами и шахтными колодцами глубиной 15—25 м, так и лучевыми водозаборами, состоящими из системы водосборных колодцев (водосборных камер) с горизонтальными или наклонными лучевыми фильтрами (дренами). На скважинах и водосборных колодцах устанавливается насосно-силовое оборудование, подводится ЛЭП.

Водосборный колодец принимает воду из нескольких лучевых дрен, выполненных в виде гончарных, пластмассовых, асбоцементных или металлических трубчатых фильтров диаметром 10—20 см и более. Из водосборной камеры на глубине 4—6 м эти дрены в радиальных направлениях продавливаются в осушаемый или подстилающий водоносный горизонт на расстояние до 100 м и более. Поэтому лучевые дрены всегда находятся в затопленном состоянии. Один их торец (устье) выходит в водосборный колодец, к другому во многих случаях целесообразно подсоединять коллекторы обычного горизонтального дренажа.

Глубина одноярусных водосборных колодцев составляет 6—8 м, диаметр 2—3 м. Применение лучевых водозаборов на 20—40% экономичнее по сравнению с дренажными скважинами. Мелиоративные системы на базе лучевых водозаборов

особенно эффективны в безнапорных пластах незначительной мощности (до 4—6 м), в условиях грунтово-напорного питания осушаемых земель и в неоднородно-слоистых грунтах.

Проводящая сеть на системах вертикального дренажа состоит из мелких каналов или подземных трубопроводов и служит для отвода и перераспределения дренажного стока. Водоприемником могут служить неотрегулированные реки, наливные водоемы, пруды и т. д. Перекачка дренажного стока в такие водоприемники осуществляется как напрямую артезианскими насосами, так и насосными станциями. При наличии отрегулированного водоприемника дренажный сток отводится самотеком по мелким каналам.

При устойчивом и обильном водном питании мелиорируемых земель оптимальная норма осушения поддерживается периодическим включением и отключением дренажных скважин. Неравномерность залегания УГВ исчезает спустя 0,3—0,5 сут после отключения насосов. Норма осушения, необходимая для производства посевных работ, достигается на междренье в течение 5—10 сут работы скважин, пущенных в эксплуатацию с дебитами 120—140 м³/ч и расположенных на расстоянии 800—1000 м друг от друга, если торфяники подстилаются толщей мелкозернистых и среднезернистых песков. В этих условиях модули дренажного стока для предпосевного периода составляют 0,5—0,8 л/с·га.

При слабом и неустойчивом водном питании, а также в засушливые периоды, когда интенсивное испарение и транспирация приводят к критическому понижению УГВ и начинается процесс естественного переосушения почв, управление водным режимом корнеобитаемого слоя осуществляется путем орошения земель грунтовыми водами. Последние подаются в дождевальные установки как напрямую погружными насосами, так и оросительными насосными станциями через бассейны суточного регулирования и подогрева дренажных вод или другие аккумулирующие емкости.

Основным достоинством вертикального дренажа следует считать то, что в годы любой водности этот дренаж своевременно или заблаговременно отводит с осушаемого массива только избыточные влагозапасы и тем самым позволяет максимально беречь водные ресурсы осушаемых территорий. Объем среднегодового дренажного стока на таких системах на ~30—80% меньше, чем на самотечных системах непрерывного действия. Эта разница в объемах дренажного стока, равная в среднем 1300—1800 м³/га за сезон, и составляет тот запас ежегодно восполняемых грунтовых вод, который не от-

водится с осушаемого массива в виде безвозвратного стока и может быть использован на орошение в засушливые периоды.

Продолжительность работы вертикального дренажа в режиме осушения и в режиме орошения в сумме не превышает 1,5—3,0 мес за сезон.

2. С целью повышения точности долгосрочных прогнозов водного режима осушаемых территорий большое внимание уделено изучению устойчивости обобщенных гидрогеологических параметров при изменении интенсивности и продолжительности дренирования безнапорных пластов. В условиях Полесья, где водоносные горизонты четвертичной и меловой толщ гидравлически взаимосвязаны и практически представляют единый безнапорный комплекс, этот вопрос имеет принципиальное значение. Поэтому было проанализировано более 400 опытных откачек, выполненных в процессе съемок и изысканий на всех водосборах Полесья. Откачки проводились из песков, подстилающих болотные образования. Ставилась задача выяснить характер зависимости коэффициента фильтрации k, рассчитанного по данным откачек из этих отложений, от величины дебита скважин Q. Анализ показал, что с увеличением дебита скважин Q значения k возрастают практически по линейной зависимости. По аналогичному закону с увеличением Q возрастают величины проводимости T, определенные по формуле Ч. В. Тейса с использованием графиков временного прослеживания снижения УГВ в зоне регулярного режима [85]. Это дало основание заключить, что проектирование дренажа во многих случаях целесообразно вести по неустойчивым или плавающим значениям гидрогеологических параметров, соответствующим принятой интенсивности дренирования пласта или водосбора.

3. Анализ существующих методов определения промежутка высачивания и параметров пластов по данным опытных откачек показывает, что их достоверность определяется тем, как исследователи понимают теорию Дюпюи и его известные формулы. Одни авторы в формулах Дюпюи используют понижение уровня (пластового давления) внутри возмущающей скважины S_c, другие (И. П. Кусакин, Г. Н. Каменский) — понижение депрессионной поверхности в пласте по внешней стенке возмущающей скважины S_0, а третьи считают, что при расчете дебита необходимо использовать понижение S_c, а при расчете депрессионной кривой учитывать существование промежутка высачивания $\Delta h = S_c - S_0$ и брать понижение S_0. Последняя точка зрения получила широкое распространение в современной теории фильтрации.

Правильное толкование формул Дюпюи имеет огромное теоретическое и прикладное значение. При изучении этого вопроса было установлено [53—55, 57], что на границах области фильтрации и, вероятно, вблизи них напорная функция (потенциал) имеет разрыв. Поэтому при интегрировании дифференциальных уравнений гравитационной и напорной фильтрации за крайние пределы изменения напорной функции (граничные условия) необходимо брать значения напора (потенциала) в пласте по внешним стенкам возмущающих дрен, а не внутри их, как это нередко практикуется. В частности, в формулах Дюпюи, учитывающих крайние (граничные) пределы изменения напора, эти пределы представляют собой значения понижений S_0 в пласте по внешним стенкам дрен. Следовательно, формулы Дюпюи учитывают промежуток высачивания Δh и пьезометрический разрыв ΔS и являются точными как при определении расхода фильтрационного потока (или теоретического дебита дрен), так и при расчете депрессионной поверхности [54, 55]. Таким образом было доказано, что толкование формул Дюпюи по И. П. Кусакину — Г. Н. Каменскому является единственно правильным. В настоящее время к этому выводу пришли и другие исследователи (см. «Известия вузов. Геология и разведка», 1978, № 8, с. 94—99).

4. Наиболее важным результатом научных поисков автора является обнаружение существования разрыва (скачка) $\Delta S = S_c - S_0$ между уровнем жидкости (давлением) внутри возмущающей *артезианской* скважины S_c и пьезометрическим уровнем в пласте по внешней стенке этой скважины S_0 [53—55, 57]. Величина ΔS названа пьезометрическим разрывом (скачком). В работе [57] указывалось, что в настоящее время отсутствуют практически приемлемые методы расчета величины промежутка высачивания Δh, а для расчета пьезометрического разрыва ΔS, существование которого в теории фильтрации пока отрицается, формул вообще не существует. Практика, однако, показывает, что и в артезианских дренах имеет место разрыв пьезометрического уровня ΔS, достигающий во взаимодействующих скважинах 50—100 м и более при снижении напора в них от 100 до 200 м (Яковлевское месторождение КМА, Белозерское железорудное месторождение). Величина ΔS находится в прямолинейной зависимости от дебита скважины и величины понижения в ней уровня S_c и в одиночных гидрогеологических скважинах составляет 50—80% от понижения S_c.

В последующем Э. А. Грикевич также обнаружил наличие

пьезометрического скачка уровней ΔS у стенок возмущающих артезианских скважин [29, 30].

5. Наличие разрыва напорной функции у стенок возмущающих дрен указывает на то, что область справедливости как формул Дюпюи, так и других формул по расчету фильтрационных потоков ограничена внутренней областью фильтрации, расположенной между границами разрыва напорной функции. Ширина зоны разрыва напорной функции в плане остается неизвестной. Это требует, чтобы параметры пластов и фильтрационного потока определялись не по замерам уровня жидкости внутри дрены, где не существует фильтрационного потока, а по замерам положения депрессии в пласте, начиная с некоторого расстояния от внешней стенки возмущающей дрены. Очевидно, это расстояние должно быть не меньше ширины зоны разрыва напорной функции [55]. Отсюда следует, что при фильтрационных расчетах и моделировании возмущающих дрен необходимо правильно задавать граничные условия у их стенок, т. е. учитывать существование здесь разрыва напорной функции и закономерностей его изменения при неустановившейся фильтрации. К примеру, при пуске артезианской скважины в работу с постоянным понижением в ней уровня (пластового давления) $S_c = \text{const}$ по внешней стенке скважины в пласте будет происходить снижение уровня, величина пьезометрического скачка ΔS_t будет непрерывно уменьшаться до стационарного положения ΔS и условия $\Delta S = 0$ и $S_0 = \text{const}$ не будут иметь места. Это значит, задачи неустановившейся фильтрации, решенные в предположении одновременного существования условий $S_c = S_0 = \text{const}$, не будут иметь подтверждения в реальных пластах [53—55, 57, 60, 64].

6. При изучении несовершенства возмущающих скважин было установлено [53, 54, 55, 57], что понижение уровня воды внутри возмущающей скважины S_c отражает суммарные (или обобщенные) сопротивления пласта и скважины в данных гидрогеологических и гидродинамических условиях, т. е. всегда для совершенных и несовершенных реальных дрен величина S_c является функцией обобщенного сопротивления (или несовершенства) возмущающей скважины. На этом основании понижение S_c можно разделить на потери напора S_0, обусловленные фильтрационными сопротивлениями пласта, и потери напора ΔS, возникающие за счет несовершенства скважины. Отсюда следует, что несовершенство возмущающей скважины, обусловленное степенью и характером вскрытия пласта фильтром, «скин-эффектом» в прифильтровой зоне и т. д., при установившейся и неустановившейся фильтрации может быть

охарактеризовано величиной пьезометрического скачка ΔS или величиной промежутка высачивания Δh у ее стенки. Поэтому использование в формулах притока к совершенным и несовершенным скважинам понижения S_c должно сопровождаться одновременным введением в эти формулы соответствующих поправок ξ на потери напора ΔS или Δh. Это говорит о том, что при оценке несовершенства возмущающей скважины (например, через поправки к формуле Дюпюи ξ_x, предложенные В. И. Щуровым, В. Н. Щелкачевым, Н. Н. Веригиным, А. Я. Олейником, В. С. Усенко и др.) фактически ставится задача определить соответствующую величину разрыва уровня $\Delta S_x = S_c - S_{0x}$ у стенки скважины. В результате было доказано, что расчет расхода потока (или теоретического дебита дрен), кривых депрессий и параметров пластов следует вести только по понижениям уровня в наблюдательных скважинах. Использовать для этого понижения уровня внутри возмущающих скважин S_c без учета величины разрыва уровня ΔS или Δh по их стенкам не рекомендуется ввиду получающейся при этом большой погрешности [57].

7. Было установлено [77, 78, 80], что приведенный радиус возмущающей артезианской скважины r_0' представляет собой абсциссу точки (r_0', S_c) на пьезометрической поверхности Дюпюи, продолженной внутрь возмущающей скважины до пересечения с уровнем S_c. Отсюда следует, что при введении r_0' осуществляется переход от понижения S_c к понижению S_0, т. е. нахождение r_0' равносильно определению ΔS. Аналогичным свойством обладает также показатель обобщенного сопротивления возмущающей артезианской скважины (или поправка к формуле Дюпюи на несовершенство этой скважины) ξ. Установлено, что поправка ξ представляет собой тангенс угла наклона графика $\Delta S = f(Q)$ к оси Q при $2\pi T_D = 1$. Следовательно, определение ξ равносильно определению ΔS. Поскольку в реальных условиях всегда $\Delta S \gg 0$, то отсюда получены весьма важные соотношения, справедливые для установившейся и неустановившейся фильтрации и для скважин с любой величиной несовершенства: $\xi \gg 0$ и $r_0' \ll r_0$, где r_0 — действительный радиус возмущающей скважины. Приводимые в литературе случаи, когда $\xi < 0$ и $r_0' > r_0$, при откачках из скважин никогда не встречаются и имеют место только при расчетах, основанных на ошибочной методологии.

8. Оценка несовершенства возмущающих грунтовых скважин до сих пор производится с использованием поправок ξ, полученных для артезианских скважин, т. е. без учета сущест-

вования промежутка высачивания $\Delta h = h_0 - h_c = S_c - S_0$ или промежутка нависания $\Delta H = S_c - S_0$ и закономерностей их изменения. Поэтому вопросы увязки величины Δh с параметрами несовершенства грунтовой скважины (приведенным радиусом r_0^* и коэффициентом обобщенного сопротивления ξ^*) до настоящего времени не рассматривались. В данной монографии впервые получены решения по определению Δh, учитывающие зависимость Δh от параметров обобщенного сопротивления фильтра и призабойной зоны пласта r_0^* и ξ^*. Установлено, что поправка к формуле Дюпюи ξ^*, компенсирующая суммарное несовершенство грунтовой скважины, представляет собой тангенс угла наклона графика $h_0^2 - h_c^2 = f(Q)$ к оси Q при $\pi k_D = 1$. Это значит, что при введении ξ^* в формулу Дюпюи осуществляется переход от напора h_c внутри скважины к напору h_0 в пласте по внешней стенке скважины. Эту же роль выполняет и приведенный радиус возмущающей грунтовой скважины r_0^*. Всегда $\xi^* \gg 0$ и $r_0^* \ll r_0$ [88].

9. В настоящее время для компенсации обобщенных сопротивлений скважин, работающих в нестационарных условиях, в формулу Ч. В. Тейса вводят поправку-константу ξ [15, 17, 18, 25, 41, 45, 95, 98, 103, 105, 112, 120, 130]. В то же время натурные опыты и теоретические исследования показали, что при неустановившемся режиме фильтрационные сопротивления существенно изменяются во времени. Поэтому методы, разработанные автором для оценки несовершенства скважин, работающих в стационарных условиях [53—55, 57, 64, 71, 73, 74, 77], были применены для изучения характера изменения параметров ΔS, ξ, r'_0 во времени при неустановившейся фильтрации. В результате этих исследований установлены закономерности изменения функций $\Delta S_t = f(t)$, $\xi_t = f(t, \Delta S_t, r'_{0t})$ и $r'_{0t} = f(t, \Delta S_t, \xi_t)$ при регулярном режиме неустановившейся фильтрации, где ξ_t — поправка-функция к формуле Ч. В. Тейса, компенсирующая неустановившееся обобщенное сопротивление возмущающей скважины в момент времени t; r'_{0t} — неустановившийся приведенный радиус возмущающей скважины в момент времени t, выполняющий ту же роль; ΔS_t — величина пьезометрического скачка ΔS в момент времени t после пуска скважины в работу. График функции $\xi_t = f(\Delta S_t)$ представляет собой прямую с угловым коэффициентом $4\pi T/Q$ [64, 73, 74, 78, 80, 81].

10. Величины гидрогеологических параметров a_c и T_c, определяемые при неустановившейся фильтрации по данным снижения (восстановления) уровня внутри возмущающей скважины

S_{ct}, являются кажущимися (по В. Н. Щелкачеву) или приведенными (по Н. Н. Веригину), поскольку искажены влиянием неустановившихся сопротивлений фильтра и призабойной зоны пласта ξ_t. Изучение этого вопроса позволило установить, что неустановившееся обобщенное сопротивление возмущающей скважины ξ_t состоит из двух сопротивлений: константы ξ^{**}, осуществляющей перевод кажущейся пьезопроводности a_c в истинную пьезопроводность пласта $a = a_c \exp(-\xi^{**})$, и функции времени ξ_t^{**}, осуществляющей перевод кажущейся проводимости T_c в истинную проводимость пласта $T = T_c + \psi/4\pi$, где $\psi = Q\xi_t^{**}/S_{ct} = \text{const}$. Вместе взятые поправки на пьезопроводность ξ^{**} и проводимость ξ_t^{**} заменяют функцию $\xi_t = \xi^{**} + \xi_t^{**}$, вводимую в формулу Ч. В. Тейса для компенсации неустановившихся потерь напора ΔS_t на стенке возмущающей скважины. Наличие двух составляющих неустановившегося обобщенного сопротивления ξ_t объясняется тем, что перераспределение напоров в неустановившемся фильтрационном потоке характеризуется двумя параметрами: пьезопроводностью и проводимостью.

11. Анализ гидрогеологических параметров, полученных для одних и тех же пластов различными методами в полевых и лабораторных условиях, показал, что величины этих параметров зависят от способа их определения и нередко существенно (в 2—3 раза и более) отличаются друг от друга [53—55, 57]. Отсюда был сделан вывод, что при гидрогеологических съемках и изысканиях в большинстве случаев целесообразно четко разделять величины гидрогеологических параметров, определяемые раздельно: 1) при установившейся и неустановившейся фильтрации; 2) по данным снижения и восстановления уровня (пластового давления); 3) по данным опытных одиночных и кустовых (или групповых) откачек в период изысканий, строительства и эксплуатации водозабора или мелиоративной системы; 4) по данным режимных наблюдений и экспресс-методами; 5) в приборах Дарси и рассчитываемые по механическому составу грунта с использованием эмпирических формул и т. д. Среди гидрогеологических параметров, кроме того, следует отличать обобщенные их значения, получаемые по данным опытных или эксплуатационных откачек и режимных наблюдений, от лабораторных значений этих параметров, определяемых в приборах Дарси и не отражающих характера водообмена между возмущенным и смежными пластами. Опыт показывает, что обобщенные значения гидрогеологических параметров в большинстве случаев зависят от интенсивности, продолжительности и масштабов дренирования

водоносных пластов [85]. Лабораторные величины коэффициента фильтрации и начального градиента напора также относительны, поскольку определяются в условиях проявления дестабилизирующих граничных сопротивлений приборов Дарси [87].

Для каждого региона имеется устойчивая корреляционная связь между обобщенными и лабораторными величинами гидрогеологических параметров, если режим водного питания возмущенного пласта не изменяется или изменяется по определенному закону в период эксплуатации дренажных систем. На этом основании для фильтрационных расчетов дренажа, работающего с различной интенсивностью и при различных эксплуатационных режимах в одних и тех же гидрогеологических условиях, во многих случаях целесообразно использовать неодинаковые величины обобщенных гидрогеологических параметров. К примеру, обобщенные величины водопроводимости и коэффициента фильтрации подстилающих песков Полесья, применяемые для фильтрационных расчетов горизонтального дренажа, обычно в 1,5—3 раза меньше значений этих параметров, используемых при проектировании вертикального дренажа. Поэтому всегда необходимо указывать, по какой методике получены рекомендуемые величины гидрогеологических параметров и в какой степени будут они устойчивы во времени при намечаемых диапазонах изменения масштабов (в плане), интенсивности и продолжительности работы мелиоративной системы или водозабора. В таких случаях проектировщик в состоянии оценить достоверность гидрогеологической информации и примет для расчетов те величины гидрогеологических параметров (рекомендуемые или исправленные), которые обеспечат прогнозам максимальную точность.

12. Изучение неустойчивости фильтрационного потока ньютоновских и аномальных жидкостей в приборах Дарси показало, что капиллярнопористая среда может характеризоваться в зависимости от закономерностей изменения фильтрационных сопротивлений на торцах пермеаметра различными значениями проницаемости и начального градиента напора I_0 (под величиной I_0 понимается отрезок оси I, отсекаемый продолжением прямолинейного участка графика $V=f(I)$). Существование данного явления объясняется тем, что при движении жидкости в пермеаметре могут иметь место (в соответствии с закономерностями проявления граничных сопротивлений) четыре вида устойчивых граничных условий 1-го рода и два градиента напора: внешний I^*, вызывающий движение жидкости по всей трубке, включая и ее торцы, и внутренний I,

формирующийся в средней части трубки (за пределами приторцевых зон), где пьезометрическая поверхность прямолинейна.

В приторцевых зонах трубки пьезометрическая поверхность потока резко изгибается и указывает на наличие здесь переменных (вдоль пути фильтрации) градиентов напора, зависящих от условий входа в трубку и выхода из нее. Существование этих зон связано с воздействием осложняющих концевых эффектов и вызывает неустойчивость скорости фильтрации V относительно градиента I. Исследования показали, что каждому виду граничных условий 1-го рода соответствует свой закон изменения граничных потерь напора при возрастании или убывании скорости фильтрации V. Получены формулы, характеризующие эти законы. Установлено, что переход одного вида граничных условий к другому вызывается тем, что при изменении направленности фильтрационного потока и возникновении дестабилизирующих (контактных и других) сопротивлений на границах пористой среды действие массовых и внешних сил проявляется по-разному. Это приводит к формированию различных законов изменения граничных сопротивлений и различных величин внутреннего градиента напора I при одной и той же установившейся скорости фильтрации V. В результате возникает неустойчивость скорости фильтрации V относительно градиента I, когда в центральной части трубки одна и та же скорость фильтрации формируется под воздействием различных значений I.

Экспериментальные и теоретические исследования этого явления позволили выяснить, что неустойчивость течения проявляется в перемещении прямой $V=f(I)$ по полю $V—I$ таким образом, что каждому виду граничных условий соответствует одно единственное положение графика $V=f(I)$ со своими величинами углового коэффициента (коэффициента фильтрации) и начального градиента напора. К примеру, неустойчивость фильтрационного потока приводит к тому, что для одной и той же пористой среды и ньютоновской жидкости в приборах Дарси можно получить два различных значения коэффициента фильтрации и четыре различных значения (в том числе и нулевое) начального градиента напора. Таким образом, с позиций эффекта неустойчивости фильтрационного потока наличие противоположных (как позитивных, так и негативных) выводов о существовании начального градиента напора и его величинах вполне закономерно и объяснимо.

Выведены зависимости, позволяющие рассчитать влияние граничных сопротивлений прибора на поведение графика

$V=f(I)$ и характеризующих его аппроксимационных констант: углового коэффициента и начального отрезка на оси I. Показано, что полученные зависимости находят подтверждение в опытах С. В. Нерпина, Н. Ф. Бондаренко, М. П. Воларовича, С. А. Роза, П. А. Ребиндера, Б. В. Дерягина, Н. В. Чураева, И. П. Амаглобели, В. М. Павилонского и других исследователей. Устанавливаются условия, при которых неустойчивость фильтрационного потока не проявляется или может быть сведена к минимуму. Отмечается актуальность изучения данного явления для совершенствования методологии определения фильтрационных свойств грунтов в приборах Дарси и ставятся задачи дальнейших исследований [87].

С учетом эффекта неустойчивости фильтрационного потока, т. е. в строгой постановке, каждый грунт может обладать двумя истинными значениями коэффициента фильтрации, одно из которых имеет место при граничных условиях R_0 и R_2 на торцах пермеаметра, а другое — при граничных условиях R_1 и $R_{\pm 3}$. На практике в качестве истинного значения коэффициента фильтрации грунта следует брать их средние величины $k_N=(k^*+k)/2$ или $k_a=(k_0^*+k_{\alpha 2})/2$ при фильтрации соответственно ньютоновской или аномальной жидкостей.

13. Натурными и теоретическими исследованиями установлено существование двух новых (квазилинейных) разновидностей регулярного режима неустановившейся напорной и гравитационной фильтрации [53, 57, 61, 67, 75, 82]. Обе разновидности регулярного режима подчиняются обобщенной формуле теории упругого режима и в координатах $S_{rl}=f(\lg t)$ и $S_{rl}=f(\lg r)$ образуют семейства параллельных прямых с угловыми коэффициентами соответственно i^* и $i_D^*=i^*(2-\lambda)$. Для данных разновидностей регулярного режима характерно закономерное изменение вдоль координаты r величин коэффициентов пьезопроводности (уровнепроводности) a и упругой водоотдачи (емкости) пласта μ, рассчитываемых с использованием основной формулы теории упругого режима. Показано [53, 57, 67, 75, 82, 86], что этот закон с высокой степенью точности подтверждается натурными опытами и имеет вид: $a=a(r)=a_r^0 r^{\lambda}$ или $\mu=\mu(r)=\mu_r^0 r^{-\lambda}$, где λ — показатель интенсивности водообмена (перетекания) между возмущенным и смежными пластами. При $\lambda=0$, т. е. при отсутствии или равенстве водообмена между возмущенным и смежными пластами, квазилинейные разновидности регулярного режима переходят в известную (линейную) разновидность этого режима.

14. С целью дальнейшего изучения физики неустановившейся гравитационной фильтрации и совершенствования име-

ющихся гипотез о зависимости гидрогеологических параметров от интенсивности возмущения на системах вертикального дренажа в зоне Полесья были проведены наблюдения за характером распространения и формирования неустановившейся депрессионной поверхности при пуске дренажных скважин в работу с различными дебитами [100, 101]. Анализ этих опытов, а также материалов кустовых откачек, выполненных отечественными и зарубежными исследователями и обработанных ими с помощью основной формулы теории упругого режима, позволил установить, что практически всегда наблюдается *закономерное* расхождение между теоретическими и натурными величинами понижений уровня S_{rt} в различных точках пласта r в различные моменты времени t. Отсюда сделан вывод о необходимости введения поправок на водобалансовое несовершенство теоретических моделей возмущаемых горизонтов (по аналогии с известными поправками В. И. Щурова, В. Н. Щелкачева, И. А. Чарного, Н. Н. Веригина, С. Ф.

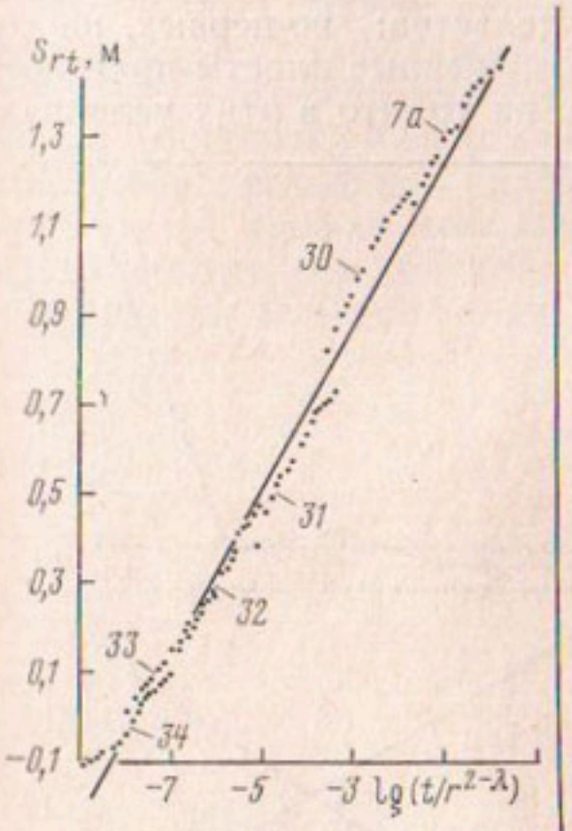


Рис. 7.9. Комбинированное (по автору) прослеживание снижения УГВ в наблюдательных скв. 7а—34 при пуске дренажной скв. 7 в работу с дебитом 60 м³/ч (опыт 45, $\lambda = -1{,}6$)

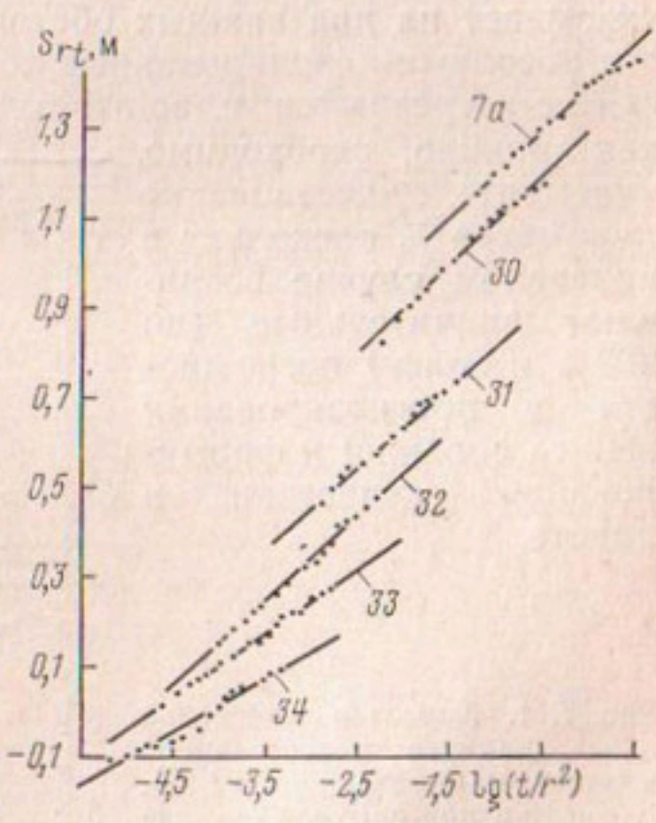


Рис. 7.10. Комбинированное (по С. Е. Джейкобу) прослеживание снижения УГВ в наблюдательных скв. 7а—34 при пуске дренажной скв. 7 в работу с дебитом 60 м³/ч (опыт 45)

Аверьянова, Ф. М. Бочевера и др. на несовершенство теоретических моделей возмущающих скважин и дрен).

Исследования показали [53, 57, 67, 75, 82, 86], что в качестве такой поправки к основной формуле теории упругого режима (формуле Ч. В. Тейса), выведенной для абсолютно изолированного пласта, целесообразно использовать параметр водообмена λ, являющийся обобщенным показателем перетекания и компенсирующий отмеченное расхождение между этой формулой и реальной картиной формирования депрессионной поверхности в возмущенном горизонте. Получены зависимости, позволяющие рассчитывать величину параметра λ по изменению уровня не менее чем в 2 реагирующих скважинах, расположенных в зоне регулярного режима. По известному значению λ рассчитывается затем суммарная величина перетекания.

Было установлено, что в опытах Л. К. Венцеля, М. С. Хантуша, Ф. М. Бочевера, П. Я. Полубариновой-Кочиной, И. К. Гавич, Б. Г. Самсонова, В. М. Шестакова и других исследователей параметр λ имеет ненулевые значения и, таким образом, указывает на два важных обстоятельства: во-первых, на то, что абсолютно изолированные возмущенные пласты практически не встречаются, и, во-вторых, на то, что в этих условиях, как правило, необходимо учитывать существование параметра λ, поскольку в противном случае возникают значительные (до 200% и более) погрешности в прогнозировании дебита скважин и формирования депрессии в пласте.

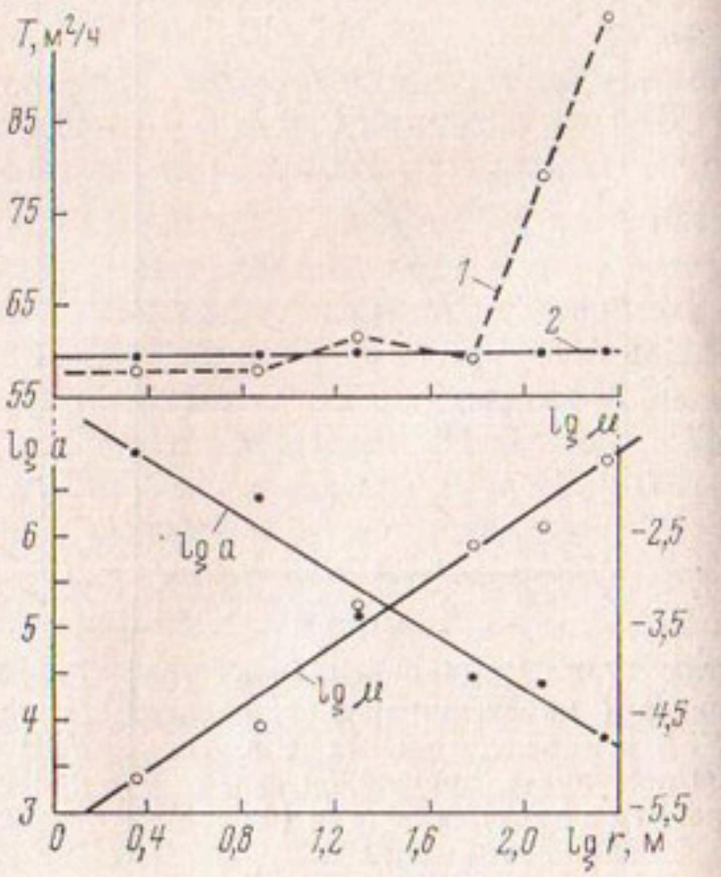


Рис. 7.11. Характер изменения вдоль радиуса депрессионной воронки параметров T (*1, 2*), $\lg a$ и $\lg \mu$ при опытной откачке из дренажной скв. 7, пущенной в работу с дебитом 60 м³/ч (опыт 45, $\lambda = -1{,}6$): *1* — параметр T определен по методу Джейкоба (рис. 7.10); *2* — то же, по методу автора (рис. 7.9)

15. Естественным обобщением существования водобалансовой поправки λ явился новый метод обработки данных опытных кустовых откачек, основанный на использовании преобразования (рис. 7.9)

$$S_{rt} = f\,[\ln (t/r^{2-\lambda})].$$

На полевых материалах отечественных и зарубежных исследований показано [86], что при $\lambda \neq 0$ комбинированные графики, как правило, следует строить в координатах $S_{rt} - \ln (t/r^{2-\lambda})$. Только в этом случае опытные значения S_{rt} укладываются на одну прямую и наблюдается максимальная сходимость расчетных и фактических величин S_{rt} и гидрогеологических параметров. Применение в этих случаях, т. е. при $\lambda \neq 0$, преобразования С. Е. Джейкоба (рис. 7.10, 7.11)

$$S_{rt} = f\,[\ln (t/r^2)]$$

приводит к тому, что опытные значения S_{rt} образуют семейство (лесенку) параллельных и непараллельных прямых и комбинированный график распадается на более простые (исходные) графики временного $S_{rt} = f(\ln t)$ и площадного $S_{rt} = f(\ln r)$ прослеживания снижения уровня, т. е. эти графики не выстраиваются в одну прямую в системе координат С. Е. Джейкоба, поскольку каждой реагирующей скважине соответствует свой график комбинированного прослеживания. Следует отметить, что семейства таких графиков имеют место практически во всех опытах.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица I

Расстояния от наблюдательных скважин до возмущающих скв. 1, 2, 7, 8, 12 на участке вертикального дренажа Полесской опытно-мелиоративной станции (а — номера наблюдательных скважин, б — расстояния от наблюдательных скважин до дренажных в м)

Скв. 1		Скв. 2		Скв. 7		Скв. 8.		Скв. 12	
а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
1а	2,03	2а	2,05	7а	2,25	8а	2,30	12а	2,10
14	4,50	13	5,50	17	5,70	15	5,10	92	12,35
73	8,45	19	7,60	30	7,40	36	8,50	93	24,10
72	20,35	20	19,70	31	19,35	37	20,50	94	64,10
71	39,95	21	40,60	77	40,00	38	60,70	95	144,60
24	96,65	22	102,10	32	59,25	116	101,30	91	176,50
117	100,20	47	135,30	78	101,20	6	128,70	70	252,60
23	178,25	118	140,15	75	119,10	110	140,40	107	255,40
90	179,75	23	182,25	33	119,45	39	154,20	96	284,65
91	180,20	70	252,60	79	177,20	109	180,30	1	356,70
109	180,65	46	255,45	34	219,85	111	240,30	97	445,00
22	258,40	24	263,85	74	250,10	40	254,20	2	504,70
116	259,65	58	307,55	76	278,20	107	255,40	8	507,50
21	319,90	71	320,55	130	291,95	117	260,75	90	536,45
20	340,80	72	340,15	80	301,40	112	357,65	98	565,55
19	352,90	73	352,05	35	338,55	1	360,95	99	645,40
8а	358,65	1а	358,00	127	490,25	1а	362,98	100	684,60
2	360,50	1	360,50	126	503,35	73	369,40	101	698,05
8	360,95	45	375,80	125	515,35	12	507,50	9	716,95
2а	362,55	117	460,70	6	521,05	9	510,75	81	857,65

Таблица II

Результаты опытной кустовой откачки из дренажной скв. 1 при дебите 134 м³/ч (опыт 70). Понижения S_{rt} отсчитаны от отметки 32,30 м

t, ч	lg t	Понижения S_{rt} по скважинам, м						
		1	1а	73	72	71	24	117
0		32,29	32,28	32,29	32,30	32,40	32,31	32,28
1/2	—0,301	6,87	3,07	1,54	0,89	0,36	0,05	0,16
2/3	—0,176	6,94	3,12	1,62	0,94	0,40	0,07	0,18

Продолжение табл. II

t, ч	lg t	Понижения S_{rt} по скважинам, м						
		1	1а	73	72	71	24	117
5/6	—0,079	6,98	3,17	1,64	0,99	0,45	0,08	0,19
1,0	0,0	7,00	3,19	1,66	1,01	0,46	0,09	0,20
1,5	0,176	7,04	3,21	1,68	1,03	0,48	0,11	0,24
2,0	0,301	7,07	3,25	1,71	1,07	0,51	0,14	0,26
2,5	0,398	7,10	3,27	1,73	1,09	0,53	0,16	0,28
3,0	0,477	7,15	3,28	1,75	1,11	0,55	0,18	0,30
4,0	0,602	7,19	3,29	1,76	1,13	0,58	0,21	0,31
5	0,699	7,21	3,31	1,77	1,14	0,59	0,23	0,33
6	0,778	7,22	3,32	1,78	1,15	0,60	0,24	0,35
7	0,845	7,22	3,34	1,81	1,16	0,61	0,26	0,37
8	0,903	7,27	3,35	1,82	1,17	0,63	0,27	0,38
9	0,954	7,28	3,36	1,83	1,18	0,65	0,28	0,41
10	1,0	7,31	3,37	1,84	1,20	0,65	0,29	0,42
12	1,079	7,34	3,40	1,87	1,22	0,67	0,31	0,44
14	1,146	7,36	3,43	1,90	1,24	0,69	0,33	0,46
16	1,204	7,38	3,45	1,92	1,26	0,71	0,34	0,48
18	1,255	7,40	3,48	1,94	1,28	0,71	0,35	0,49
20	1,301	7,42	3,51	1,96	1,30	0,75	0,36	0,50
22	1,342	7,45	3,51	1,97	1,31	0,76	0,37	0,50
24	1,380	7,49	3,55	1,99	1,34	0,76	0,38	0,51
r, м		0,18	2,03	8,45	20,35	39,95	96,65	100,2
i^*, м		0,344	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
T, м²/ч		71,3	107	107	107	107	107	107
lg a, м²/ч		18,4	14,0	8,7	6,5	4,7	3,9	4,5

Таблица III

Результаты опытной кустовой откачки из дренажной скв. 1 при дебите 164 м³/ч (опыт 71). Понижения S_{rt} отсчитаны от отметки 32,20 м

t, ч	lg t	Понижения S_{rt} по скважинам, м					
		1	1а	73	72	71	24
0		32,11	32,13	32,15	32,15	32,24	32,18
1/2	—0,301	8,38	3,70	1,82	1,04	0,45	0,09
2/3	—0,176	8,40	3,74	1,85	1,09	0,49	0,10
5/6	—0,079	8,42	3,75	1,88	1,11	0,52	0,11
1,0	0,000	8,43	3,76	1,88	1,12	0,52	0,12
1,5	0,176	8,48	3,77	1,92	1,15	0,53	0,13
2,0	0,301	8,50	3,80	1,93	1,16	0,54	0,15
2,5	0,398	8,51	3,81	1,94	1,17	0,56	0,17
3	0,477	8,53	3,83	1,95	1,19	0,58	0,19
4	0,602	8,56	3,85	1,96	1,21	0,62	0,21
5	0,699	8,59	3,91	2,03	1,25	0,67	0,25
6	0,778	8,63	3,92	2,04	1,27	0,68	0,27

Продолжение табл. III

t, ч	lg t	Понижения S_{rt} по скважинам, м					
		1	1а	73	72	71	24
7	0,845	8,67	3,93	2,05	1,28	0,69	0,28
8	0,903	8,73	3,95	2,06	1,30	0,69	0,29
9	0,954	8,76	3,95	2,06	1,31	0,70	0,29
10	1,000	8,79	3,96	2,07	1,32	0,70	0,29
12	1,079	8,83	3,98	2,08	1,32	0,71	0,29
14	1,146	8,85	3,98	2,09	1,32	0,71	0,30
16	1,204	8,88	3,97	2,10	1,32	0,71	0,31
18	1,255	8,90	3,97	2,11	1,33	0,71	0,32
20	1,301	8,93	4,00	2,12	1,34	0,72	0,33
22	1,342	8,97	4,02	2,13	1,37	0,73	0,33
24	1,380	9,02	4,04	2,18	1,42	0,73	0,33
r, м		0,18	2,03	8,45	20,35	39,95	96,65
i^*,м		0,395	0,19	0,19	0,19	0,19	0,163
T, м²/ч		76	158	158	158	158	184
lg a, м²/ч		19,43	20,07	11,38	8,09	5,44	4,36
lg μ = lg (T/a)		—17,55	—17,87	—9,18	—5,89	—3,24	—2,10

Таблица IV

Результаты опытной кустовой откачки из дренажной скв. 2 при дебите 109 м³/ч (опыт 75). Понижения S_{rt} отсчитаны от отметки 32,60 м

t, ч	Понижения S_{rt} по скважинам, м					
	2	2а	19	20	21	22
0	32,60	32,62	32,60	32,58	32,59	32,53
1,0	7,56	2,93	2,25	1,37	0,90	0,34
1,5	7,59	2,95	2,28	1,41	0,94	0,36
2,0	7,63	2,98	2,31	1,43	0,96	0,39
2,5	7,66	3,00	2,35	1,45	0,97	0,40
3	7,70	3,03	2,37	1,47	0,99	0,41
4	7,75	3,05	2,40	1,50	1,02	0,42
5	7,79	3,07	2,42	1,51	1,04	0,43
6	7,82	3,08	2,44	1,53	1,06	0,44
7	7,85	3,09	2,45	1,54	1,07	0,45
8	7,88	3,11	2,46	1,55	1,08	0,46
9	7,90	3,12	2,47	1,56	1,09	0,47
10	7,92	3,13	2,48	1,57	1,10	0,48
12	7,93	3,14	2,49	1,58	1,11	0,49
14	7,95	3,15	2,50	1,59	1,12	0,50
16	7,96	3,17	2,51	1,60	1,13	0,50
18	7,98	3,19	2,53	1,61	1,14	0,50
20	8,02	3,20	2,55	1,62	1,15	0,51
22	8,08	3,22	2,57	1,63	1,16	0,52
24	8,08	3,23	2,57	1,65	1,17	0,51
r, м	0,18	2,05	7,60	19,7	40,6	102,1

Таблица V

Результаты опытной кустовой откачки из дренажной скв. 7 при дебите 59 м³/ч (опыт 18). Понижения S_{rt} отсчитаны от отметки 32,40 м; T, a — в м²/ч

t, ч	Понижения S_{rt} по скважинам, м					
	7	7а	30	31	32	33
0	32,42	32,40	32,41	32,41	32,43	32,45
1/2	2,57	1,12	0,83	0,49	0,16	0,03
2/3	2,59	1,14	0,87	0,52	0,18	0,04
5/6	2,61	1,16	0,89	0,54	0,19	0,05
1,0	2,62	1,17	0,90	0,55	0,20	0,06
7/6	2,63	1,19	0,91	0,56	0,21	0,07
4/3	2,64	1,20	0,92	0,57	0,22	0,08
1,5	2,64	1,20	0,93	0,58	0,23	0,08
2,0	2,66	1,23	0,95	0,60	0,25	0,09
2,5	2,67	1,24	0,96	0,61	0,27	0,10
3,0	2,68	1,25	0,97	0,63	0,28	0,11
3,5	2,70	1,26	0,99	0,64	0,30	0,13
4,5	2,72	1,28	1,01	0,66	0,31	0,14
5,5	2,74	1,30	1,03	0,68	0,33	0,16
6,5	2,75	1,32	1,04	0,69	0,34	0,18
7,5	2,77	1,34	1,05	0,70	0,35	0,19
8,5	2,79	1,35	1,06	0,71	0,36	0,20
10,5	2,81	1,36	1,07	0,73	0,37	0,21
11,5	2,81	1,37	1,08	0,73	0,38	0,22
12,5	2,82	1,38	1,09	0,74	0,40	0,22
r, м	0,18	2,25	7,40	19,35	59,25	119,45
i^*, м	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,16
T	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	67,5
lg a	12,70	6,85	6,39	5,29	4,33	4,20
lg μ	—10,92	—5,07	—4,61	—3,51	—2,55	—2,37

Таблица VI

Результаты опытной кустовой откачки из дренажной скв. 7 при дебите 100 м³/ч (опыт 47). Понижения S_{rt} отсчитаны от отметки 32,60 м

t, ч	Понижения S_{rt} по скважинам, м											
	7	7а	30	31	77	32	78	33	79	34	80	35
0	32,59	32,59	32,59	32,58	32,59	32,65	32,63	32,69	32,64	32,77	32,69	32,81
1/2	4,29	1,50	1,08	0,70	0,32	0,21	0,08	0,02	0,01	—0,15	—0,09	—0,21
2/3	4,29	1,53	1,12	0,75	0,35	0,25	0,11	0,05	0,02	—0,14	—0,08	—0,20

Продолжение табл. VI

t, ч	Понижения S_{rt} по скважинам, м											
	7	7а	30	31	77	32	78	33	79	34	80	35
5/6	4,33	1,56	1,14	0,78	0,37	0,27	0,13	0,06	0,03	—0,13	—0,08	—0,20
1,0	4,37	1,57	1,16	0,79	0,39	0,28	0,14	0,07	0,04	—0,12	—0,07	—0,20
1,5	4,41	1,60	1,19	0,84	0,42	0,32	0,18	0,10	0,06	—0,10	—0,07	—0,19
2	4,42	1,63	1,20	0,86	0,45	0,34	0,20	0,12	0,08	—0,09	—0,06	—0,18
3	4,43	1,64	1,23	0,89	0,50	0,37	0,23	0,15	0,10	—0,07	—0,05	—0,17
4	4,46	1,67	1,27	0,92	0,52	0,40	0,25	0,17	0,11	—0,05	—0,05	—0,16
5	4,50	1,69	1,32	0,95	0,54	0,42	0,27	0,19	0,12	—0,04	—0,05	—0,15
6	4,54	1,71	1,34	0,97	0,56	0,43	0,28	0,20	0,13	—0,03	—0,04	—0,14
8	4,57	1,72	1,35	0,99	0,58	0,45	0,31	0,22	0,14	—0,01	—0,04	—0,12
10	4,60	1,74	1,36	1,01	0,60	0,48	0,32	0,24	0,15	0,00	—0,03	—0,11
12	4,61	1,74	1,37	1,03	0,61	0,50	0,33	0,26	0,16	0,00	—0,02	—0,11
16	4,62	1,76	1,39	1,06	0,63	0,53	0,37	0,28	0,18	0,02	0,01	—0,09
20	4,64	1,77	1,41	1,07	0,65	0,55	0,39	0,30	0,20	0,03	0,03	—0,07
24	4,65	1,81	1,47	1,10	0,69	0,57	0,40	0,32	0,22	0,05	0,04	—0,06

Таблица VII

Результаты опытной откачки из дренажной скв. 7 при дебите 110 м³/ч (опыт 20). Понижения S_{rt} отсчитаны от отметки 32,20 м

t, ч	lg t	Понижения S_{rt} по скважинам, м					
		7	7а	30	31	32	33
0		32,20	32,18	32,19	32,20	32,25	32,24
5/6	—0,079	4,78	2,04	1,54	0,97	0,34	0,11
1,0	0	4,82	2,07	1,56	0,99	0,36	0,12
7/6	0,067	4,85	2,07	1,58	1,00	0,37	0,13
4/3	0,125	4,89	2,08	1,59	1,02	0,38	0,14
5/3	0,222	4,92	2,11	1,61	1,05	0,41	0,16
2,0	0,301	4,95	2,12	1,63	1,06	0,42	0,18
2,5	0,398	4,99	2,15	1,64	1,08	0,44	0,19
3	0,477	5,00	2,15	1,65	1,09	0,46	0,20
4	0,602	5,01	2,16	1,67	1,11	0,48	0,22
5	0,699	5,01	2,17	1,69	1,13	0,51	0,23
6	0,778	5,01	2,18	1,71	1,14	0,52	0,24
8	0,903	5,01	2,19	1,73	1,17	0,54	0,26
10	1,000	5,02	2,19	1,74	1,19	0,56	0,28
12	1,079	5,02	2,19	1,75	1,20	0,58	0,30
14	1,146	5,03	2,20	1,78	1,21	0,59	0,31
16	1,204	5,03	2,21	1,79	1,22	0,61	0,32
20	1,301	5,04	2,21	1,79	1,24	0,63	0,34
24	1,380	5,06	2,22	1,81	1,26	0,65	0,35
i^*, м		0,275	0,245	0,245	0,245	0,20	0,18

Таблица VIII

Результаты опытной кустовой откачки из дренажной скв. 7 при дебите 140 м³/ч (опыт 49). Понижения S_{rt} отсчитаны от отметки 32,40 м

t, ч	Понижения S_{rt} по скважинам, м					
	7	7а	30	31	77	32
0	32,41	32,38	32,38	32,38	32,36	32,40
2/3	5,72	2,47	1,80	1,19	0,66	0,44
5/6	5,75	2,50	1,84	1,23	0,71	0,48
1,0	5,79	2,53	1,88	1,25	0,75	0,50
1,5	5,86	2,60	1,98	1,32	0,82	0,54
2,0	5,89	2,63	2,00	1,38	0,86	0,59
3,0	5,96	2,67	2,04	1,40	0,91	0,64
4,0	5,98	2,70	2,06	1,43	0,96	0,66
5,0	6,00	2,73	2,09	1,47	0,99	0,69
6,0	6,02	2,78	2,11	1,48	1,00	0,72
8,0	6,09	2,80	2,16	1,51	1,02	0,77
10,0	6,12	2,81	2,18	1,53	1,04	0,79
12,0	6,15	2,81	2,19	1,54	1,05	0,81
16,0	6,20	2,82	2,21	1,57	1,07	0,86
20,0	6,27	2,83	2,23	1,60	1,09	0,90
24,0	6,31	2,88	2,26	1,63	1,12	0,94
32,0	6,33	2,91	2,31	1,69	1,16	0,97
40,0	6,35	2,91	2,32	1,70	1,19	1,01

t, ч	Понижения S_{rt} по скважинам, м					
	78	33	79	34	80	35
0	32,39	32,39	32,46	32,54	32,48	32,58
2/3	0,23	0,17	0,03	—0,09	—0,07	—0,16
5/6	0,27	0,19	0,06	—0,07	—0,06	—0,15
1,0	0,29	0,21	0,08	—0,06	—0,06	—0,14
1,5	0,36	0,25	0,12	—0,03	—0,04	—0,12
2,0	0,39	0,28	0,15	—0,02	—0,03	—0,11
3,0	0,43	0,32	0,18	0,01	—0,02	—0,09
4,0	0,47	0,35	0,20	0,05	—0,01	—0,07
5,0	0,48	0,36	0,22	0,06	0,00	—0,06
6,0	0,49	0,40	0,23	0,07	0,00	—0,05
8,0	0,52	0,44	0,25	0,09	0,02	—0,04
10,0	0,54	0,46	0,26	0,11	0,03	—0,03
12,0	0,55	0,47	0,27	0,12	0,03	—0,02
16,0	0,58	0,51	0,28	0,15	0,04	—0,01
20,0	0,62	0,55	0,30	0,18	0,05	0,00
24,0	0,65	0,58	0,32	0,19	0,06	0,01
32,0	0,68	0,62	0,34	0,20	0,07	0,03
40,0	0,70	0,66	0,36	0,23	0,07	0,03

Таблица IX

Результаты опытной кустовой откачки из несовершенной артезианской скв. 2ц при неустановившемся движении. Понижения S_{rt} отсчитаны от отметки 54,22 м; мощность пласта m=20 м

Q, м³/сут	t, сут	Понижения S_{rt} по скважинам, м			
		2ц	2б₁	2б₃	2б₄
134,0	1	9,92	0,63	0,35	0,29
	2	11,47	0,67	0,39	0,33
	3	12,22	0,70	0,42	0,36
	4	12,97	0,72	0,44	0,38
	5	13,34	0,73	0,45	0,39
	6	13,86	0,74	0,46	0,40
180,0	1	14,59	1,74	1,34	1,25
	2	16,10	1,81	1,41	1,32
	3	16,97	1,85	1,45	1,36
	4	17,59	1,88	1,48	1,39
	5	18,40	1,90	1,50	1,41
	6	18,62	1,92	1,52	1,43
240,0	1	20,50	2,11	1,54	1,40
	2	22,22	2,19	1,62	1,48
	3	23,32	2,24	1,67	1,52
	4	23,97	2,27	1,70	1,55
	5	24,59	2,30	1,73	1,59
	6	25,00	2,32	1,75	1,61
r, м		0,080	3,00	50,20	102,0
Отметка статического уровня, м		54,22	54,22	54,13	54,10
Длина рабочей части фильтра, м		13,26	7,00	2,80	3,00

Таблица X

Результаты опытной кустовой откачки из несовершенной артезианской скв. 3ц при неустановившемся движении и дебите Q=288 м³/сут. Понижения S_{rt} отсчитаны от отметки 56,14 м; T, a — в м²/сут, λ=—0,43, n=0,82

t, сут	Понижения S_{rt} по скважинам, м			
	3ц	3б₁	3б₃	3б₂
1	18,30	0,64	0,50	0,29
2	18,80	0,67	0,53	0,32
3	19,10	0,69	0,55	0,34
4	19,40	0,70	0,56	0,35
5	19,50	0,71	0,57	0,36
6	19,60	0,72	0,58	0,37
7	19,70	0,72	0,58	0,37
8	19,80	0,73	0,59	0,38

Продолжение табл. X

t, сут	Понижения S_{rt} по скважинам, м			
	3ц	$3б_1$	$3б_3$	$3б_2$
9	19,90	0,73	0,59	0,38
10	20,00	0,74	0,60	0,39
r, м	0,10	4,00	15,00	109,0
l^*, м	1,70	0,10	0,10	0,10
T	31,0	527	527	527
$\lg a$	8,41	7,25	7,01	6,63
$\lg \mu$	—6,92	—4,53	—4,29	—3,91
Отметка статического уровня, м	56,14	56,14	56,14	56,06
Длина рабочей части фильтра, м	18,30	4,10	4,14	3,63
Мощность пласта, м	44,74	44,74	43,40	38,30

Таблица XI

Результаты опытной кустовой откачки из несовершенной артезианской скв. 4ц при неустановившемся движении и дебите Q=720 м³/сут. Понижения S_{rt} отсчитаны от отметки 57,45 м; T, a — в м²/сут. Длина фильтра скважины 24,50 м

t, сут	Понижения S_{rt} по скважинам, м		
	$4б_1$	$4б_3$	$4б_4$
1/8	2,50	0,63	0,32
1/4	2,60	0,67	0,35
3/8	2,65	0,72	0,38
1/2	2,67	0,72	0,37
5/8	2,78	0,75	0,41
3/4	2,76	0,75	0,41
7/8	2,81	0,77	0,43
1	2,82	0,78	0,42
2	2,93	0,84	0.45
3	3,00	0,87	0,47
4	3,05	0,89	0,49

Продолжение табл. XI

t, сут	Понижения S_{rt} по скважинам, м		
	4б$_1$	4б$_2$	4б$_4$
5	3,09	0,91	0,49
6	3,12	0,93	0,50
7	3,14	0,94	0,51
8	3,16	0,95	0,50
9	3,18	0,96	0,51
10	3,20	0,97	0,52
r, м	1,70	119,0	430,0
i^*, м	0,38	0,19	0,10
T	346,7	693,5	1317,6
lg a	7,53	7,91	9,11
Отметка статического уровня, м	57,45	57,38	57,28
Длина фильтра, м	3,25	3,20	4,20
Мощность пласта, м	39,80	35,70	25,35

ЛИТЕРАТУРА

1. **Аверьянов С. Ф.** Горизонты мелиорации. «Сельская жизнь» от 11 ноября 1970 г.

2. **Аветикян Ю. Л.** О влиянии градиента на величину коэффициента фильтрации песчаных грунтов. Сборник научных трудов Ереванского политехнического института, 1967, т. 24, вып. 1.

3. **Алексеев В. С.** Гидравлические сопротивления фильтров и прифильтровых зон скважин и их изменение в процессе эксплуатации. Автореф. канд. дис. М., 1968.

4. **Алексеев В. С., Тесля А. Г.** Об оценке гидравлических сопротивлений сетчатых фильтров. «Гидротехника и мелиорация», 1967, № 5.

5. **Алексеевский В. Е.** Мелиоративно-гидрогеологическое районирование осушаемых территорий юго-западной части Припятского Полесья. Автореф. канд. дис. Киев, 1970.

6. **Алишаев М. Г., Мирзаджанзаде А. Х.** К учету явлений запаздывания в теории фильтрации. «Изв. вузов. Нефть и газ», 1975, № 6.

7. **Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М.** Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М., «Недра», 1972.

8. **Биндеман Н. Н., Язвин Л. С.** Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М., «Недра», 1970.

9. **Богомолов Г. В.** Мелиорации земель — научную основу. «Звезда» от 22 февраля 1968 г.

10. **Богомолов Г. В., Ивицкий А. И.** Осушение болот вертикальным дренажем. «Сельская газета» от 9 апреля 1964 г.

11. **Богомолов Г. В., Козлов М. Ф., Лавров А. П., Белецкий С. С.** Гидрогеология. В кн.: Проблемы Полесья, вып. 1. Минск, «Наука и техника», 1972.

12. **Бондаренко Н. Ф.** Физические основы мелиораций почв. Л., «Колос», 1975.

13. **Боревский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С.** Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М., «Недра», 1973.

14. **Боревский Л. В., Язвин Л. С.** К методике определения гидрогеологических параметров в неоднородных в плане пластах. Труды ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии, вып. 32. М., 1970.

15. **Бочевер Ф. М.** Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М., «Недра», 1968.

16. **Бочевер Ф. М., Алексеев В. С.** Оценка сопротивления водозаборных скважин по опытным и эксплуатационным откачкам. «Разведка и охрана недр», 1965, № 3.

17. **Бочевер Ф. М., Гармонов И. В., Лебедев А. В., Шестаков В. М.** Основы гидрогеологических расчетов. М., «Недра», 1969.

18. **Бочевер Ф. М., Орфаниди К. Ф.** Опыт определения исходных гидрогеологических параметров для оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Труды лаборатории инженерной гидрогеологии, сб. 4. М., Госстройиздат, 1962.

19. **Будыка С. Х., Горбутович Г. Д.** Основные направления научных

исследований по проблемам Полесья. В кн.: Проблемы Полесья, вып. 2. Минск, «Наука и техника», 1973.

20. **Булдей В. Р.** Моделирование гидромелиоративных систем. Киев, «Наукова думка», 1973.

21. **Васильев А. М.** Основы современной методики и техники лабораторных определений физических свойств грунтов. М., Госстройиздат, 1953.

22. **Ведерников В. В.** Теория фильтрации и ее применение в области ирригации и дренажа. М.—Л., Госстройиздат, 1939.

23. **Веригин Н. Н.** О методе расчета водопонижения с помощью несовершенных скважин. Труды совещания по вопросам водопонижения. М., Госстройиздат, 1959.

24. **Веригин Н. Н.** О действии водозаборных скважин при неустановившемся режиме фильтрации. Вопросы фильтрационных расчетов гидротехнических сооружений, сб. 4. М., Госстройиздат, 1964.

25. **Веригин Н. Н., Васильев С. В., Саркисян В. С., Шержуков Б. С.** Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород. М., «Недра», 1977.

26. **Временные** рекомендации по применению вертикального дренажа в Припятском Полесье (составители: Г. И. Пастухов, П. Н. Костюкович, Ю. А. Чирва, Г. А. Халметов). Киев, УкрНИИГиМ, 1978.

27. **Гавич И. К.** Определение параметров анизотропного пласта по данным опытных работ и моделирования в условиях неустановившегося движения. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 48. Л., «Энергия», 1970.

28. **Голубева О. В.** Курс механики сплошных сред. М., «Высшая школа», 1972.

29. **Грикевич Э. А.** К расчету гидрогеологических параметров пласта по наблюдательным скважинам. «Изв. АН ЛатвССР. Геология», 1966, № 7 (228).

30. **Грикевич Э. А.** Влияние гидравлических сопротивлений скважины на приток воды. Рига, «Зинатне», 1969.

31. **Гусейнзаде М. А., Колосовская А. К.** Упругий режим в однопластовых и многопластовых системах. М., «Недра», 1972.

32. **Демин Н. В., Кисляков Ю. П., Морозова В. Т.** О зависимости проницаемости пористой среды от градиента давления. «Нефтяное хозяйство», 1966, № 12.

33. **Дружинин Н. И.** Метод ЭГДА и его применение при исследовании фильтрации. М.—Л., Госэнергоиздат, 1956.

34. **Ентов В. М.** Двумерные и нестационарные одномерные задачи движения неньютоновских жидкостей в пористой среде. «Нефтяное хозяйство», 1968, № 10.

35. **Ермоленко В. В.** Какой дренаж нужен в Полесье? «Гидротехника и мелиорация», 1973, № 10.

36. **Желтов Ю. П.** Механика нефтегазоносного пласта. М., «Недра», 1975.

37. **Желобаев А. А.** Гидрогеологические условия юго-восточной части Брестской впадины и методика гидрогеологического обоснования технических проектов мелиораций. Автореф. канд. дис. Минск, 1971.

38. **Жернов И. Е., Шестаков В. М.** Моделирование фильтрации подземных вод. М., «Недра», 1971.

39. **Жилинский И. И.** Краткое обозрение Полесья и его канализации. Спб, 1892.

40. **Закржевский П. И.** Оценка регулирующей способности водозаборов грунтового стока, устраиваемых на мелиоративных системах. В кн.: Мелиорация переувлажненных земель, вып. 23. Минск, «Ураджай», 1975.

41. **Зотов Г. А., Тверковкин С. М.** Газогидродинамические методы исследований газовых скважин. М., «Недра», 1970.

42. **Ивицкий А. И.** О принципах и способах осушительной мелиорации. «Изв. АН БССР. Сер. с.-х. наук», 1966, № 1.

43. **Ивицкий А. И.** Вторая функция дренажа. «Звязда» от 13 апреля 1973 г.

44. **Ивицкий А. И.** Глубина каналов, способы и новые схемы осушения мелкозалежных болот Полесья. «НТИ: Мелиорация и водное хозяйство», № 1. Минск, 1974.

45. **Каменецкий С. Г., Кузьмин В. М., Степанов В. П.** Нефтепромысловые исследования пластов. М., «Недра», 1974.

46. **Каменский Г. Н.** Основы динамики подземных вод. М., Госгеолиздат, 1943.

47. **Карловский В. Ф., Костюкович П. Н.** О применении вертикального дренажа. «Сельское хозяйство Белоруссии», 1971, № 7.

48. **Киселев П. А.** Изучение баланса подземных вод в слоистых толщах по режимным данным. М., «Недра», 1975.

49. **Кисляков Ю. П., Демин Н. В., Русских В. Н.** Влияние градиентов давления на величины параметров пласта на Туймазинском месторождении. «Нефтяное хозяйство», 1964, № 2.

50. **Климентов П. П., Кононов В. М.** Динамика подземных вод. М., «Высшая школа», 1973.

51. **Козлов М. Ф.** Гидрогеология Припятского Полесья, т. 2. Минск, «Наука и техника», 1977.

52. **Коробов К. Я., Антипин Ю. В.** О нарушении линейного закона фильтрации при низких градиентах давления. «Нефтяное хозяйство», 1968, № 8.

53. **Костюкович П. Н.** Гидрогеологические расчеты дрен и параметров водоносных горизонтов. Автореф. канд. дис. Л., 1965.

54. **Костюкович П. Н.** Сравнительная оценка формул определения промежутка высачивания. Записки Ленинградского горного института, 1965, т. 48, вып. 2.

55. **Костюкович П. Н.** Определение величины промежутка высачивания у стенок горных выработок. «Изв. вузов. Горный журнал», 1965, № 9.

56. **Костюкович П. Н.** О коэффициенте пьезопроводности. «Изв. вузов. Геология и разведка», 1965, № 10.

57. **Костюкович П. Н.** Об исходных предпосылках при определении промежутка высачивания и параметров пластов. «Изв. вузов. Геология и разведка», 1966, № 3.

58. **Костюкович П. Н.** О движении грунтовых вод к дренам. «ДАН БССР», 1966, **10**, № 8.

59. **Костюкович П. Н.** Экспериментальные исследования безнапорной фильтрации. В кн.: Использование и охрана водных ресурсов Белоруссии, ч. 2. Минск, 1966.

60. **Костюкович П. Н.** К определению коэффициента фильтрации опытными откачками. «Инженерно-физический журнал», 1967, **12**, № 5.

61. **Костюкович П. Н.** О параметрах неустановившейся фильтрации. В кн.: Использование и охрана водных ресурсов Белоруссии. Минск, «Наука и техника», 1967.

62. **Костюкович П. Н.** К определению коэффициента уровнепроводности опытными откачками. «ДАН БССР», 1967, **11**, № 12.

63. **Костюкович П. Н.** Исследование параметров пластов в натурных условиях. В кн.: Комплексное использование и охрана водных ресурсов. Минск, «Наука и техника», 1968.

64. **Костюкович П. Н.** Вопросы расчета и моделирования реальных

фильтрационных полей. В кн.: Вопросы водохозяйственного строительства. Минск, 1968.

65. **Костюкович П. Н., Василевский А. С.** Об изменении дебита скважин при включении насосов в работу. В кн.: Вопросы водохозяйственного строительства. Минск, 1968.

66. **Костюкович П. Н.** К исследованию неустановившейся депрессионной поверхности при работе вертикального дренажа. В кн.: Гидротехника, мелиорация и использование осушенных земель. Минск, 1968.

67. **Костюкович П. Н.** Исследование неустановившейся фильтрации в неограниченном пласте. В кн.: Использование водных ресурсов. Минск, «Наука и техника», 1969.

68. **Костюкович П. Н.** Вопросы гидрогеологической типизации водоносных горизонтов. В кн.: Использование водных ресурсов. Минск, «Наука и техника», 1969.

69. **Костюкович П. Н.** Оценка точности расчета поверхности депрессии при осушении вертикальным дренажем. В кн.: Исследования по мелиорации болот и минеральных почв. Труды БСХА, т. 59. Горки, 1969.

70. **Костюкович П. Н.** К определению коэффициента пьезопроводности опытными откачками. Материалы 3-й научной конференции молодых геологов Белоруссии. Минск, 1969.

71. **Костюкович П. Н.** Оценка сопротивления водопонижающих скважин по опытным откачкам. Материалы 3-й научной конференции молодых геологов Белоруссии. Минск, 1969.

72. **Костюкович П. Н.** Некоторые особенности расчета параметров пластов по данным гидрогеологических работ. Материалы междуведомственного совещания по мелиоративной гидрогеологии и инженерной геологии, вып. 2. Минск, 1969.

73. **Костюкович П. Н.** К определению обобщенного сопротивления водопонижающих скважин. В кн.: Вопросы водохозяйственного строительства. Минск, 1969.

74. **Костюкович П. Н.** Учет сопротивляемости фильтров при моделировании вертикального дренажа на интеграторах ЭГДА. В кн.: Гидротехника и мелиорация торфяных почв, ч. 2. Минск, 1969.

75. **Костюкович П. Н.** Некоторые обобщения основной формулы теории упругого режима. В кн.: Мелиорация и гидротехника. Труды БСХА, т. 81. Горки, 1971.

76. **Костюкович П. Н.** К расчету уровня подземных вод при работе вертикального дренажа. В кн.: Водное хозяйство Белоруссии, вып. 1. Минск, «Вышэйшая школа», 1971.

77. **Костюкович П. Н.** О влиянии несовершенства возмущающей скважины на точность определения коэффициента фильтрации. «ДАН БССР», 1971, 15, № 12.

78. **Костюкович П. Н.** К исследованию несовершенства возмущающей скважины в натурных условиях. В кн.: Мелиорация переувлажненных земель. Труды БелНИИМиВХ, т. 20. Минск, «Ураджай», 1972.

79. **Костюкович П. Н.** Дренаж комбинированный, управляемый. «Сельское хозяйство Белоруссии», 1973, № 1.

80. **Костюкович П. Н.** О геометрическом смысле приведенного радиуса возмущающей скважины. В кн.: Проектирование и расчет сооружений водохозяйственных систем. Труды БСХА, т. 101. Горки, 1973.

81. **Костюкович П. Н.** Учет несовершенства возмущающих скважин при моделировании вертикального дренажа в условиях неустановившейся фильтрации. В кн.: Мелиорация переувлажненных земель. Минск, 1974.

82. **Костюкович П. Н.** Натурные исследования неустановившейся

фильтрации к скважинам. В кн.: Водное хозяйство Белоруссии, вып. 4. Минск, «Вышэйшая школа», 1974.

83. **Костюкович П. Н., Станкевич Р. А.** Исследование несовершенства возмущающей скважины при неустановившейся фильтрации. «ДАН БССР», 1974, 18, № 9.

84. **Костюкович П. Н.** К вопросу о гидрогеологическом обосновании вертикального дренажа в зоне Белорусского Полесья. Материалы методического семинара по гидрогеологическим исследованиям на осушаемых землях. Пинск, 1975.

85. **Костюкович П. Н.** К оценке водопроницаемости подстилающих песков Белорусского Полесья. Материалы методического семинара «Оценка и прогноз мелиоративной обстановки на осушаемых землях и задачи мелиоративно-гидрогеологической службы». Пинск, 1976.

86. **Костюкович П. Н.** Графо-аналитический метод определения гидрогеологических параметров по данным опытных откачек. Материалы методического семинара «Оценка и прогноз мелиоративной обстановки на осушаемых землях и задачи мелиоративно-гидрогеологической службы». Пинск, 1976; **Костюкович П. Н.** Натурные исследования неустановившейся гравитационной фильтрации к скважинам. В кн.: Краевые задачи теории фильтрации. Тезисы докладов Всесоюзного совещания-семинара, ч. 2. Ровно, 1979.

87. **Костюкович П. Н.** К определению начального градиента напора и водопроницаемости грунтов в приборах Дарси. В кн.: Конструкции и расчеты осушительно-увлажнительных систем, вып. 3. Минск, 1978; **Костюкович П. Н.** К исследованию граничных условий и проницаемости водоносных пластов лабораторными методами. В кн.: Мелиорация земель Полесья и охрана окружающей среды. Киев, 1978; **Костюкович П. Н.** О неустойчивости движения ньютоновских и аномальных жидкостей в приборах Дарси. В кн.: Краевые задачи теории фильтрации. Тезисы докладов Всесоюзного совещания-семинара, ч. 2. Ровно, 1979.

88. **Костюкович П. Н.** Исследование промежутка высачивания и несовершенства дренажных скважин. В кн.: Мелиорация переувлажненных земель. Труды БелНИИМиВХ, т. 27. Минск, «Ураджай», 1979.

89. **Кусакин И. П.** Искусственное понижение уровня грунтовых вод. М.—Л., ОНТИ, 1935.

90. **Лыч Г. М., Мышко Р. А.** Экономическое обоснование двустороннего регулирования водного режима мелиорируемых почв Белорусской ССР. В кн.: Проблемы мелиорации. Минск, 1974.

91. **Маккавеев А. А.** Руководство по гидрогеологическим и инженерно-геологическим исследованиям в связи с осушением болот. М., «Недра», 1967.

92. **Марков Е. С.** Динамика водоотдачи при неустановившемся движении грунтовых вод. Доклады ВАСХНИЛ, 1947. № 4.

93. **Марков Е. С.** Мелиорация пойм Нечерноземной зоны. М., «Колос», 1973.

94. **Маслов Б. С.** О районировании норм осушения. В кн.: Режим осушения и методика полевых научных исследований. М., «Колос», 1971.

95. **Методика** гидрогеологических исследований при инженерно-геологических изысканиях. М., ПНИИИС, 1970.

96. **Методические** указания по гидрогеологической съемке на закрытых территориях в масштабах 1 : 500 000, 1 : 200 000 и 1 : 50 000. М., «Недра», 1968.

97. **Методы** определения теплопроводности и температуропроводности. Под ред. А. В. Лыкова. М., «Энергия», 1973.

98. **Методы** фильтрационных расчетов гидромелиоративных систем. Под ред. Н. Н. Веригина. М., «Колос», 1970.

99. **Мироненко В. А., Шестаков В. М.** Основы гидрогеомеханики. М., «Недра», 1974.

100. **Мурашко А. И., Костюкович П. Н., Шпаков А. Т.** Осушительно-увлажнительные системы на базе вертикального дренажа в Белорусском Полесье. «Гидротехника и мелиорация», 1975, № 1.

101. **Мурашко А. И., Костюкович П. Н., Шпаков А. Т.** Регулирование водного режима осушаемых площадей вертикальным дренажем и орошение подземными водами. В кн.: Проблемы Полесья. вып. 4. Минск, «Наука и техника», 1975.

102. **Нерпин С. В., Чудновский А. Ф.** Физика почвы. М., «Наука», 1967.

103. **Николаевский В. Н., Басниев К. С., Горбунов А. Т., Зотов Г. А.** Механика насыщенных пористых сред. М., «Недра», 1970.

104. **Олейник А. Я.** Фильтрационные расчеты вертикального дренажа. Киев, «Наукова думка», 1978.

105. **Олейник А. Я.** Теория и методы фильтрационного расчета несовершенных дренажей и водозаборов в различных гидрогеологических условиях. Автореф. докт. дис. Киев, 1970.

106. **Павлючук В. И.** Пути совершенствования мелиорации в Белоруссии. В кн.: «Проблемы мелиорации». Минск, 1974.

107. **Плотников Н. И.** Поиски и разведка пресных подземных вод для целей крупного водоснабжения. М., Изд-во МГУ, 1968.

108. **Поиски** и разведка подземных вод для крупного водоснабжения (методическое пособие). М., «Недра». 1969.

109. **Полубаринова-Кочина П. Я.** Теория движения грунтовых вод. М., «Наука», 1977.

110. **Полубаринова-Кочина П. Я., Пряжинская В. Г., Эмих В. Н.** Математические методы в вопросах орошения. М., «Наука», 1969.

111. **Пыхачев Г. Б., Исаев Р. Г.** Подземная гидравлика. М., «Недра», 1973.

112. **Развитие** исследований по теории фильтрации в СССР (1917—1967). М., «Наука», 1969.

113. **Рекомендации** по обработке результатов опытных работ на основе уравнений неустановившегося движения. М., 1969.

114. **Самсонов Б. Г., Бурдакова О. Л., Кривошеева Л. И.** Сравнительная оценка способов определения расчетных гидрогеологических параметров. «Разведка и охрана недр», 1970, № 9.

115. **Самсонов Б. Г., Грабовников В. А., Самсонова Л. М.** Зарубежный опыт определения основных расчетных параметров по данным кустовых откачек. Обзор. Серия: Гидрогеология и инженерная геология. ВИЭМС, М., 1972.

116. **Силин-Бекчурин А. И.** Динамика подземных вод. М., МГУ, 1965.

117. **Скоропанов С. Г.** Выводы, вытекающие из практики мелиорации земель в Белоруссии. В кн.: Проблемы мелиорации. Минск, 1974.

118. **Справочное** руководство гидрогеолога, т. 1, 2. Под ред. В. М. Максимова. Л., «Недра», 1967.

119. **Стрельцова Т. Д., Шестаков В. М.** Определение гидрогеологических параметров безнапорных пластов по данным опытных откачек из совершенных скважин. В кн.: Вопросы определения гидрогеологических параметров и расчета эксплуатационных запасов подземных вод, вып. 1. М., 1967.

120. **Техника** проведения и методика обработки опытно-фильтрационных работ (методические рекомендации). М., ВСЕГИНГЕО, 1969.

121. **Толстихин Н. И., Кирюхин В. А.** Введение в региональную гидрогеологию (учебное пособие). Л., 1978.

122. **Усенко В. С.** К вопросу о возможности применения вертикального дренажа для осушения болот в Белорусской ССР. Бюллетень научно-технической информации. Минск, БелНИИМиВХ, 1961.

123. **Флорин В. А.** Уплотнение земляной среды и фильтрация при переменной пористости с учетом влияния связанной воды. «Изв. АН СССР, ОТН», 1951, № 11.

124. **Хейн А. Л.** Приближенная теория установившегося притока жидкости и газа к несовершенным скважинам с меридионально-симметричной конструкцией забоя. В кн.: Вопросы гидродинамики и термодинамики пласта. Труды ВНИИ, вып. 8. Л., Гостоптехиздат, 1956.

125. **Чарный И. А.** Подземная гидрогазодинамика. М., Гостоптехиздат, 1963.

126. **Чернов Б. С., Базлов М. Н., Жуков А. И.** Гидродинамические методы исследования скважин и пластов. М., Гостоптехиздат, 1960.

127. **Шебеко В. Ф.** Гидрологический режим осушаемых территорий. Минск, «Урожай», 1970.

128. **Шестаков В. М.** Динамика подземных вод. М., МГУ, 1973.

129. **Шестаков В. М., Стрельцова Т. Д.** Формирование безнапорного фильтрационного потока при откачке из совершенной скважины. Материалы 3-го семинара по применению геофизических и математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. Моделирование и математические методы. М., 1970.

130. **Щелкачев В. Н.** Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. М., Гостоптехиздат, 1959.

131. **Щелкачев В. Н., Назаров С. Н.** Учет влияния гидродинамического несовершенства скважин в условиях упругого режима. «Нефтяное хозяйство», 1954, № 5.

132. **Янголь А. М.** Увлажнение осушаемых земель Украинского Полесья. В кн.: Проблемы мелиорации Полесья, ч. 1. Минск, 1970.

133. **Янголь А. М.** Нормы осушения в зависимости от заданной влажности почвы и климатических факторов. В кн.: Режим осушения и методика полевых научных исследований. М., «Колос», 1971.

134. **Boulton N. S.** Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage. «Proceedings of the British Institute of Civil Engineers», 1963, vol. 26, N 11.

135. **Hantush M. S.** Analysis of data from pumping wells near a river. «J. of Geophysical Research», 1959, vol. 64, N 11.

136. **Hantush M. S.** Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. «Transactions American Geophysical Union», 1956, vol. 37, N 6.

137. **Neuman Shlomo P.** Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed responce of the water table. «Water Resources Research», 1972, vol. 8, N 4.

138. **Watt A. K.** An assessment of the non-equilibrium equations in various aquifers. «Proceedings of Hydrology Symposium Held at the University of Alberta, Calgary on 8—9 November, 1962, N 3, Ground Water». Ottawa, 1963.

139. **Wenzel L. K.** Methods for determining permeability of water-bearing materials, with special reference to discharging-well methods. U. S. Geological Survey Water—Supply Paper 887. Washington, 1942.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Активная зона дренирования (фильтрации) 29, 41, 135, 246

Влажность почвы 10, 12, 250
Водное питание пласта (массива) 27, 40, 108
Водообмен (перетекание) между пластами 29, 135, 246
Водоотдача 40, 106, 208
Водопроводимость (проводимость) пласта 27, 93, 151
Время релаксации фильтрационного потока 146

Гидрогеологические параметры 24, 57, 135
— прогнозные карты 248
Граничные сопротивления 114, 122, 126
— — дестабилизирующие 112
— условия пластов 30, 108, 154
Графики временного прослеживания 26, 130, 209
— комбинированного прослеживания 26, 150, 186, 195
— площадного прослеживания 26, 130, 150

Депрессионная воронка 206, 227

Закон Дарси (Darcy) 106, 114, 145
— — обобщенный 120

Капиллярная кайма (зона) 10, 40
Каналы тупиковые (бесточные) 241
Квазистационарный (регулярный) режим 147, 150, 204
Колодец водосборный 254
Коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности) 93, 133
— фильтрации 32, 58, 115, 130
— эффективности скважины 54, 61

Метод гидрогеологических аналогий 248
— Джейкоба (Jacob) 150, 190, 195
— Дружинина 86, 105
— Мятиева—Гиринского 246
Модуль дренажного стока 233

Начальный градиент напора 106, 119, 122
Несовершенство скважины 42, 88
Неустойчивость гидрогеологических параметров 108, 127
— фильтрационного потока 106
Норма орошения 13, 233
— осушения 10, 227

Откачки опытные 24, 50, 130

Питание грунтово-напорное 248
Приведенный (расчетный или эффективный) радиус скважины 42, 62
Промежуток высачивания (нависания) 44, 79

Радиус влияния 72, 84, 137, 170
Разрыв (скачок) уровней на стенке артезианской скважины 42, 56
Регулирование водного режима 8, 24
Режим водного питания 30, 231
— грунтовых вод 29

Сеть осушительная 9, 35
— проводящая 35, 241
Системы осушительно-увлажнительные 15, 19, 238
Скважины бесфильтровые 249
Скин-эффект 42, 71
Скорость восстановления уровня 26, 209
— снижения уровня 26, 159
Сопротивления скважины 43, 59
— фильтрационные 42, 45
Стабилизация фильтрационного потока 212
Сток дренажный 9

Теория Боултона (Boulton) 107
— Буссинеска (Boussinesg) 107
— Козени (Kozeny) 145, 222

Увлажнение дополнительное 9, 19
— избыточное 16, 223

Фильтры лучевые 226
Формула Дюпюи (Dupuit) 48, 216
— Тейса (Theis) 93
— Флорина 119
— Чарного 70
Функция интегральная показательная 93

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора 3
Предисловие 4
Введение 7

Глава 1

ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ 17

§ 1.1. Краткая история мелиоративных исследований 18
§ 1.2. Гидрогеологические условия 24
§ 1.3. Актуальные задачи мелиоративной гидрогеологии . . . 40

Глава 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСОВЕРШЕНСТВА СКВАЖИН ПРИ РАБОТЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ 42

§ 2.1. Современные представления о несовершенстве дренажных скважин 42
§ 2.2. Исходные предпосылки для изучения обобщенных фильтрационных сопротивлений дренажных скважин 45
§ 2.3. Обнаружение пьезометрического скачка уровней у стенки артезианской скважины. Основные свойства этого явления . . 52
§ 2.4. Влияние несовершенства возмущающей скважины на точность определения гидрогеологических параметров 57
§ 2.5. Исследование несовершенства артезианских скважин. Геометрический смысл приведенного радиуса 62
§ 2.6. Исследование промежутка высачивания и несовершенства грунтовых скважин 77
§ 2.7. Учет несовершенства скважин при моделировании вертикального дренажа на интеграторах ЭГДА 85

Глава 3

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСОВЕРШЕНСТВА СКВАЖИН ПРИ РАБОТЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА В НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ 88

§ 3.1. Состояние вопроса 88
§ 3.2. Теоретические и экспериментальные исследования неустановившегося несовершенства скважин 92

§ 3.3. Влияние несовершенства возмущающей скважины на точность определения коэффициента пьезопроводности и проводимости 100

§ 3.4. Учет несовершенства скважин при моделировании вертикального дренажа в условиях неустановившейся фильтрации . 104

Глава 4

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА ПРИ РАБОТЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ 106

§ 4.1. Зависимость гидрогеологических параметров от интенсивности возмущения пласта 108

§ 4.2. Исследование неустойчивости движения ньютоновских и аномальных жидкостей в приборах Дарси 112

§ 4.3. Натурные исследования неустойчивости гидрогеологических параметров подстилающих песков Полесья 127

Глава 5

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА 136

§ 5.1. Современные модели неустановившейся гравитационной фильтрации 136

§ 5.2. Основные методы обратных задач динамики подземных вод . 148

§ 5.3. Некоторые обобщения основной формулы неустановившейся фильтрации к скважинам 154

§ 5.4. Натурные исследования неустановившейся фильтрации к скважинам 182

§ 5.5. Новый метод определения гидрогеологических параметров по данным опытных откачек 195

Глава 6

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА 204

§ 6.1. Особенности поведения гидрогеологических параметров в удаленных областях возмущения 204

§ 6.2. Определение гидрогеологических параметров по данным восстановления УГВ после остановок дренажных скважин . . 209

§ 6.3. К определению времени стабилизации фильтрационного потока при работе дренажных скважин в режиме осушения . . 212

§ 6.4. Экспериментальные исследования установившейся безнапорной фильтрации к дренам 216

Глава 7

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА В ЗОНЕ ПОЛЕСЬЯ 223

§ 7.1. Краткая характеристика опытно-производственного участка вертикального дренажа 224

§ 7.2. Осушительное действие групповых откачек 226

§ 7.3. Общая характеристика систем вертикального дренажа . . 231

§ 7.4. Районирование Припятского Полесья по условиям применения вертикального дренажа 234

§ 7.5. Рекомендуемые схемы осушительно-увлажнительных систем на базе вертикального дренажа и орошения грунтовыми водами 238

§ 7.6. Новая осушительно-увлажнительная система периодического действия 241

§ 7.7. Гидрогеологические изыскания 245

§ 7.8. Основные показатели осушительно-увлажнительных систем на базе вертикального дренажа 250

§ 7.9. Основные выводы 252

Приложения 268

Литература 277

Предметный указатель 284

Петр Николаевич Костюкович

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

Редактор С. М. Михасева
Обложка Л. И. Соколова
Художественный редактор В. Ф. Гринкевич
Технический редактор И. П. Тихонова
Корректор З. Я. Авербах

ИБ № 676

Печатается по постановлению РИСО АН БССР. Сдано в набор 21.05.79. Подписано в печать 22.10.79. АТ 11294. Формат 60×90 1/16. Бум. тип. № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Печ. л. 18,0. Уч.-изд. л. 16,7. Тираж 1650 экз. Зак. № 1126. Цена 2 р.

Издательство «Наука и техника». Минск, Ленинский проспект, 68. Типография им. Франциска (Георгия) Скорины издательства «Наука и техника» АН БССР и Государственного комитета БССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Минск, Ленинский проспект, 68.