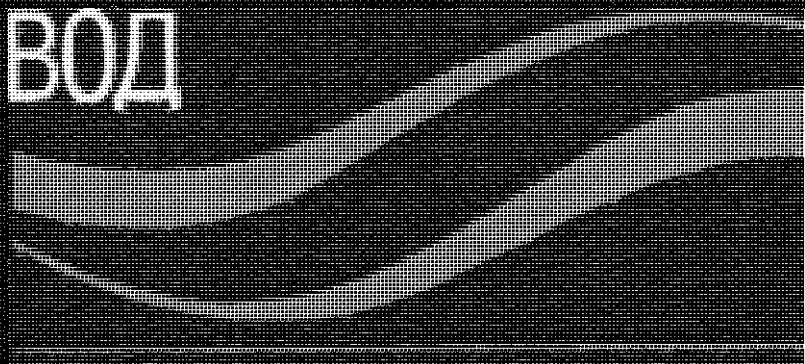


Ю. А. Норватов

ИЗУЧЕНИЕ
И ПРОГНОЗ
ТЕХНОГЕННОГО
РЕЖИМА
ПОДЗЕМНЫХ
ВОД



НЕДРА

Ю. А. Норватов

ИЗУЧЕНИЕ
И ПРОГНОЗ
ТЕХНОГЕННОГО
РЕЖИМА
ПОДЗЕМНЫХ ВОД
(при освоении
месторождений
полезных ископаемых)



ЛЕНИНГРАД «НЕДРА» ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ 1988

ББК 26.326

Н 82

УДК 556.532 : 622.5

Рецензент д-р геол.-минерал. наук, проф. В. А. Мироненко (ЛГИ)

Норватов Ю. А.

Н 82 Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод (при освоении месторождений полезных ископаемых). — Л.: Недра, 1988. — 261 с.: ил.

ISBN 5-247-00106-0

Показаны закономерности техногенного режима подземных вод, связанные с изменением условий дренирования и питания водоносных горизонтов при разработке месторождений твердых полезных ископаемых. Рассмотрена методика изучения условий формирования техногенного режима на стадии разведки и методы оценки гидрогеологических процессов при эксплуатации месторождений.

Для гидрогеологов, инженеров-геологов, горных инженеров, проектировщиков, занимающихся гидрогеологическим обоснованием освоения месторождений.

Н 1904080000—305 137—88
043(01)—88

ББК 26.326

ISBN 5-247-00106-0

© Издательство «Недра», 1988

ПРЕДИСЛОВИЕ

Техногенный режим подземных вод — это природное явление, развивающееся под влиянием инженерной деятельности человека. В отличие от естественного режима подземных вод техногенный режим формируется под мощным воздействием факторов, являющихся следствием технических мероприятий, которые существенно изменяют условия дренирования водоносных комплексов. Реакция водоносных систем на появление техногенных источников их возмущения зависит от совокупности разнообразных природных факторов (геологических, гидрогеологических, метеорологических). Предполагается, что эта реакция прослеживается в региональном масштабе, поэтому необходимо учитывать особенности и сезонную изменчивость питания водоносных комплексов по площади их развития, фильтрационную неоднородность этих комплексов в плане и в разрезе, их естественные ресурсы. Региональность техногенного режима подземных вод предопределяет целесообразность совместного рассмотрения вопросов изучения и прогноза этого сложного природного явления. Специфические трудности таких исследований связаны с их эвристическим характером, который обусловлен особой динамичностью и необратимостью во времени изучаемых и прогнозируемых процессов геофильтрации.

Данная работа отражает особенности изучения и прогноза техногенного гидродинамического режима подземных вод, формирующегося при строительстве и эксплуатации горнодобывающих предприятий. Основным содержанием работы являются методологические аспекты гидрогеологических исследований, которые доминируют над описательными моментами. Представленный в книге фактический материал служит главным образом иллюстрацией к обсуждаемым методическим приемам. Особое внимание в работе уделено гидрогеологическому анализу источников возмущения водоносных комплексов, оценке условий формирования водопритоков в горные выработки. Работу не стоит рассматривать как некое справочное руководство по изучению и прогнозу техногенного режима подземных вод; эта серьезная проблема требует дополнительных проработок, без которых преждевременно предлагать унифицированные рекомендации.

При обобщении опыта гидрогеологических исследований на месторождениях твердых полезных ископаемых особое внимание сосредоточено на совместном рассмотрении геомеханических

и гидродинамических процессов, развивающихся взаимосвязанно при эксплуатации шахт и карьеров. Практические примеры показывают, что зачастую только комплексный гидрогеомеханический подход к изучению условий формирования техногенного режима подземных вод на шахтных и карьерных полях обеспечивает плодотворность его изучения и достоверность прогнозных оценок.

Определенные усилия направлены на освещение особенностей методики интерпретации результатов режимных гидрогеологических наблюдений, проводящихся на шахтных и карьерных полях. Необходимость совершенствования и детализации этой методики определяется повышенной информативностью целенаправленных гидрогеологических наблюдений, которая обеспечивает эффективную схематизацию реальных условий и оценку достоверных фильтрационных параметров. В этой связи особое внимание должно уделяться обоснованию требований к режимным гидрогеологическим наблюдениям и совершенствованию методики гидрогеологической схематизации. Эти вопросы находят отражение в работе с учетом специфики горного производства.

В качестве стержневой идеи в методологической ориентации книги выступает положение о том, что эффективным методом гидрогеологических исследований является математическое моделирование фильтрационных процессов, призванное реализовать единый подход к изучению и прогнозу сложного техногенного режима подземных вод. Личный опыт автора в области математического моделирования ограничен применением электрических моделей в решении разнообразных научно-технических задач горного дела, что нашло отражение в книге.

Ряд проблемных прикладных вопросов, связанных с охраной подземных вод от загрязнения, с гидрохимическими и термодинамическими аспектами техногенного режима подземных вод, в данной работе отражен схематично, поскольку эти вопросы детально рассматривались в недавно опубликованных работах.

Между тем отсутствие книги, обобщающей опыт изучения и прогноза техногенного режима подземных вод на месторождениях с разнообразными гидрогеологическими условиями с учетом методических особенностей специальных гидрогеологических исследований, направленных на уточнение представлений об условиях формирования техногенного режима геофильтрации, явилось отправным пунктом при подготовке работы к публикации.

Автор с вниманием и благодарностью воспримет все замечания и пожелания, рассматривая их как стимул для дальнейших исследований.

Выполненную работу автор считает итогом коллективных исследований лаборатории гидрогеологии ВНИМИ. Участие некоторых сотрудников лаборатории в подготовке книги отражено в соответствующих ее разделах.

1. ТЕХНОГЕННЫЙ РЕЖИМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНАХ

1.1. Изменения естественного режима подземных вод при строительстве и эксплуатации горнодобывающих предприятий

Строительство и эксплуатация горнодобывающих предприятий приводят к существенным изменениям природных условий, в частности к нарушению естественного режима подземных вод, которое нередко проявляется в региональном масштабе. Нарушение естественного режима подземных вод вызывается прежде всего резкой сменой условий разгрузки водоносных горизонтов при их вскрытии горными выработками или при проведении дренажных мероприятий в пределах карьерных и шахтных полей. Появление новых техногенных областей разгрузки подземных вод сопровождается изменением направления движения подземных вод, увеличением градиентов подземного потока, нарушением общего баланса подземного и поверхностного стока. Воздействие этих источников возмущения на сформировавшийся естественный режим подземных и поверхностных вод, коренное изменение условий и интенсивности разгрузки подземного потока приводят к перераспределению составляющих водного баланса в пределах обширных по площади районов. Крупные масштабы дренажных работ, направленных на обеспечение нормальных условий строительства и эксплуатации шахт и карьеров, также способствуют заметному изменению режима подземных вод.

Можно рассмотреть ряд характерных примеров наиболее резких изменений естественного режима подземных вод, вызванных строительством и эксплуатацией горнодобывающих предприятий. Так, дренаж карьерных полей крупнейших железорудных месторождений КМА (Лебединского, Южно-Лебединского, Стойленского) привел к образованию региональной воронки депрессии, диаметр которой измеряется несколькими десятками километров, при понижении уровней подземных вод на несколько десятков метров за счет водоотбора дренажными системами, достигающего 9—11 тыс. м³/ч. Между тем расходы естественного потока, формировавшегося на этой территории благодаря инфильтрационному питанию, составляли около 1500 м³/ч.

Аналогичны последствия разработки Соколовско-Сарбайского железорудного месторождения, при эксплуатации которого водоприитоки к карьерам и дренажным системам

превышают 4 тыс. м³/ч. Эксплуатация Миргалимсайского месторождения связана со снижением уровней подземных вод по площади шахтного поля на 300—400 м и с водопритоками к подземным выработкам до 15—20 тыс. м³/ч.

На Эстонском месторождении горючих сланцев среднегодовые суммарные водопритоки в шахты и карьеры составляют около 20 тыс. м³/ч, увеличиваясь в паводковые периоды до 30—35 тыс. м³/ч. Естественный режим подземных вод нарушен здесь на площади порядка 10³ км².

В Подмосковном угольном бассейне суммарные водопритоки в шахты и карьеры достигают 20—30 тыс. м³/ч, а с учетом водоснабжения общий водоотбор по региону только за счет упинского водоносного горизонта превышает 60 тыс. м³/ч. В Кузнецком бассейне водопритоки в шахты в пределах центрального района в среднем составляют 25 тыс. м³/ч. На месторождениях СУБР среднегодовые водопритоки в шахты превышают 10 тыс. м³/ч, существенно увеличиваясь в паводковый период.

На бурогольном карьере «Фортуна-Гарсдорф» компании Рейнише Браунколенверке АГ (Кёльн, ФРГ) суммарный приток к системе дренажа фиксируется на уровне 80 тыс. м³/ч. Интересно отметить, что при площади карьера около 20 км² производительность отдельных дренажных скважин (глубиной до 500 м) здесь достигала 1600 м³/ч.

Таким образом, в крупных горнодобывающих районах наблюдается существенная интенсификация подземного стока, концентрация его на локальных участках шахтных или карьерных полей, благодаря чему гидродинамические процессы имеют резко выраженный характер.

Специфической особенностью нарушенного режима подземных вод является нестационарность фильтрационных процессов в период строительства горнодобывающих предприятий, которая выражается в общей тенденции (зачастую многолетней) к снижению уровней и расходов подземного потока, сопровождающей сработку естественных запасов подземных вод. В «неограниченных» по площади пластах при слабом развитии процессов инфильтрации или перетекания режим фильтрации остается существенно неустановившимся в течение длительного периода. В пластах, ограниченных непроницаемыми контурами, режим фильтрации может быть нестационарным в течение всего периода эксплуатации месторождения. Для водоносных горизонтов, ограниченных контурами питания, стабилизация режима фильтрации наступает после периода нестационарного режима, продолжительность которого зависит от фильтрационных параметров дренируемого пласта и расстояния между границами питания и дренажа. Например, в условиях Соколовско-Сарбайского месторождения наблюдалось развитие симметричной воронки депрессии, до тех пор пока влияние водопонижения не достигло р. Тобол; после этого сформировалась региональная асимметричная воронка, размеры которой в направлении

к р. Тобол ограничиваются 7 км, а в противоположном достигают 50—70 км.

Важнейшей особенностью режима подземных вод при освоении месторождений является общая интенсификация взаимосвязи горизонтов как по площади, так и по контактам между ними в плане, которая проявляется в развитии процессов перетекания через относительные водоупоры. Максимальная интенсификация перетекания между водоносными горизонтами наблюдается на локальных участках фациального замещения слабопроницаемых пород, по трассам тектонических зон повышенной трещиноватости (на участках «гидрогеологических окон»). Развитие процессов перетекания сокращает продолжительность периода нестационарной фильтрации и в конечном итоге может приводить к стабилизации режима подземных вод в районе месторождения.

Региональный характер влияния систем осушения или непосредственно горных выработок на режим подземных вод способствует тому, что поверхностные водоемы и водотоки, находящиеся в пределах дренируемой площади, становятся источниками питания водоносных горизонтов, в то время как в естественных условиях они, как правило, являются областями разгрузки подземного потока. Непосредственная связь дренируемых водоносных горизонтов с поверхностными водоемами и водотоками фиксируется довольно редко и наблюдается обычно при открытом способе разработки месторождений в пределах пойменных частей речных долин, выполненных гравийно-галечниковыми отложениями (например, Тигнинское бурогольное месторождение в Забайкалье, Курейнский участок Сибиргинского разреза в Кузбассе, Березовский разрез в Канско-Ачинском бассейне). Иногда отмечается непосредственная связь подземных вод с озерами (например, месторождение бурых углей, разрабатываемое разрезом «Понтнув» в Польше). Активная связь поверхностных водоемов и водотоков с водоносными горизонтами, дренируемыми подземными горными выработками, наблюдается при эксплуатации ряда шахт Кузбасса (на шахте «Распадская» дренируются на некоторых участках аллювиальные отложения р. Олжерас).

Следствием непосредственной связи поверхностных и подземных вод являются устойчивые и повышенные водопритоки к горным выработкам и дренажным системам. При эксплуатации доломитового карьера «Гралево» (Витебская область) водопритоки достигали 15 тыс. м³/ч при понижении уровней менее 10 м и расстоянии до р. Западная Двина 1,5 км, что свидетельствовало о непосредственной связи подземных вод с поверхностными. Водопритоки к разрезной траншее длиной 500 м на Тигнинском угольном разрезе составляли 1500—2000 м³/ч только за счет аллювиального водоносного горизонта мощностью менее 10 м, активно связанного с р. Хилок и представленного крупнообломочными отложениями, характеризующимися

коэффициентами фильтрации до 150—200 м/сут. На Зыряновском полиметаллическом месторождении водопритоки в карьер за счет аллювиального горизонта, связанного с р. Бухтарма, составляли 1500—1800 м³/ч.

Наиболее типична в практике горных работ затрудненная взаимосвязь подземных и поверхностных вод, которая определяется развитием аллювиальных слабопроницаемых отложений, экранирующих поверхностный водоем или водоток. Условия подобного рода характерны для угольных месторождений Канско-Ачинского бассейна, железорудных месторождений КМА, Эстонского сланцевого месторождения и многих других горнодобывающих районов. Следствием затрудненной связи поверхностных и подземных вод является инфильтрационный характер питания последних в контурах водоемов и водотоков.

При многоплановом характере горнодобывающего производства нередко создаются различные гидротехнические сооружения (водохранилища, гидроотвалы, хвостохранилища, отводные каналы), которые также могут являться локальными источниками инфильтрационного питания подземных вод. Например, инфильтрационные потери из гидроотвала Березов Лог (Лебединский ГОК) достигали в 1975—1980 гг. 1200—1500 м³/ч, что привело к подъему уровней подземных вод в его основании на 10—15 м [30]. Аналогичны последствия инфильтрации воды из хвостохранилищ обогатительных фабрик; например, потери из хвостохранилища комбината КМАруда достигали в 1975—1980 гг. 1000—1200 м³/ч.

Чаще всего создание гидротехнических сооружений в пределах зоны влияния дренажных работ или горных выработок приводит к восполнению запасов подземных вод, создает условия для стабилизации нарушенного режима подземных вод на участках карьерных и шахтных полей и оказывает «сглаживающее» влияние на характер сезонных изменений уровней подземных вод. Вместе с тем гидротехнические сооружения нередко являются источником повышенного водопритока к горным выработкам, причиной зарегулированной циркуляции подземных вод на ограниченном участке (например, гидроотвал Березов Лог — дренажная система Южно-Лебединского карьера). Многочисленные гидроотвалы на угольных разрезах Кузбасса также являются источниками дополнительного питания подземных вод, которое, в частности, вызывает подъем уровней водоносных горизонтов в прибортовых частях массива горных пород и возникновение деформации бортов разрезов (Киселевский разрез), а также приводит к подтоплению промышленных зданий, сооружений и жилых массивов (разрез им. 50 лет Октября).

Особенности нарушенного режима подземных вод во многом определяются питанием водоносных горизонтов по площади их развития за счет инфильтрации атмосферных осадков, которая способствует восполнению естественных запасов подземных вод и стабилизации их режима. Техногенный режим подобного типа

особенно характерен для районов, где развиты водоносные комплексы трещиноватых или закарстованных карбонатных пород. Примером может служить Эстонское и Ленинградское сланцевые месторождения, на площади которых режим ордовикского водоносного комплекса определяется инфильтрацией атмосферных осадков; в паводковый период повышенная инфильтрация полностью компенсирует частичное истощение запасов подземных вод между паводком и меженью. Другим подобным примером являются месторождения СУБР, где водопритоки к подземным горным выработкам и дренажным узлам формируются за счет инфильтрации поверхностных вод и несмотря на частичный отвод и изоляцию рек в паводок достигают 20 тыс. м³/ч.

Наличие слабопроницаемых покровных отложений затрудняет просачивание атмосферных и талых вод, однако и в этом случае инфильтрационное питание нередко является важной составной частью водного баланса вследствие регионального масштаба техногенного режима подземных вод. Например, для Старооскольского железорудного района КМА, характеризующегося развитием покровных суглинков мощностью более 10 м, суммарное инфильтрационное питание по площади депрессионной воронки (около 100 км²) достигает 3400 м³/ч, что составляет около 30 % общего водопритока к дренажным системам [34].

Месторождения полезных ископаемых иногда эксплуатируются с применением специфической геотехнологии, основанной на гидродинамических принципах. Примером может служить подземное выщелачивание металлов из руд, требующее создания принудительной циркуляции растворов в горных породах, что вызывает ощутимые изменения естественного режима подземных вод. Довольно часто организация участков выщелачивания производится в пределах карьерных и шахтных полей, где естественный режим нарушается также вследствие влияния систем осушения. В этом случае техногенный режим формируется в результате взаимодействия нагнетательных и осушительных систем, каждая из которых характеризуется определенной мобильностью.

Особые черты присущи техногенному режиму подземных вод, развивающемуся при затоплении подземных или открытых выработок после погашения шахт и разрезов.

В некоторых специфических случаях сформировавшийся техногенный режим подземных вод изменяется за счет обводнения горизонтов, предварительно сдренированных при ведении открытых и подземных горных работ. Например, намыв гидроотвала в отработанный разрез «Грамотейнский» (Кузбасс) влечет за собой насыщение толщи пород и создает угрозу для подземных горных выработок соседней шахты «Октябрьская». Изменение режима водоносных горизонтов происходит при гидродобыче угля подземным способом (в Кузбассе, Донбассе), а также при подземной газификации угля (Ангренское месторождение).

Нарушения естественного гидродинамического режима подземных вод под влиянием дренажных работ или при проходке горных выработок влекут за собой изменения гидрохимического режима. Например, эксплуатация систем водопонижения на Соколовско-Сарбайском разрезе привела к снижению общей минерализации подземных вод. При этом наблюдалась постоянная дифференциация минерализации по бортам Соколовского карьера, которая позволяет судить о роли р. Тобол в формировании водопритоков: на восточном борту карьера (ориентированном в сторону реки) минерализация составила в 1976 г. 1,9 г/л (3,4 г/л при разведке в 1958 г.), а на западном 4,2 г/л (в 1958 г. — 4,3 г/л).

Необходимость дренирования водоносных горизонтов сильно-минерализованных вод выдвигает довольно сложные проблемы, связанные с их отводом и очисткой. Примером могут служить условия дренажа карьеров объединения «Якуталмаз», где откачка глубокозалегающих сильноминерализованных и газированных подземных вод создает серьезную угрозу загрязнения водотоков и горизонтов грунтовых вод. Следует отметить, что в последние годы в связи с комплексным развитием горнодобывающих районов проблема охраны окружающей среды приобретает все большую значимость вследствие увеличения масштабов сброса загрязненных шахтных вод, складирования отходов производства обогащательных фабрик, сланцеперегонных заводов и т. д. Согласно данным, приведенным в работе [48], с шахтными водами, сбрасываемыми из отработанных шахт в районе Аппалачей, каждые сутки выносятся свыше 5000 т кислот.

На Ленинградском месторождении горючих сланцев при дренировании шахтных полей произошло существенное снижение содержания хлор-иона в составе вод наиболее динамичных верхних водоносных горизонтов. При фоновом (естественном) содержании хлор-иона в водах таллинского водоносного горизонта, составляющем около 40 мг/л, в водах везембергского водоносного горизонта содержание этого компонента снизилось до 4 мг/л, а в водах кукерского — до 19 мг/л [19]. Установившаяся гидрохимическая зональность позволяет здесь достаточно уверенно определять источники формирования прорывов подземных вод в горные выработки. Кроме того, изменения химического состава верхних водоносных горизонтов свидетельствуют о существенной интенсификации инфильтрационного питания подземных вод.

Изменение гидродинамического режима сопровождается ощутимым изменением температурного режима водоносных комплексов. Особенно четко это прослеживается в угленосных отложениях, так как угольные пласты проявляют свойства тепловых экранов. Например, при дренировании надугольного и подугольного водоносных горизонтов на Нерюнгринском угольном месторождении при развитии процессов перетекания через слабопроницаемый пласт угля «Мощный» (средняя мощность пла-

ста около 25 м) наблюдается конвективное перераспределение температур в пределах этого пласта (см. рис. 6.16 и 6.17).

Таким образом, при строительстве и эксплуатации горнодобывающих предприятий наблюдаются изменения гидродинамического, химического и теплового режима подземных вод. Эти изменения в конечном итоге приводят к формированию техногенного режима, отличающегося от естественного особым динамизмом и существенной зависимостью от горно-геологических факторов.

1.2. Формирование техногенного режима подземных вод и факторы, влияющие на его закономерности

Техногенный режим дренируемых водоносных горизонтов определяется особыми гидродинамическими условиями на границах их разгрузки и характеризуется активизацией водного баланса в пределах шахтных и карьерных полей, интенсификацией питания подземных вод, нестационарностью фильтрационных процессов. Закономерности техногенного режима подземных вод во многом определяются совместным развитием геомеханических и фильтрационных процессов в породных комплексах, вскрываемых горными выработками. Разработка месторождений открытым способом сопровождается явными и наиболее резкими изменениями условий разгрузки подземных вод, так как при этом, как правило, дренируется несколько водоносных горизонтов. Для вскрытых карьером водоносных комплексов границы дренажа однозначно трактуются как контуры с фиксированными понижениями напора, соответствующими отметкам подошвы водоносных пластов.

Более сложные и разнообразные гидродинамические условия формируются на контурах подземных горных выработок различного назначения при развитии тех или иных геомеханических процессов. Дренажное действие подготовительных выработок ограничивается снижением напоров одного-двух вскрытых ими пластов при минимальных деформациях подрабатываемого массива горных пород. Нарушение естественного режима водоносных пластов, вскрываемых при сооружении шахтных стволов, обычно имеет временный характер и ограничивается периодом проходки ствола до его гидроизоляции, после которой напоры подземных вод могут восстанавливаться.

В максимальном масштабе дренажный эффект проявляется при очистных горных работах с управлением кровлей полным обрушением. Развитие процесса сдвижения горных пород приводит к изменению структуры и свойств массива пород в кровле выработок, к раскрытию имеющихся и образованию новых техногенных трещин и, как следствие, к активизации гидравлической связи водоносных пластов между собой, с выработанным пространством и с водными объектами на земной поверхности. Параметры техногенных трещин зависят от литологического

состава и прочностных характеристик пород подрабатываемого массива, его структурных особенностей и напряженного состояния, от технологических характеристик очистных работ (прежде всего от мощности вынимаемого пласта). Следовательно, условия разгрузки подземных вод при ведении очистных работ зависят главным образом от характера техногенной трещиноватости подрабатываемого горными выработками породного массива. Натурные наблюдения и моделирование на эквивалентных материалах свидетельствуют о том, что проницаемость относительно однородных массивов горных пород максимальна вблизи выработанного пространства и уменьшается к земной поверхности по зависимости, близкой к логарифмической.

При оценке условий формирования водопритоков к горной выработке целесообразно выделять в пределах области развития техногенной трещиноватости локальную зону водопроводящих трещин (ЗВТ). В этой зоне трещины образуют единую гидравлическую систему, активно связанную с выработанным пространством, причем проницаемость ЗВТ как минимум на порядок превышает проницаемость окружающих ее пород. В пределах ЗВТ наряду с трещинами напластования развиты трещины, нормальные к напластованию, в отличие от верхних частей подработанного массива, где преобладающими являются трещины напластования, наследующие естественную структуру слоистой толщ. Целесообразность выделения ЗВТ определяется тем, что в данной трактовке она является конкретным элементом расчетной гидродинамической схемы и рассматривается как непосредственное продолжение выработанного пространства. Для водоносных пластов, пересекаемых ЗВТ, границы последней в плане рассматриваются как совершенные контуры дренажа.

Условия дренирования водоносных пластов, залегающих над верхней границей ЗВТ, характеризуются затрудненной связью с выработанным пространством. Ограниченное изменение проницаемости пород вкrest их напластования позволяет считать эту часть нарушенного массива относительным водоупором, экранирующим выработанное пространство от вышележащих водоносных пластов и от земной поверхности. Вместе с тем проницаемость этого относительного водоупора за счет техногенной трещиноватости зачастую может существенно превышать проницаемость породного массива за пределами области сдвижения, что необходимо учитывать при оценке условий дренирования водоносных горизонтов, не вскрываемых ЗВТ.

Интересно отметить, что на большинстве угольных месторождений при подработке слоистых толщ, представленных чередованием песчаников, алевролитов и аргиллитов, над верхней границей ЗВТ формируется техногенный массив с практически одинаковой (для всех месторождений) проницаемостью вкrest напластования, которая характеризуется коэффициентами фильтрации порядка 10^{-3} м/сут.

Высота ЗВТ в каждом конкретном случае зависит от мощности вынимаемого пласта, размеров очистной выработки, скорости движения лавы и других технологических факторов. Однако основным фактором, определяющим высоту ЗВТ, являются свойства горных пород. Достаточно упомянуть, что в массивах, представленных породами глинистого состава, высота ЗВТ иногда не превышает $4m$, а в метаморфизованных тектонически нарушенных породах достигает $80m$ (где m — вынимаемая мощность пласта).

Деформации, происходящие в подрабатываемом массиве горных пород, в ряде случаев являются обратимыми: под воздействием горного давления после проведения очистных работ трещиноватость массива песчано-глинистых пород может уменьшаться со временем. Например, на шахте «Каменар» (Болгария) четко проявляется восстановление ранее сниженных напоров в подработанной толще по мере продвижения фронта очистных работ, что свидетельствует об изменении проницаемости массива за счет смыкания техногенных трещин (рис. 1.1).

Гидродинамическая схема, предусматривающая формирование боковых притоков из водоносных пластов, вскрытых ЗВТ, и перетекание по площади очистных работ из пластов, не вскрываемых ЗВТ, характерна в основном для месторождений, которые сложены метаморфизованными породами, не склонными к пластическим деформациям при изменении их напряженного состояния. Таким условиям отвечают прежде всего месторождения, приуроченные к терригенным угленосным отложениям, представленным циклическим чередованием пластов песчаников, алевролитов, аргиллитов и углей. Подобная схема может иметь место и при подработке стратифицированных комплексов карбонатных пород. Например, на шахтах Кизеловского угольного бассейна (им. В. И. Ленина, «Северной») водопритоки в очистные выработки формируются за счет перетекания из водообильного горизонта закарстованных известняков через пачку мергелей, отчасти нарушенную техногенными трещинами. На Ленинградском сланцевом месторождении дренирование везенбергского и иевского водоносных горизонтов ордовикского карбонатного комплекса происходит при ведении очистных работ за счет перетекания через деформированные пласты мергелей, обладающие свойствами водоупоров. На Эстонском сланцевом месторождении по аналогичной схеме дренируются набала-раквереский и кейлаский водоносные горизонты. Боковые притоки в очистные выработки на этих двух месторождениях формируются за счет вскрытых ЗВТ кукерского и кукрузеского водоносных пластов.

При подработке массивов рыхлых песчано-глинистых пород механизм деформирования кровли очистных выработок существенно осложняется. Как правило, гидравлическая связь выработки с подработанными водоносными пластами оказывается затрудненной, что способствует сохранению их естественных

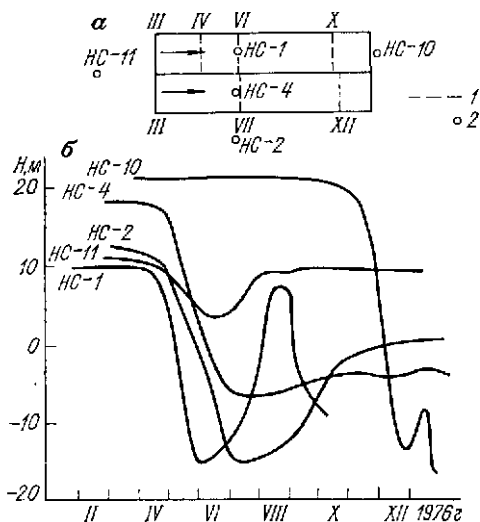


Рис. 1.1. Схема развития очистных работ (а) и хронологические графики (б) изменения напоров H подрабатываемого шахтой «Каменар» (Болгария) водоносного пласта (в абсолютных отметках). 1 — положение очистного забоя на разные моменты; 2 — положение пьезометров.

напоров. В этих условиях возможно внезапное нарушение структуры массива на локальных участках, деформация относительного водоупора за счет гидродинамических сил, концентрированное поступление подземных вод или разжиженных песчано-глинистых пород в горные выработки, т. е. возникновение прорывов.

Прорывы подземных вод могут происходить как в подготовительных, так и в очистных горных выработках. Таковы условия эксплуатации большинства шахт в Подмосковном угольном бассейне и на Боровичском месторождении огнеупорных глин. В неоднородных комплексах, представленных слаболитифицированными отложениями, перекрытыми более «жесткими» породами, при развитии процессов сдвижения на контактах слоев различной прочности могут образоваться полости, заполненные водой, которые являются потенциальными источниками прорывов в выработанное пространство.

В песчано-глинистых отложениях наряду с «залечиванием» трещин за счет восстановления горного давления в подработанном массиве возможно и повышение проницаемости последнего в результате прогрессирующих процессов суффозионного выноса, выпора и размыва рыхлых пород по трещинам. Можно дополнительно отметить, что фильтрационные деформации рыхлых отложений возможны и при сооружении шахтных стволов. В частности, известен опыт проходки ствола под защитой водопонижения, при котором в осушаемой песчаной толще мощностью около 40 м в окрестностях сквозных фильтров на глубине примерно 100 м образовались полости протяженностью несколько десятков метров с выносом через фильтры в дренажные штреки около 50 тыс. м³ песка.

Таким образом, техногенный режим водоносных комплексов,

представленных песчано-глинистыми слаболитифицированными отложениями, определяется сложными геомеханическими процессами, методика изучения и прогноза которых в настоящее время разработана недостаточно детально.

Закономерности техногенного режима подземных вод зависят от условий питания дренируемых водоносных горизонтов по площади их развития. Важную роль в формировании техногенного режима подземных вод играет инфильтрация талых и дождевых вод на участках разрабатываемых месторождений.

Проведение различного рода инженерно-строительных мероприятий в пределах карьерных и шахтных полей и на прилегающих к ним территориях сопровождается изменением микро-рельефа земной поверхности, нарушением почвенного покрова, которое приводит к сокращению поверхностного стока до минимума. Наиболее резкая интенсификация инфильтрации поверхностных и атмосферных вод наблюдается на шахтных полях непосредственно по площади очистных горных работ, что связано с повышением проницаемости массива горных пород, перекрывающих полезное ископаемое, с формированием мульд сдвижения на земной поверхности, с образованием трещин в покровных отложениях, с наличием многочисленных разведочных скважин (нередко плохо затампонированных).

Опыт эксплуатации шахт свидетельствует о наличии корреляционной связи между интенсивностью атмосферных осадков, глубиной проведения горных работ, площадью подземных горных выработок и водопритоками в них. Например, на шахтах производственного объединения «Эстонсланец» устанавливается четкая зависимость объема водопритоков и характера их распределения в годовом цикле от глубины разработки полезного ископаемого (см. раздел 6.1). На шахтах Кузбасса наблюдается повышение паводкового притока в 3—4 раза по сравнению с минимальным при глубине отработки до 150 м и в 1,5—2,0 раза — для больших глубин. На шахтах Донбасса влияние сезонного инфильтрационного питания проявляется даже при глубинах горных работ 700—800 м (паводковые притоки на 20—25 % выше минимальных меженных).

В целом инфильтрация по площади очистных работ зависит от геолого-структурных особенностей месторождений и технологических факторов. Зачастую интенсивная инфильтрация атмосферных осадков и талых вод объясняется повышенной проницаемостью массива в приповерхностной зоне развития трещин выветривания. Влияние инфильтрационного питания на общий баланс водопритоков к горным выработкам определяется при прочих равных условиях сезонным распределением атмосферных осадков и режимом снеготаяния. В частности, на шахтах Кизеловского бурогоугольного бассейна, где водопритоки в паводок достигают 1700—2000 м³/ч (шахта им. В. И. Ленина) при среднегодовом значении 1500 м³/ч, наблюдается два «пиковых» значения паводковых водопритоков: в апреле за счет

поглощения талых вод в карстовых воронках и в июне за счет обильных дождей.

Характер питания подземных вод накладывает определенный отпечаток на режим водопритоков в подземные горные выработки. Например, для СУБР водопритоки к выработкам при вскрытии карстовых полостей на горизонтах, близких к поверхности, остаются сравнительно стабильными в течение нескольких месяцев (шахты № 4 и 6, горизонт +4 м) за счет активного инфильтрационного питания дренируемого водоносного комплекса. Вскрытие аналогичных карстовых полостей на горизонте —140 м (шахта № 15) сопровождается кратковременным (несколько дней) увеличением общего водопритока вследствие затрудненной связи подземных вод с поверхностными [1].

Максимальные сезонные колебания водопритоков в шахты определяются чаще всего изменчивостью инфильтрации непосредственно по площади горных работ. Таковы, например, условия формирования водопритоков на ряде шахт Кузбасса, где соотношение максимальных (паводковых) и минимальных (меженных) водопритоков составляет 2—4. На Миргалимсайском рудном месторождении это соотношение равно 2—3 при изменении абсолютных значений водопритоков от 8 до 22 тыс. м³/ч. На шахтах Эстонского сланцевого месторождения паводковые водопритоки в шахты и карьеры превышают меженные в 2—9 раз (см. табл. 6.1).

Интенсивность водопритока в подземные горные выработки и ее сезонные изменения далеко не всегда отражают закономерности режима дренируемых водоносных горизонтов. В частности, при формировании водопритоков преимущественно за счет инфильтрации по площади горных работ роль бокового притока из дренируемых водоносных горизонтов оказывается второстепенной и завуалированной. В некоторых случаях при слоистом строении подрабатываемого массива боковые водопритоки могут в паводковый период снижаться, что объясняется резким подъемом напоров на площади горных работ за счет усиленной инфильтрации талых и дождевых вод.

Повышение среднегодовой интенсивности питания подземных вод за пределами площади очистных работ происходит обычно за счет увеличения градиентов фильтрации в покровных слабопроницаемых отложениях при общем снижении напоров в дренируемых водоносных комплексах. Убедительным примером могут служить результаты определения интенсивности питания подземных вод на шахтных и карьерных полях, выполненного ВНИМИ при изучении гидрогеологических условий эксплуатации Эстонского месторождения горючих сланцев (см. рис. 6.5 и 6.8). Следует отметить, что интенсивность питания подземных вод на территории этого месторождения в естественных условиях составляла в среднем 150 мм/год или 0,4 мм/сут, что существенно ниже значений этого показателя по всем шахтным и карьерным полям.

Интенсивность инфильтрации в пределах шахтных полей повышается даже при наличии приповерхностной зоны многолетнемерзлых пород. Например, на Интинском месторождении по полю шахты «Восточная» среднегодовая интенсивность инфильтрации составляет 2 мм/сут по площади очистных работ и 1 мм/сут за ее пределами.

На карьерных полях интенсивность инфильтрационного питания безнапорных водоносных горизонтов может повышаться по сравнению с естественной за счет изменения положения уровней подземных вод (при ведении дренажных или горных работ). По результатам обработки режимных наблюдений на электрических моделях [34] для карьерных полей Старооскольского района КМА установлено, что интенсивность инфильтрации по сравнению с естественной повысилась здесь в среднем в 1,5—2 раза. Повышение инфильтрации можно объяснить уменьшением доли испарения в общем балансе просачивающихся атмосферных осадков, а также увеличением инфильтрации талых и дождевых вод по оврагам и балкам, которые в естественных условиях являлись базисом разгрузки подземных вод. Средняя (в годовом цикле) интенсивность инфильтрации по рассматриваемой территории составляет 0,2 мм/сут, однако инфильтрация неравномерна по площади и изменяется от 0,1 до 1,2 мм/сут [8]. Зависимость интенсивности инфильтрации w от глубины залегания уровней подземных вод z и понижений напора S отражена на рис. 1.2. Связь интенсивности инфильтрации и понижений напора может быть выражена экспоненциальной зависимостью вида

$$w = A e^{BS}. \quad (1.1)$$

Для рассматриваемого района КМА $A=1,6$, $B=0,33$. В весенний период в этом районе интенсивность инфильтрации на отдельных участках увеличивается до 2—5 мм/сут.

На локальных участках карьерных и шахтных полей усиленное питание подземных вод в условиях техногенного режима может определяться наличием водоемов, водотоков, гидротехнических сооружений. Типичная затрудненная связь поверхностных и подземных вод на первых стадиях осушения водоносного горизонта проявляется в постепенном увеличении разрыва их уровней и интенсификации питания подземных вод за счет перетекания через слабопроницаемые подрусловые отложения. Этот нестационарный процесс наблюдается до тех пор, пока водоотбор из дренируемого горизонта не будет соответствовать расходу перетекания (с учетом других источников питания подземных вод). При интенсивном осушении водоносного горизонта напоры его, постепенно понижаясь, достигают отметок подошвы слабопроницаемых подрусловых отложений, и питание подземных вод по контуру реки принимает инфильтрационный характер.

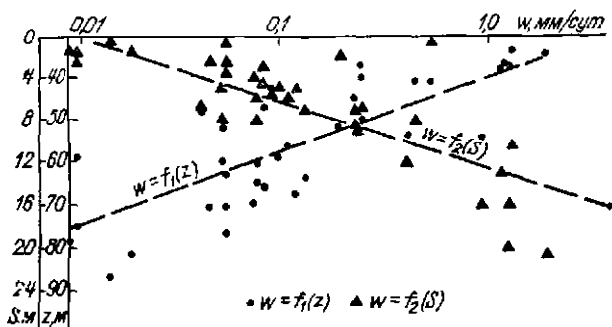


Рис. 1.2. Изменение интенсивности инфильтрационного питания надюрского водоносного комплекса w в зависимости от глубины залегания зеркала подземных вод z и понижения уровня S при техногенном режиме

Классическим примером такого рода процессов являются результаты водопонижения на Лебединском и Южно-Лебединском карьерах КМА, проводящегося вблизи р. Осколец, которая в естественных условиях являлась контуром стока надюрского (сеноман-альбского) водоносного горизонта. В начальные периоды водопонижения потери из реки составляли 600—800 м³/ч (1960 г.); результаты исследований ВНИМИ [8, 34] показали, что через 8—10 лет с момента начала эксплуатации дренажной системы (1970 г.) потери из реки достигли 1000 м³/ч при общей производительности средств дренажа около 7000 м³/ч. Отметим, что к этому времени инфильтрация из гидроотвала Березов Лог составляла 1000—1200 м³/ч, а из хвостохранилища обогатительной фабрики — около 1000 м³/ч. Режим подземных вод в районе месторождений стабилизировался, снижение уровней было зафиксировано далеко за пределами долины реки, русло которой на участке длиной 5—6 км оказалось «подвешенным». В силу различного по амплитуде разрыва уровней поверхностных и подземных вод (достигающего 10—15 м) питание водоносного горизонта за счет вод реки осуществлялось путем перетекания через слабопроницаемые подрусловые отложения (мощностью до 5—6 м), а местами за счет инфильтрации. Интенсивность инфильтрации в русловой части реки достигала 20 мм/сут. За пределами зоны влияния дренажа р. Осколец продолжала оставаться областью разгрузки надюрского водоносного горизонта.

Аналогичным примером может служить р. Ададым на поле Назаровского бурогоугольного разреза, дренирующее действие которого прослеживалось далеко за пределами долины реки, причем повышенные водопитоки к рабочему борту разреза, которые фиксировались на участках, ближайших к руслу реки (300 м³/ч при общем притоке к разрезу 800 м³/ч), свидетельствовали о подпитке дренируемого горизонта за счет реки.

Характер взаимосвязи поверхностных и подземных вод может меняться в процессе эксплуатации месторождения не только за счет увеличения «разрыва» уровней, но и за счет техногенных изменений фильтрационных свойств подрусловых отложений. Довольно часто при ведении открытых горных работ реки отводятся за пределы карьерного поля, причем этот отвод сопровождается выемкой слабopоницаемых покровных отложений. Например, в результате отвода р. Шатец на поле Грызловского карьера (Подмосковный бурouгольный бассейн) потери воды из отводного канала существенно повысились, что явилось причиной увеличения водопритока в разрезную траншею на 100—150 м³/ч за счет дренирования водоносного горизонта тульских известняков, вскрытых на локальных участках при прокладке нового русла. На других карьерах в этом районе водопритоки из тульских известняков обычно не превышали 30—50 м³/ч [4].

Известны примеры снижения проницаемости подрусловых отложений за счет их глинизации отходами производства. Русло р. Коршуиниха, отведенной по трещиноватым карбонатным породам, оказалось постепенно закольматированным глинистыми «хвостами» обогатительной фабрики, которые периодически поступали в реку выше участка отвода [8]. В результате кольматации русла потери воды из отводного канала постепенно сократились примерно в 3 раза.

Снижение проницаемости глинистых пород, залегающих в основании гидротехнических сооружений, в ряде случаев определяется повышением напряжений в этих породах. Натурные наблюдения, проведенные ВНИМИ на гидроотвале Березов Лог [30] показали, что при высоте гидроотвала около 50 м среднее значение коэффициентов фильтрации суглинков в его основании составило порядка 10⁻³ м/сут, в то время как в условиях естественного залегания (без дополнительной нагрузки) коэффициент фильтрации оценивался значениями порядка 10⁻² м/сут.

В общем случае питание подземных вод существенно зависит от режима грунтовых вод. При подземном способе отработки месторождений полезных ископаемых режим грунтовых вод может претерпевать заметные изменения на участках ведения очистных работ. Деформации верхней части подработанной толщи, оседание земной поверхности, образование на ней трещин и провалов — все эти результаты геомеханических процессов существенно зависят от строения и литологического состава покровных отложений, а с другой стороны, они являются причиной разнообразных изменений режима грунтовых вод. В частности, при наличии и сохранении водоупоров в основании грунтового водоносного горизонта оседание земной поверхности сопровождается подъемом уровней грунтовых вод, затоплением мульд сдвижения. В других случаях при нарушении водоупоров, подстилающих грунтовой водоносный горизонт, наблюдается

его дренирование и максимальная интенсификация инфильтрации атмосферных осадков в паводковые периоды.

Нередко дренирование грунтовых водоносных горизонтов происходит на начальной стадии процесса сдвижения, после которой наблюдается подъем уровней грунтовых вод, вызванный снижением проницаемости подработанного массива за счет увеличения горного давления. Закономерности изменения естественного режима грунтовых вод при подземных горных работах в настоящее время находятся в центре внимания при оценке условий выемки свит угольных пластов под г. Караганда и на ряде шахт Донбасса. Исследование условий затопления и подтопления территорий за счет атмосферных осадков и грунтовых вод требует комплексного учета гидрогеологических, геомеханических и горно-технологических факторов.

При интенсивном просачивании атмосферных осадков может формироваться зарегулированный режим подземных вод, который характеризуется нестационарностью лишь в пределах годового цикла при сезонной неравномерности питания водоносных горизонтов. В этих условиях циклические изменения характеристик подземного потока могут повторяться без изменений в течение ряда лет с одинаковым количеством осадков (при стабильном положении контура горных работ). Параллельное продвижение фронта горных работ и постоянство условий на их контуре предопределяют синхронное перемещение воронки депрессии без изменения ее конфигурации на фиксированные в годовом цикле моменты. Такие условия наблюдаются, в частности, при эксплуатации сланцевых карьеров на Эстонском месторождении.

Характер сезонных колебаний уровней подземных вод зависит от строения дренируемых водоносных комплексов, их литологического состава и условий на их границах. В частности, при ведении открытых горных работ максимальные амплитуды уровней безнапорных водоносных горизонтов наблюдаются на водораздельных участках. Например, в Старооскольском районе КМА сезонные колебания уровней сеноман-альбского водоносного горизонта в паводковый период на водоразделах достигают 1,5—2,5 м, а вблизи дренажных систем и карьеров они практически не фиксируются. При дренировании слоистых водоносных толщ максимальные амплитуды уровней подземных вод характерны для средней части воронок депрессии; к водораздельным участкам эти амплитуды сокращаются до минимума, соответствующего естественному режиму подземных вод. Заметим, что по этому признаку целесообразно выделять зону дренажного влияния горных выработок и систем осушения.

В слоистых подработанных толщах возможно максимальное повышение напоров непосредственно по площади очистных работ, если изменение структуры массива не приводит к нивелированию проницаемости отдельных слоев (т. е. в толще сохраняются относительные водоупоры). В этих условиях в паводковый

период нередко формируется временный фильтрационный поток, направленный от контура очистных работ к внешним границам воронки депрессии.

Амплитуды сезонных колебаний уровней существенно зависят от емкостных свойств дренируемых пород. Минимальные амплитуды колебаний уровней подземных вод фиксируются при формировании безнапорных потоков в отложениях песчаного состава. В этих условиях даже в районах гумидного климата сезонные колебания уровней не превышают 1—2 м. Максимальные амплитуды характерны для трещиноватых пород типа известняков или плотных песчаников. Например, на Миргалимсайском месторождении при снижении уровней в известняках на 250—300 м амплитуды сезонных колебаний уровней достигают 50—100 м. На Нерюнгринском угольном месторождении сезонные колебания уровней в трещиноватых песчаниках зачастую превышают 10 м как в условиях естественного, так и техногенного режима подземных вод (см. рис. 6.13). Режим подземных вод на этом месторождении определяется своеобразным влиянием мерзлотных условий: максимальный подъем уровней фиксируется в конце теплого периода, что связано с инфильтрацией атмосферных осадков на локальных участках таликов, а также с существенным влиянием многолетнемерзлых пород на процессы конденсации влаги в зоне аэрации. На Эстонском месторождении горючих сланцев амплитуды сезонных колебаний уровней ордовикского водоносного комплекса в зоне влияния горных выработок также превышают 10 м (см. рис. 6.4). Интересно отметить, что трещиноватые песчаники и карбонатные породы характеризуются на этих двух месторождениях примерно равной гравитационной водоотдачей (порядка 0,01).

Резкие изменения условий разгрузки подземных вод в условиях техногенного режима приводят к развитию нестационарных фильтрационных процессов, характер и продолжительность которых зависит от природных и горно-технических факторов.

Нестационарный режим подземных вод характерен для периода строительства горнодобывающего предприятия, что связано со сработкой естественных запасов подземных вод при проходке первоочередных горных выработок и при вводе в действие дренажных систем. При дренировании мощных горизонтально залегающих водоносных отложений, представленных рыхлыми песчано-глинистыми породами, продолжительность нестационарного режима фильтрации может измеряться несколькими годами. Таковы, например, условия строительства Лебединского, Стойленского, Соколовско-Сарбайского железорудных карьеров, Павловского, Приозерного, Орловского угольных карьеров.

Истощение естественных запасов подземных вод, приуроченных к наклонно залегающим слоистым комплексам, может происходить в течение всего периода эксплуатации месторождения, поэтому техногенный режим характеризуется здесь явно выра-

женной нестационарностью и нелинейностью фильтрационных процессов. Такой режим подземных вод типичен для угольных месторождений, приуроченных к мульдообразным структурам, сложенным метаморфизованными породами. В условиях ограниченного питания подземных вод при мульдообразном или моноклинальном залегании вскрытых горными выработками водоносных пластов их постепенное осушение сопровождается уменьшением мощности потока, движением границы раздела напорной и безнапорной зон, а также «стягиванием» внешнего контура обводненности. Известны многочисленные примеры истощения мощных водоносных комплексов при разработке угольных месторождений. На Харанорском буроугольном месторождении (Забайкалье) в результате работы системы водопонижающих скважин с дебитом около 500 м³/ч снижение уровня безнапорного горизонта по карьерному полю составляло в среднем 5—7 м/год, что привело к полному осушению надугольных песчаников мощностью 40—50 м, мощного (до 15 м) угольного пласта и подугольных песчаников. Аналогично на Ирша-Бородинском буроугольном месторождении (Красноярский край) эксплуатация подземной системы осушения привела к существенному осушению значительной части мульдообразной структуры, обрабатываемой открытым способом.

На некоторых крупных карьерах, вводимых в эксплуатацию в последнее время, нелинейность процесса осушения определяет условия дренажа карьерных полей. Например, на Березовском буроугольном месторождении (Канско-Ачинский бассейн), где угольный пласт мощностью до 50 м является основным осушаемым водоносным горизонтом, перекрытым мощной толщей песчаников и алевролитов, нелинейность фильтрационного процесса должна проявиться в полной мере. Для Нерюнгринского угольного карьера, где мощность обводненной толщи надугольных песчаников достигает 150 м, намеченные параметры системы водопонижительных скважин и порядок их ввода определялись с учетом нелинейности процесса осушения карьерного поля. Нелинейные фильтрационные процессы зачастую осложняются профильной неоднородностью — изменением в разрезе водоотдачи осушаемых пород. Таковы, например, условия Шарынгольского угольного месторождения (Монголия), где осушались мощные пласты пород с резко различными коэффициентами водоотдачи, что определило заметное увеличение скорости снижения уровней при сработке естественных запасов подземных вод в условиях упруго-гравитационного режима.

Закономерности техногенного режима существенно осложняются, если дренируемый водоносный комплекс обладает неоднородностью в плане. Фильтрационная неоднородность рыхлых песчано-глинистых отложений чаще всего определяется их фациальной изменчивостью по мощности и по литологическому составу. Неоднородность в плане комплексов метаморфизованных пород нередко обусловлена их тектонической нарушенно-

стью. Следствием плановой фильтрационной неоднородности является резкая неравномерность понижений напора в пределах карьерных и шахтных полей. На Харанорском угольном месторождении при осушении карьерного поля по разные стороны тектонических нарушений наблюдались перепады напоров до 50 м.

На Нерюнгринском угольном месторождении тектонические нарушения также заметно влияют на эффективность водопонижающих скважин. Слабопроницаемые центральные части тектонических зон на этом месторождении выполнены раздробленными породами с рыхлым заполнителем, а периферийные части нарушений характеризуются интенсивной трещиноватостью метаморфизованных песчаников. Такие тектонические зоны обладают резкой анизотропией проницаемости вдоль и вкрест их простирания.

На угольных месторождениях с пологим залеганием пластов, как правило, отмечается изменчивость трещиноватости угля по мере погружения пласта; при этом проницаемость угля снижается более резко, чем уменьшается его гравитационная водоотдача (см. рис. 6.21). Теоретически такая закономерность может быть объяснена тем, что проницаемость пропорциональна показателю раскрытости трещин в третьей степени, а коэффициент водоотдачи пропорционален этому показателю во второй степени.

Профильная неоднородность дренируемых водоносных комплексов в общем случае затрудняет их питание за счет атмосферных и поверхностных вод и контролирует распределение этого питания между отдельными водоносными пластами.

Профильная неоднородность, т. е. характер относительных водоупоров, чаще всего зависит от генетических особенностей водоносных комплексов, от их стратифицированности, связанной с осадконакоплением. При дренировании полей Лебединского и Южно-Лебединского карьеров (КМА) процесс перетекания из надъярского водоносного горизонта в рудно-кристаллический через неомские глины наблюдался при разности напоров 30—40 м и расходе перетекания, достигающем $300 \text{ м}^3/\text{ч}$. Обработка результатов режимных наблюдений позволила установить, что коэффициенты фильтрации глины колеблются в пределах от 10^{-5} до 10^{-1} м/сут [8].

Осушение Нерюнгринского угольного месторождения проводится при явной взаимосвязи подугольного и надугольного водоносных горизонтов, представленных трещиноватыми песчаниками. Угольный пласт «Мощный» проявляет свойства водоупора — его коэффициенты фильтрации вкрест напластования измеряются значениями порядка 10^{-2} — 10^{-3} м/сут .

Иногда профильная неоднородность определяется постгенетическими процессами, следствием которых является развитие трещин напластования, закарстованности отдельных слоев в толще карбонатных отложений, развитием трещиноватости

в приповерхностной зоне выветривания породного массива. В этом варианте положение зон повышенной проницаемости и водоупоров может не совпадать со стратиграфическими границами. Подобные условия характерны для Эстонского и Ленинградского сланцевых месторождений, где положение наиболее проницаемых зон (водопроводящих плоскостей) в карбонатном комплексе не совпадает с границами водоносных горизонтов, выделяемых по стратиграфическим признакам. На ряде угольных месторождений в Канско-Ачинском бассейне наблюдается резко повышенная проницаемость угольных пластов в приподшенной их части (Итатское угольное месторождение).

Как уже отмечалось, развитие процессов перетекания через относительные водоупоры способствует общей зарегулированности условий питания дренируемых водоносных комплексов, при которой на фоне их многолетнего квазистационарного режима наблюдаются внутригодовые изменения последнего как следствие сезонной неравномерности инфильтрации, циклического восполнения естественных запасов подземных вод в паводковые периоды.

Техногенный режим неоднородных водоносных комплексов нередко формируется на фоне изменения напряженного состояния массива горных пород, при котором наблюдается нелинейный процесс сработки естественных запасов подземных вод. На Южно-Белозерском месторождении примерно 80 % водопритока к дренажным средствам (3000—4000 м³/ч) формируется за счет упругих запасов подземных вод, приуроченных к глинисто-меловым породам, перекрывающим дренируемый водоносный горизонт [8]. Наблюдения показывают, что развитие техногенного гидродинамического режима нередко сопровождается изменением напряженного состояния неоднородного массива горных пород и соответствующим изменением их физико-механических и фильтрационных свойств [24]. Примером может служить наблюдавшееся набухание нижних частей пачки аргиллитов, отделяющих угольный водоносный горизонт от подугольного на Тигнинском бурогольном месторождении. За счет консервации высоких напоров в подугольном горизонте при дренаже угольного горизонта карьером возникла восходящая фильтрация, что способствовало набуханию глинистых пород вследствие снижения эффективных напряжений. Снижение прочности аргиллитов явилось одной из причин крупных оползневых деформаций на разрезе [5].

Дренирование водоносных горизонтов, разделенных слабопроницаемыми породами, приводит к увеличению эффективных напряжений, к соответствующим деформациям и к изменению физико-механических свойств этих пород. Изучение этих гидрогеомеханических процессов чаще всего проводится применительно к решению проблемы прогнозирования осадок земной поверхности и сжатия дренируемой толщи при проходке шахтных стволов с водопонижением [8].

Таким образом, техногенный режим подземных вод характеризуется широким разнообразием форм, зависящих от геологического строения месторождения, условий питания подземных вод и их разгрузки на горных выработках или дренажных сооружениях. Тем не менее можно систематизировать дренируемые водоносные горизонты или комплексы по характеру их техногенного режима. Масштаб рассмотрения техногенного режима подземных вод ограничивается чаще всего площадью карьерного или шахтного поля с непосредственно прилегающей к нему территорией, в пределах которой прослеживается дренажный эффект. Поэтому предлагаемая систематизация (табл. 1.1) также ограничивается локальными геологическими структурами без непосредственного учета региональных геолого-структурных факторов. Эта систематизация не может претендовать на универсальный гидрогеологический анализ, поскольку она предназначена для оптимизации изучения техногенного режима подземных вод на различных стадиях освоения месторождений — для целенаправленного определения фильтрационных параметров и характеристик питания дренируемых водоносных горизонтов с учетом общих закономерностей техногенного режима подземных вод.

Принимая во внимание степень сложности фильтрационных процессов, развивающихся при строительстве и эксплуатации горнодобывающих предприятий, целесообразно выделить по этому признаку три типа техногенного режима подземных вод. Каждый тип режима может быть представлен несколькими видами, которые различаются условиями питания дренируемых водоносных горизонтов или комплексов, зависящими от геолого-структурных особенностей месторождений.

Поскольку характер техногенного режима подземных вод в предлагаемой систематизации увязан с геолого-структурными особенностями изучаемых территорий, то можно отождествить выделение типов и видов режима подземных вод с ранжированием месторождений по этим же факторам. Типизация месторождений по характеру техногенного режима полезна для выбора расчетной гидродинамической схемы при целенаправленной оценке гидрогеологических параметров и прогнозе изменений естественного режима подземных вод на конкретном объекте. Нужно оговорить, что предлагаемая систематизация не дает оснований для суждения о степени сложности гидрогеологических условий ведения горных или дренажных работ. Такие оценки требуют привлечения дополнительных критериев, главными из которых являются водообильность и литологический состав дренируемых водоносных комплексов.

Систематизация дренажных водонесных горизонтов по характеру тектонического режима

| Тип тектонического режима породных массивов | Вид тектонического режима дренажных водонесных горизонтов | Основные признаки тектонического режима водонесных горизонтов | Факторы, определяющие условия формирования в характер тектонического режима породных вод | Историческое значение |
|---|---|---|---|---|
| 1. Нестационарный | 1.1. Резко нестационарный, неслучайный по параметрам режим водонесных горизонтов и условий на их границах | Снижение уровня и аккумуляция водонесных горизонтов в течение всего периода эксплуатации дренажа | Крупное или малое количество водонесных пластов, представленных метаморфизованными преципитационными осадочными породами с выщелоченной водонесной способностью | Малое количество атмосферных осадков, слабое развитие гидрофизических сетей, отсутствие связи с богами на площади месторождения |
| 1.2. Нестационарный, неслучайный по параметрам дренажных горизонтов | Снижение уровня водонесных горизонтов в их расходе в период эксплуатации месторождения | Гораздо большее или меньшее количество водонесных пластов метаморфизованных преципитационных пород с малой водонесной способностью | Гораздо большее или меньшее количество водонесных пластов метаморфизованных преципитационных пород с малой водонесной способностью | Умеренное количество тектонических осадков, слабое развитие гидрофизических сетей, слабая связь с богами на площади месторождения |
| 1.3. Временно неслучайный | Значительное снижение уровня в течение периода строительства на первом этапе эксплуатации горнодобывающих предприятий | Тренирующее горнодобывающее значение пластов песчано-глинистых осадочных пород, высокая водоотдача при эксплуатации безводных горизонтов, небольшая мощность породных отложений | Средняя или высокая интенсивность атмосферных осадков, наличие водонесных и водоотводящих горизонтов, высокая водоотдача при эксплуатации безводных горизонтов, небольшая мощность породных отложений | Средняя или высокая интенсивность атмосферных осадков, наличие водонесных и водоотводящих горизонтов, высокая водоотдача при эксплуатации безводных горизонтов, небольшая мощность породных отложений |

[illegible]

1.3. Дренаж карьерных и шахтных полей и его влияние на техногенный режим подземных вод

Как уже отмечалось, разнообразные дренажные мероприятия, которые проводятся на месторождениях полезных ископаемых, оказывают влияние на формирование и закономерности техногенного режима подземных вод. Поэтому полезно рассмотреть условия применимости различных типов дренажей, которые должны учитываться при прогнозе техногенного режима подземных вод. Задачи дренажа в период строительства и эксплуатации горнодобывающих предприятий можно свести к следующим:

- 1) обеспечение нормальных условий эксплуатации горнотранспортного оборудования;
- 2) обеспечение устойчивости бортов карьеров или нормальной эксплуатации подземных горных выработок различного назначения;
- 3) обеспечение безопасности горных работ (особенно при подземном способе эксплуатации месторождения);
- 4) снижение влажности полезного ископаемого;

Дренажное оборудование карьерных и шахтных полей с целью обеспечения нормальных условий эксплуатации горнотранспортного оборудования должно быть направлено прежде всего на сокращение водопритоков в разрезные траншеи и карьеры, в шахтные стволы, капитальные и подготовительные выработки шахт, в очистные забои. Эта задача является наиболее очевидной и обычно связана со вскрытием горными выработками водообильных водоносных горизонтов и комплексов. Однако для месторождений, в строении которых принимают участие рыхлые песчаные или мягкие глинистые породы, дренажные мероприятия должны обеспечивать предотвращение фильтрационных деформаций на бортах карьеров или в подземных горных выработках. Такие локальные деформации могут развиваться систематически и существенно затруднять работу горного и транспортного оборудования, резко снижать его эффективность [41].

Важным направлением дренажных мероприятий является снижение напоров водоносных комплексов, обеспечивающее изменение напряженного состояния массива горных пород, вскрываемого карьерами. Снижение гидростатических сил и гидродинамического давления может существенно влиять на повышение общей устойчивости бортов карьеров [24, 41] и обеспечивать эффективность открытых горных работ. Дренажированию в этом случае подлежат водоносные пласты, залегающие во вскрышной толще или в лежащем боку месторождения, независимо от их водообильности. Чаще всего оптимальные результаты достигаются при снижении напоров в слабопроницаемых прочных (полускальных) породах; вместе с тем в этом варианте организация дренажа связана с преодолением максимальных трудностей.

Снижение напоров в водоносных пластах, залегающих в кровле или почве подземных горных выработок, осуществляется с целью предотвращения прорывов подземных вод или разжиженных разностей рыхлых пород. В зависимости от масштабов возможных прорывов (их интенсивности, продолжительности, объема вынесенной породы) и назначения подземной горной выработки (ствол, подготовительная выработка, очистной забой) дренажные мероприятия обеспечивают либо нормальные условия эксплуатации горнотранспортного оборудования и самих выработок, либо безопасность подземных горных работ в целом.

Наконец, снижение влажности полезного ископаемого достигается либо непосредственным осушением последнего с помощью дренажных средств, либо осушением вмещающих пород и предотвращением скоплений подземных вод у очистных забоев карьеров и шахт.

Сформулированные цели дренажных мероприятий достигаются при их организации с применением различных дренажных средств, выбор которых зависит от конкретных условий месторождения и способа его эксплуатации. В частности, при ведении горных работ открытым способом в зависимости от степени сложности гидрогеологических условий применяется либо открытый водоотлив из карьера, либо глубинные средства дренажа. Сложность гидрогеологических условий определяется совокупностью ряда факторов, главными из которых являются литологический состав пород продуктивной толщи, водообильность водоносных горизонтов во вскрышной толще, необходимость снижения напоров в подошве карьера (табл. 1.2).

Применение открытого водоотвода и водоотлива ограничивается простыми гидрогеологическими условиями освоения месторождения. Обычно это месторождения, сложенные слабопроницаемыми полускальными породами, поэтому водоприток к карьеру не приводят к существенному осложнению в производстве горных работ; вода может быть отведена к водосборникам и удалена из карьера водоотливными установками открытого типа. В этих условиях наблюдаются обычно минимальные нарушения естественного режима подземных вод и поэтому не возникает крупных проблем с изучением и прогнозом техногенного режима. Прогнозные оценки сводятся к определению водопритока к карьеру на разные этапы его развития с учетом атмосферных осадков. В особых случаях оцениваются изменения уровня режима подлежащих охране водоносных горизонтов.

В некоторых вариантах открытый водоотлив применяется для сработки естественных запасов подземных вод, приуроченных к рыхлым песчано-галечниковым отложениям, перекрывающим продуктивную толщу. Такая организация дренажа обычно связана с периодом строительства карьера — с вскрытием полезного ископаемого разрезной траншеей. Иногда она пролон-

**Классификация месторождений полезных ископаемых
по сложности гидрогеологических условий их разработки
открытым способом**

| Группа месторождений по сложности гидрогеологических условий их освоения | Характеристика гидрогеологических и инженерно-геологических условий эксплуатации месторождений | |
|--|--|---|
| | Тип 1. Карьером вскрываются рыхлые песчаные и мягкие глинистые породы | Тип 2. Карьером вскрываются полускальные породы, не склонные к размоканию и набуханию |
| I. Простые | Горные работы могут проводиться с применением средств открытого водоотлива при притоках подземных вод не более 200 м ³ /ч. На стадии строительства карьера возможно временное применение водопонижающих скважин с суммарным дебитом не более 400 м ³ /ч. | Горные работы проводятся с применением средств открытого водоотлива при притоках подземных вод до 500 м ³ /ч или при использовании нескольких водопонижающих скважин с тем же суммарным дебитом. |
| II. Сложные | Нормальные условия производства горных работ обеспечиваются за счет эксплуатации средств глубинного дренажа с производительностью 200—1000 м ³ /ч. | Нормальные условия производства горных работ обеспечиваются за счет эксплуатации средств глубинного дренажа с производительностью 500—3000 м ³ /ч. |
| III. Особо сложные | Притоки подземных вод в карьер превышают 1000 м ³ /ч. Во вскрышной толще дренажу подлежат несколько водоносных горизонтов с применением водопонижающих скважин или подземного дренажного комплекса. В подошве карьера дренируется напорный горизонт для обеспечения общей устойчивости бортов карьера. Для определения фильтрационных параметров требуется опытно-эксплуатационное водопонижение. | Притоки подземных вод в карьер превышают 3000 м ³ /ч. Для сокращения водопритоков требуется применение средств глубинного дренажа — водопонижающих скважин или подземного дренажного комплекса. В подошве карьера залегает напорный водоносный пласт, существенно влияющий на общую устойчивость бортов. |

гируется и на период эксплуатации карьера, когда откачка подземных вод осуществляется из передовых (пионерных) траншей. В таких условиях открытым водоотливом могут откачиваться огромные объемы подземных вод и их техногенный режим существенно зависит от этих дренажных мероприятий.

Наряду со средствами открытого водоотлива на месторождениях с простыми гидрогеологическими условиями могут при-

меняться некоторые вспомогательные средства локального дренажа: горизонтальные или наклонные самотечные скважины и разгрузочные самоизливающие скважины, вскрывающие напорные водоносные горизонты в подошве или в бортах карьера.

Горизонтальные скважины бурятся на рабочем борту карьеров, где они служат для интенсификации осушения водоносных пластов небольшой мощности, пластов или залежей полезного ископаемого, характеризующихся, как правило, низкой проницаемостью. В этом случае горизонтальные скважины оказывают минимальное влияние на характер техногенного режима подземных вод. Горизонтальные скважины могут также буриться и со стороны нерабочего борта для перехвата подземного потока, приуроченного к водоносному горизонту, питание которого осуществляется за счет близко расположенных водоемов и водотоков. В этом варианте горизонтальные скважины служат для снижения уровней мощных водоносных горизонтов с целью обеспечения устойчивости нерабочего борта за счет уменьшения сил гидростатического взвешивания. В целом эксплуатация горизонтальных скважин обеспечивает локальный эффект на фоне общего дренажного действия карьера, поэтому несущественно влияет на формирование и характер техногенного режима подземных вод.

Разгрузочные скважины, которые бурятся с подошвы или с уступов-карьера, обычно предназначаются для снятия напоров в водоносных пластах малой проницаемости, поэтому их дренажный эффект ограничен сравнительно малыми площадями и имеет временный характер. Тем не менее при использовании таких скважин в массовом масштабе они в совокупности могут оказывать существенное влияние на режим водоносных горизонтов, залегающих в подошве карьера.

Глубинный дренаж осуществляется или водопонижающими скважинами, оборудованными погружными насосами, или подземным дренажным комплексом (стволами, дренажными штреками, оборудованными сквозными и забивными фильтрами, колодцами в почве выработок). Применение глубинного дренажа необходимо при разработке месторождений со сложными гидрогеологическими условиями, характеризующимися высокими и устойчивыми водопитоками в карьер, наличием рыхлых песчано-глинистых пород во вскрышной толще, склонных к фильтрационным деформациям на уступах бортов карьера. Подземные дренажные комплексы использовались на крупнейших месторождениях, разрабатываемых открытым способом, таких как Лебединское, Стойленское, Михайловское, Соколовско-Сарбайское (железородные), Ирша-Бородинское, Назаровское, Экибастузское (угольные).

В последнее время явно наметилась тенденция к сокращению объемов дренажных мероприятий, связанных с эксплуатацией подземных дренажных комплексов. Этот способ осушения

находит применение для месторождений, вскрышная толща которых имеет слоистое строение при чередовании относительных водоупоров с водоносными слабопроницаемыми пластами малой мощности. Эффективность подземных дренажных систем зачастую определяется возможностью централизации внутрикарьерного водоотлива, оперативной организации водоотвода на подошве карьера. В целом подземные дренажные комплексы применяются в тех случаях, когда использование водопонижающих скважин становится неэффективным. В частности, техническое несовершенство насосного оборудования долгие годы сдерживало масштабы использования водопонижающих скважин, применение которых ограничивалось глубинами 100—200 м.

В настоящее время основным ограничением в применении водопонижающих скважин является главным образом малая проницаемость рыхлых пород, подлежащих дренажу (коэффициенты фильтрации песков должны быть более 1 м/сут). Трещиноватые породы могут с успехом осушаться скважинами при коэффициентах фильтрации более 0,5 м/сут. Проводимость дренируемых водоносных пластов и их напоры должны обеспечивать дебит, при котором гарантируется устойчивая работа погружных насосов. Водопонижающие скважины обладают некоторыми безусловными преимуществами перед подземной системой дренажа: возможность широкого варьирования места заложения скважины, минимальные сроки сооружения систем скважин, экономическая эффективность таких систем.

Следовательно, водопонижающие скважины являются наиболее универсальным и перспективным способом осушения карьерных полей. Они могут служить для опережающего осушения прибортовой части массивов, сложенных как полускальными породами, так и рыхлыми песчаными отложениями. Техническая эффективность водопонижающих скважин в этом случае резко повышается при падении слоев вглубь откоса, что позволяет полностью исключить высачивание подземных вод на борт и подошву карьера. Водопонижающие скважины с успехом применялись при строительстве и эксплуатации самых крупных карьеров СССР — на Лебединском, Стойленском, Михайловском, Соколовско-Сарбайском, Коршуновском железорудных месторождениях, на Нерюнгринском, Павловском, Харанорском, Березовском угольных месторождениях.

Эксплуатация систем водопонижающих скважин приводит обычно к формированию техногенного режима на больших площадях, к существенным нарушениям водного баланса в районах месторождений. Следует отметить, что в этих условиях резко повышаются требования к надежности прогнозных оценок техногенного режима подземных вод, так как закономерности этого режима зачастую определяют условия эксплуатации водопонижающих скважин. С этих позиций перспектива использования водопонижающих скважин стимулирует выдвижение самых высоких требований к исходным гидрогеологиче-

ским параметрам, к методике натурных экспериментов и наблюдений.

На шахтных полях специальные дренажные мероприятия проводятся в целом в меньших масштабах, чем при разработке месторождений открытым способом. Дренаж здесь обычно выполняется на месторождениях, сложенных либо рыхлыми песчано-глинистыми породами, либо карбонатными породами чрезвычайно высокой проницаемости. В остальных случаях подземные воды принимаются непосредственно капитальными, подготовительными, очистными выработками и откачиваются на поверхность средствами шахтного водоотлива.

Месторождения, разрабатываемые подземным способом, также классифицируются в зависимости от степени сложности их гидрогеологических условий (табл. 1.3). Дренажные мероприятия осуществляются на месторождениях со сложными и особо сложными гидрогеологическими условиями для обеспечения нормальных условий эксплуатации горнотранспортного оборудования и безопасности горных работ. В широких масштабах дренаж шахтных полей проводится в Подмосковном угольном бассейне, где по технологическим требованиям напоры подземных вод в пластах песчано-глинистых отложений, залегающих в кровле подготовительных выработок, не должны превышать 10 м, а в кровле очистных выработок допустимые напоры не должны быть более 1 м. Аналогичные требования к снижению напоров в песчано-глинистых отложениях предъявляются в условиях Боровичского месторождения огнеупорных глин. Можно отметить, что необходимость снижения напоров в слабопроницаемых водоносных пластах влечет за собой вынужденное параллельное дренирование сопредельных водоносных горизонтов, представленных карбонатными породами высокой проницаемости, т. е. приводит к изменению режима подземных вод на обширных территориях.

Существенное влияние дренажных мероприятий на режим подземных вод прослеживается при осушении карбонатных закарстованных пород. Наиболее ярким примером таких условий являются дренажные работы на СУБР, где водопонижение проводится в течение многих лет и привело к формированию техногенного режима в региональном масштабе [1]. Решающую роль в этом районе играют так называемые дренажные узлы, представляющие собой группы водопонижающих скважин.

Применение дренажных мероприятий, как правило, приводит к максимальным нарушениям естественного режима подземных вод в горнодобывающих районах. Эти нарушения имеют прямую зависимость от порядка проведения дренажа, мощности водопонижительных установок, времени их эксплуатации, что существенно затрудняет оценки закономерностей техногенного режима. Наряду с дренажными мероприятиями на месторождениях со сложными и особо сложными гидрогеологическими условиями, (согласно предлагаемой типизации) могут

**Классификация месторождений полезных ископаемых
по сложности гидрогеологических условий их разработки
подземным способом**

| Группа месторождений по сложности гидрогеологических условий их освоения | Характеристика гидрогеологических и инженерно-геологических условий эксплуатации месторождений | |
|--|--|--|
| | Тип 1. Подземными выработками вскрываются рыхлые песчаные и мягкие глинистые породы | Тип 2. Подземными выработками вскрываются полускальные породы, не склонные к размоканию и набуханию |
| I. Простые | <p>Притоки подземных вод в шахту не превышают 100 м³/ч</p> <p>Проходка подготовительных выработок производится без предварительного водопонижения — в их почве и кровле залегают надежные водопоры, гарантирующие отсутствие концентрированных водоправлений (прорывов)</p> | <p>Притоки подземных вод в шахту не превышают 400 м³/ч</p> <p>Проходка подготовительных выработок производится без предварительного водопонижения</p> <p>Мощность отрабатываемого пласта в 60—80 раз меньше мощности перекрывающей его слабопроницаемой толщи</p> |
| II. Сложные | <p>Притоки подземных вод в шахту составляют 100—500 м³/ч</p> <p>Для проходки подготовительных выработок необходимо предварительное снижение напоров. При ведении очистных работ требуются дополнительные дренажные мероприятия для предотвращения прорывов подземных вод с дебитами до 20 м³/ч</p> | <p>Притоки подземных вод в шахту составляют 400—2000 м³/ч</p> <p>При проходке подготовительных выработок проводятся дренажные мероприятия. Мощность толщи слабопроницаемых пород в кровле вынимаемого пласта превышает его мощность в 40—60 раз. При ведении подготовительных и очистных работ возможны прорывы подземных вод с дебитами до 100 м³/ч</p> |
| III. Особо сложные | <p>Притоки подземных вод в шахту превышают 500 м³/ч. При проходке подготовительных выработок и ведении очистных работ требуются дренажные мероприятия для предотвращения прорывов воды и песка с дебитами более 20 м³/ч. Для обоснования параметров дренажных систем требуется проведение опытно-эксплуатационного водопонижения</p> | <p>Притоки подземных вод в шахту превышают 2000 м³/ч. Мощность слабопроницаемой толщи в кровле вынимаемого пласта превышает его мощность в 30—40 раз. Выше этой толщи расположен водный объект. Для предотвращения прорывов воды с дебитами более 100 м³/ч необходимы дренажные мероприятия при подготовительных и очистных работах</p> |

быть запланированы особые технологические мероприятия, ограничивающие водопритоки в подземные выработки (камерные системы выемки полезного ископаемого, закладка выработанного пространства, создание слабопроницаемых завес вблизи капитальных выработок и т. д.). Выбор направления инженерных мероприятий должен определяться технико-экономическим сравнением вариантов с учетом вопросов охраны подземных вод от истощения и загрязнения.

1.4. Основные недостатки гидрогеологического изучения месторождений полезных ископаемых на стадии их разведки и освоения

Упущения в гидрогеологическом изучении месторождений полезных ископаемых на стадии их разведки можно объективно оценить, обобщая опыт непосредственного анализа техногенного режима подземных вод в горнодобывающих районах. Поскольку прогноз техногенного режима подземных вод включает в себя разносторонние оценки условий освоения месторождений, требования к изученности последних во многом диктуются необходимостью решения серии взаимосвязанных технических задач, в основе которых лежит гидрогеологический анализ конкретного объекта. На первом плане при этом стоит задача обеспечения эффективных и безопасных условий отработки месторождений, которая решается в зависимости от степени влияния подземных вод на эти условия. Поэтому требования к исходной гидрогеологической информации, к направленности и объему гидрогеологических исследований контролируются прежде всего задачами горнотехнологического плана. Именно в этой области проявляется необходимость в увязке методики гидрогеологического изучения месторождения со схемами его отработки, со схемами дренирования карьерных или шахтных полей.

Однако не только прагматические потребности горного производства определяют требования к гидрогеологической изученности месторождений. При прогнозе техногенного режима подземных вод приходится учитывать и другие технические, а также **социальные задачи народнохозяйственного развития**, в первую очередь задачи, связанные с охраной подземных вод от истощения и загрязнения, с комплексным использованием водных ресурсов горнодобывающего района. Возрастающая значимость таких задач, соответствующие дополнительные требования к исходной гидрогеологической информации заставляют обратить пристальное внимание на некоторые негативные аспекты постановки гидрогеологического изучения месторождений полезных ископаемых на стадии их разведки и эксплуатации.

На практике чаще всего приходится сталкиваться с недостаточной изученностью гидрогеологической структуры место-

рождений по площади и по глубине развития дренируемых водоносных горизонтов и комплексов. Эта группа недостатков гидрогеологических работ объясняется слабой их увязкой с прогнозными гидродинамическими схемами, характеризующими условия эксплуатации месторождения. Согласно многим нормативно-методическим документам площадь гидрогеологической разведки ограничивается в основном участком развития продуктивной залежи. На стадии эксплуатации месторождения сеть наблюдательных пьезометров также нередко тяготеет к площади первоочередных горных работ в ущерб периферийным участкам изучаемой территории. Между тем изучение гидрогеологической структуры и фильтрационных свойств вмещающих пород на обширной площади, в пределах которой возможно нарушение естественного режима подземных вод, диктуется необходимостью получения таких важных для прогноза исходных данных, как границы потенциального питания водоносных горизонтов при их дренаже, гидрогеологические параметры этих горизонтов, характеристики их питания по площади. Эти данные определяют прогнозные оценки эффективности заградительного дренажа, условий истощения и загрязнения подземных вод, изменения экологической обстановки территории при снижении уровней подземных вод. Для ряда горнодобывающих районов чрезвычайно острой проблемой становится совместное решение задач водоснабжения и дренажа, которое может быть успешным лишь при широком масштабе гидрогеологического изучения территории.

Недостаточная изученность гидрогеологической структуры по глубине обычно заключается в отсутствии данных, характеризующих водоносные горизонты в лежащем боку месторождения, что чаще всего характерно для месторождений, на которых такие горизонты представлены слабопроницаемыми породами. Этот недостаток разведки выявляется в лучшем случае при проектировании горнодобывающего предприятия, но чаще всего при его эксплуатации, когда напоры в лежащем боку месторождения приводят к нарушению устойчивости бортов карьера или к возникновению прорывов в подземных выработках. Необходимость снижения напоров таких горизонтов является стимулом для определения их проводимости, пьезопроводности, параметров питания и связи со смежными горизонтами. Определенные требования должны предъявляться к изучению химического состава подземных вод, приуроченных к лежащему боку месторождения, которые могут оказывать существенное влияние на изменение химического режима водоносных комплексов, перекрывающих полезное ископаемое и дренируемых при эксплуатации месторождения. Немаловажное значение имеет изучение закономерности изменения с глубиной проницаемости продуктивного комплекса для оценки мощности активной зоны, формирующейся при дренировании месторождения.

Кроме нерационального ограничения масштабов изучения конкретного месторождения довольно часто выявляются недостатки в детальности исследований, особенно заметные в тех случаях, когда отдельный элемент геологической структуры является принципиально важным, «слабым» звеном в общей гидродинамической схеме объекта. Нередко остаются без должного внимания такие трудно поддающиеся изучению элементы структуры, как относительные «водоупоры», гидрогеологические «окна», тектонические нарушения, фаціальная изменчивость водоносных пластов и водоупоров в разрезе, тонкие прослои слабых пород и т. д. Эти геологические элементы зачастую играют доминирующую роль при развитии процессов перетекания между взаимодействующими горизонтами, при формировании особых условий разгрузки подземных вод по площади подземных горных выработок или многоярусного высачивания на бортах карьеров, при возникновении деформаций бортов и уступов на карьерах или прорывов в подземных горных выработках. Свойства относительных водоупоров нередко определяют возможность «самоочищения» загрязненных подземных вод при фильтрации их в сторону дренируемых водоносных горизонтов.

Далее можно отметить, что при гидрогеологическом изучении месторождений полезных ископаемых требуется более тщательный учет условий на потенциальных контурах дренажа, в качестве которых выступают горные выработки. Основные трудности возникают при оценке условий формирования водопритоков в подземные горные выработки, в частности при прогнозировании высоты зоны водопроводящих трещин над выработанным пространством, которая определяет целесообразность более тщательного изучения параметров пересекаемых водоносных пластов. На стадии разведки месторождения эти вопросы могут решаться на основе методов геологической аналогии, направленных на более тесную увязку прогнозируемых геомеханических и соответствующих гидродинамических процессов. Уточнение таких прогнозных оценок следует выполнять на первых стадиях эксплуатации месторождений на основе целенаправленных наблюдений за режимом подземных вод и по результатам специальных экспериментальных работ (в наиболее ответственных случаях).

На стадии разведки и при эксплуатации месторождений следует уделять большее внимание составу и свойствам покровных отложений, их неоднородности в плане и в разрезе, что имеет существенное значение для анализа и прогноза техногенного режима с учетом возможной неравномерности инфильтрационного питания по площади дренируемых горизонтов и комплексов. Решение этой задачи возможно при организации целенаправленной гидрогеологической съемки территории месторождения. Бóльшее внимание необходимо уделять изучению условий взаимосвязи поверхностных и подземных вод (со-

ставу и фильтрационным свойствам подрусловых отложений), а также изучению условий просачивания атмосферных осадков и талых вод. Здесь полезно заметить, что оценки характеристик питания подземных вод должны базироваться в основном на результатах режимных наблюдений, тесно увязанных с информацией о метеоусловиях и с геологическими характеристиками покровных отложений. Этому вопросу уделяется явно недостаточное внимание при планировании и проведении как разведочных работ, так и гидрогеологических работ на действующих предприятиях.

Серьезного внимания заслуживают вопросы комплексирования исследований физико-механических и фильтрационных свойств отдельных разностей пород. В частности, для оценки естественных запасов подземных вод, аккумулярованных в песчано-глинистых отложениях, целесообразна постановка (наряду с опытными опробованиями водоносных комплексов) специальных компрессионных испытаний глинистых разностей. Весьма полезны массовые определения гранулометрического состава песчаных отложений, если имеется перспектива установления корреляционных связей проводимости водоносных пластов с этим показателем. Требуется совершенствования методики установления корреляционной связи между трещиноватостью и проницаемостью водоносных комплексов в плане и в разрезе.

Следует подчеркнуть, что многие геологические, метеорологические и другие характеристики могут выступать в качестве критериев физического правдоподобия расчетных гидродинамических схем и фильтрационных параметров, поэтому оценка этих характеристик должна являться составной частью комплексного гидрогеологического изучения объекта. Оценка склонности отдельных литологических разностей к набуханию, размоканию, плывуности необходима в тех случаях, когда эти их свойства определяют условия ведения горных работ, контролируют направленность и объемы дренажных мероприятий, а следовательно, масштабы осушения месторождения.

Отмеченные частные недостатки в требованиях к геологической и гидрогеологической изученности месторождений не исчерпывают всех претензий к современной методике изучения месторождений. С этих позиций можно выделить главные направления в совершенствовании научно-методических основ гидрогеологических исследований на месторождениях полезных ископаемых. В первую очередь следует указать на необходимость рационального распределения исследований на различных стадиях освоения месторождений. Например, определение параметров питания и взаимосвязи водоносных горизонтов должно проводиться преимущественно на стадии строительства и эксплуатации горнодобывающих предприятий, хотя предварительные оценки этих параметров могут быть получены и на стадии разведки. В этой связи возникает вопрос о ранжиро-

вании гидрогеологических условий месторождений по этому принципу. Кроме того, можно поднять вопрос о необходимости запланированной корректировки проектов разведочных работ по ходу их выполнения. Техничко-экономическая эффективность подобных организационных мероприятий очевидна, так как сокращение объемов разведочных работ возможно и целесообразно за счет перенесения крупномасштабных опытно-фильтрационных опробований или режимных наблюдений на первые стадии строительства горнодобывающего предприятия.

Совершенствование методики гидрогеологических исследований на месторождениях со сложными условиями должно вестись в следующих основных направлениях:

- развитие гидрогеомеханического подхода к постановке исследований гидродинамических и инженерно-геологических процессов, определяющих условия формирования водопритоков в подземные горные выработки и фильтрационные деформации на уступах бортов карьеров;

- совершенствование методики гидрогеологической разведки и режимных наблюдений с учетом закономерностей прогнозируемого техногенного режима подземных вод, определяемых планируемыми горными и дренажными работами;

- планирование и интерпретация натурных наблюдений (экспериментов) на основе широкого использования возможностей математического моделирования фильтрационных процессов;

- повышение информативности натурных экспериментов (наблюдений) за счет внедрения современной метрологической аппаратуры, в первую очередь датчиков гидростатического давления для измерения напоров в слабопроницаемых отложениях (при опытных откачках и при режимных наблюдениях);

- рациональное сочетание опытно-фильтрационных опробований водоносных комплексов и режимных наблюдений с гидрогеофизическими исследованиями в скважинах, позволяющими прежде всего уточнить гидрогеологическое строение опробуемого массива и обосновать расчетную интерпретационную схему.

2. ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОГЕННОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ РАЗВЕДКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2.1. Основные цели, принципы и методы гидрогеологических исследований на месторождениях полезных ископаемых

Конечной целью гидрогеологических исследований на месторождениях полезных ископаемых является прогнозная оценка техногенного режима подземных вод. Дифференцированный подход к решению ряда технических и инженерно-экологических проблем, связанных с практикой проектирования, строительства и эксплуатации горнодобывающих предприятий, отражается в выделении следующих частных прогнозных задач:

- определение водопритоков к горным выработкам;
- прогноз уровней (напоров) подземных вод вблизи горных выработок для оценки степени осушения массива горных пород и определения его напряженного состояния;
- оценка эффективности запроектированных дренажных систем, определение их оптимальных параметров и водопритоков к ним;
- прогноз уровней (напоров) подземных вод в районе месторождения при строительстве и эксплуатации горнодобывающих предприятий, систем дренажа и водоснабжения, гидротехнических сооружений и других инженерных объектов, в совокупности определяющих особенности техногенного режима подземных вод;
- прогноз изменений химического состава подземных вод, обусловленных нарушением естественного гидродинамического режима и появлением потенциальных или явных источников загрязнения подземных вод.

Каждая из перечисленных задач гидрогеологического прогноза может быть конкретизирована с учетом более узких практических потребностей горного дела и увязана с обеспечением нормальных условий водоснабжения, сельскохозяйственного землепользования и т. д. Важно отметить, что возрастающие масштабы горнодобывающих предприятий определяют их региональное воздействие на окружающую среду, причем вопросы охраны последней, приобретая вполне самостоятельное значение, нередко контролируют направленность, методику и объемы гидрогеологических исследований. Сложность комплексного подхода к прогнозу техногенного режима подземных вод зачастую усугубляется противоположностью требований к решению частных задач прогноза (например, к задачам дренажа

и водоснабжения). В этой связи должны непременно повышаться требования к качеству прогноза, которое обеспечивается прежде всего надежностью исходных гидрогеологических данных, всесторонним учетом режимообразующих факторов, совершенствованием научно-методических основ и технических средств изучения прогнозируемых гидрогеологических процессов.

Комплексный характер прогноза требует привлечения современных математических методов, которые должны использоваться не только непосредственно для прогноза, но и для обоснования направленности, объемов и методики проведения натурных экспериментов с учетом задач прогноза, а также для обработки результатов экспериментов и режимных наблюдений с целью определения достоверных гидрогеологических параметров, условий питания водоносных горизонтов.

Успешное изучение гидрогеологических условий месторождений полезных ископаемых на всех стадиях их освоения возможно, если специалист-гидрогеолог не только достаточно уверенно ориентируется в вопросах, касающихся геологической и физико-математической сущности изучаемого и прогнозируемого процессов, но и разбирается в технических, технологических аспектах организации горных и дренажных работ, а также придерживается определенных принципов гидрогеологических исследований. Все эти требования вытекают из необходимости выполнения гидрогеологических исследований на следующей принципиальной основе:

- исследования на всех стадиях освоения месторождения планируются и проводятся с учетом, проверкой и корректировкой результатов предыдущих этапов изучения природного объекта, с непрерывным уточнением представлений о нем;

- результаты исследований представляются на каждом этапе в виде прогнозной модели, которая должна отражать весь накопленный объем информации и предусматривать возможность адаптации расчетной схемы, т. е. дальнейшего уточнения, совершенствования, «самообучения» этой схемы по мере поступления новой информации;

- направленность, объемы и методика исследований должны контролироваться обратной связью методологии изучения природного объекта со спецификой проектируемого сооружения, с характером прогнозируемого процесса, с целью и задачами прогноза.

Практическая реализация этих принципов выражается в нормированной этапности разведочных работ и проектирования, однако основным недостатком в планировании исследований гидрогеологических условий месторождений полезных ископаемых является формальная увязка последовательных этапов исследований, отсутствие или неполнота количественного анализа имеющейся информации для оценки целесообразности, направленности и объемов изысканий на очередном этапе.

Необходимый количественный анализ накопленный гидрогеологической информации возможен лишь в рамках расчетной схемы-модели изучаемого объекта, поэтому неперенным требованием к исследованиям является создание и уточнение такой схемы в ходе изысканий на каждом этапе и оформление ее по окончании изыскательских работ с оценкой эффективности последних и с формулировкой задач дальнейших исследований.

В настоящее время характерной ситуацией является планирование разведочных и опытных работ, главным образом, на основе экспертных (субъективных) оценок условий эксплуатации проектируемого сооружения. Между тем расчетная схема-модель должна учитывать специфику работы проектируемого сооружения, представление о которой также должно уточняться в ходе исследований путем обязательных прогнозных оценок техногенного режима подземных вод. Таким образом, общим пробелом в организации исследований является недостаточная согласованность между гидрогеологическим анализом качественного характера, который отражает состояние объекта на той или иной стадии изучения, и математической схемой-моделью сложного прогнозируемого процесса.

Гидрогеологические прогнозы основаны на применении методов, выбор которых зависит в каждом конкретном варианте от стадии изучения месторождения, направленности прогноза и от сложности техногенного режима подземных вод. В практике гидрогеологического прогнозирования условий освоения месторождений полезных ископаемых применяются следующие методы: балансовый, аналогии, статистические, гидродинамический.

Балансовый метод и методы аналогии характеризуются весьма скромными возможностями с точки зрения их точности и широты сферы применения. В частности, балансовый метод позволяет прогнозировать водопритоки к обобщенной группе горных выработок, что далеко не полностью удовлетворяет практические запросы горного производства, включающие определение уровня режима водоносных горизонтов и дифференциацию водопритоков к отдельным горным выработкам и дренажным системам. Этот метод может быть применен при наличии информации о количественных характеристиках подземного и поверхностного стока, а также данных об интенсивности питания подземных вод; надежность оценки этих характеристик, как правило, проблематична, что также снижает эффективность балансового метода.

Разнообразные методы гидродинамической аналогии применяются для прогноза водопритоков к одиночным выработкам (или к группе выработок, рассматриваемой в качестве обобщенного стока) на основе информации о фактических водопритоках к подобным (по технологии проходки) выработкам, сооружениям в тех же гидрогеологических условиях. Эта

группа методов применяется либо на первых стадиях проектирования, либо для оперативного прогнозирования водопритока к отдельной выработке после накопления соответствующих статистических данных в процессе отработки конкретного шахтного или карьерного поля.

До настоящего времени нет достаточно обоснованных критериев для выбора шахт-аналогов (или карьеров-аналогов), и в перспективе такое обоснование вряд ли возможно, так как оно требует высокой степени изученности гидрогеологических условий проектируемого предприятия, обширной информации о природных и горнотехнологических условиях эксплуатации шахты-аналога. Совершенствование методов аналогий, по сути дела, сводится к разработке методики решения обратной задачи по определению обобщенных гидрогеологических параметров, используемых для прогноза водопритоков. Несмотря на то что некоторые эмпирические зависимости и приемы, лежащие в основе методов аналогий, успешно применяются в практике конкретных угольных бассейнов (Печорского, Донецкого, Кузнецкого), критерии их обоснованности в лучшем случае сводятся к формальным оценкам корреляции, поэтому привлекательная простота этих методов, по существу, не гарантирует их эффективности и надежности.

Методы аналогии позволяют решить лишь частный вопрос (прогноз водопритоков к выработке), но не дают возможности прогнозировать уровенный режим подземных вод, а также учитывать взаимодействие горных выработок с дренажными сооружениями. Поэтому полная оценка техногенного режима подземных вод не может быть выполнена на основе этой группы методов.

Статистические методы по направленности и возможностям примыкают к методам аналогии, являясь развитием последних, так как они предполагают статистическую обработку результатов наблюдений за притоками к горной выработке и базируются на установлении корреляционных зависимостей водопритоков от природных и горнотехнологических факторов [1, 2]. Применение этих методов ограничивается прогнозом водопритока к одиночной выработке, а их надежность зависит от степени обоснованности корреляционных связей.

Универсальным расчетным методом следует считать гидродинамический метод, который позволяет прогнозировать режим подземных вод как в локальном, так и в региональном масштабе, оценивать любые элементы режима. Являясь частным приложением методов математической физики, этот метод базируется на решении уравнений, представляющих собой математическую модель рассматриваемого гидрогеологического процесса. Практическая реализация гидродинамического метода основана либо на использовании конечных аналитических зависимостей, либо на применении численных методов решения дифференциальных уравнений фильтрации.

Конечные аналитические зависимости получены для относительно простых (типовых) гидродинамических схем, характеризующихся плановой и профильной однородностью водоносного пласта, простейшей конфигурацией области фильтрации, простыми условиями на ее границах, линейностью рассматриваемого фильтрационного процесса. Между тем в практике проектирования, строительства и эксплуатации горнодобывающих предприятий наиболее характерными являются схемы, в рамках которых учитывается взаимодействие стоков с разными граничными условиями на них (например, заданный напор на горных выработках и заданный расход на скважинах). В этом отношении расчетные схемы, типичные для задач шахтной гидрогеологии, могут рассматриваться как особо сложные в отличие от схем, рассматриваемых при решении задач водоснабжения, сложности которых чаще всего ограничиваются учетом взаимодействия скважин с однородными условиями (с заданными расходами). Аналитические расчетные методы не позволяют учитывать весь комплекс факторов, осложняющих техногенный режим фильтрации (взаимодействие дренажных и горных выработок, сложная конфигурация области фильтрации, ее неоднородность, нелинейность процесса фильтрации).

Универсальным аппаратом фильтрационных расчетов в рамках гидродинамического метода является решение дифференциальных уравнений фильтрации на вычислительных машинах (численное моделирование) или электрических моделях. Математическое моделирование (численное или аналоговое) представляется наиболее эффективным техническим средством, которое позволяет решать широкий круг задач, возникающих в связи с гидрогеологическими исследованиями на месторождениях полезных ископаемых, и в частности при прогнозе техногенного режима подземных вод. Достоинства математического моделирования при решении прогнозных задач проявляются в том, что оно позволяет получать в рамках единой модели полные прогнозные оценки режима подземных вод, осложненного практически любым комплексом факторов (фильтрационная неоднородность водоносных пластов, сложные условия на их границах, нестационарность, нелинейность фильтрационных процессов, разновременное введение источников — стоков).

Математические модели могут быть эффективно использованы как для решения всех указанных выше частных прогнозных задач, так и для комплексного прогноза техногенного режима подземных вод. Однако применение математического моделирования для прогнозных оценок может быть оправдано лишь при высокой информативности натурных наблюдений и экспериментов, обеспечивающей в конечном итоге достоверность комплексного прогноза. В связи с этим перспективным является совершенствование методики математического моде-

лирования с целью его использования для планирования целенаправленных экспериментальных работ и режимных наблюдений, а также для интерпретации их результатов.

Принимая эту перспективу во внимание и обращаясь к принципу обратной связи изучения конкретного объекта со спецификой прогнозной ситуации, можно дифференцировать направленность гидрогеологических исследований на месторождениях, различающихся характером техногенного режима подземных вод (см. табл. 1.1). Так, при изучении месторождений I типа наряду с параметрами проводимости дренируемых водоносных пластов основное внимание следует уделять оценке естественных запасов подземных вод. На месторождениях II типа кроме этих гидрогеологических параметров изучению подлежат факторы, определяющие интенсивность инфильтрационного питания водоносных горизонтов, сезонную неравномерность инфильтрации. При изучении месторождений III типа максимальные усилия должны быть направлены на оценку параметров связи поверхностных и подземных вод, на определение характеристик инфильтрационного питания водоносных горизонтов, параметров взаимосвязи последних. Исследования в указанных направлениях должны проводиться как на стадии разведки, так и в период эксплуатации месторождения.

Материалы разведочных работ являются первичной информацией для обоснования исходной схемы-модели, которая в дальнейшем требует проверки и уточнения. Оценка качества исходной схемы может быть эффективно осуществлена на математической модели, на которой проверяется прежде всего согласованность данных об уровнях (напорах) естественного потока и независимо полученной информации о распределении по полю фильтрационных параметров (определенных по результатам опытно-фильтрационных работ). Как правило, такая проверка позволяет одновременно оценить степень информативности проведенных разведочных работ и режимных наблюдений, достоинства и недостатки их интерпретации, а также определить направление, целесообразный объем и регламент дополнительных исследований.

Таким образом, уже на стадии разведочных работ моделирование может быть использовано как эффективный метод гидрогеологических исследований, позволяющий уточнить общую схему фильтрации подземных вод в естественных условиях, оценить возможную неоднородность водоносных горизонтов, установить наличие их питания по площади. Однако нужно отметить, что интерпретация результатов разведочных работ на моделях чаще всего не дает возможности однозначно оценить гидрогеологические условия освоения месторождения, что связано с принципиальной ограниченностью возможностей опытных опробований, с объективными трудностями в оценке условий питания и взаимосвязи водоносных пластов. Тем не менее полезность моделирования очевидна, хотя бы с той точки

зрения, что на разведочной модели можно провести предварительный анализ чувствительности расчетной схемы (с учетом прогнозных условий эксплуатации горных выработок и дренажных сооружений). Благодаря такому анализу выделяются участки, на которых необходимо в первую очередь организовать режимные наблюдения и дополнительные опытно-фильтрационные работы для уточнения исходной модели на следующем этапе исследований.

Максимальной информативностью характеризуются режимные наблюдения, организованные на первых этапах развития горных работ, при проведении строительного водопонижения. На основе результатов этих наблюдений можно, как правило, существенно уточнить представления о характере питания и неоднородности водоносного горизонта. В частности, лишь на этом этапе появляется возможность (при наличии соответствующих наблюдательных скважин) выявить роль водотоков и водоемов в общем балансе питания подземных вод, а также определить характер и параметры взаимосвязи отдельных горизонтов, оценить характеристики их инфильтрационного питания. Режимные наблюдения, организованные на этой стадии освоения месторождения, сводят до минимума отрицательное влияние масштабного фактора на выбор расчетной схемы, если наблюдаемые возмущения водоносных горизонтов соизмеримы с ожидаемыми при дальнейшей эксплуатации горнодобывающего предприятия. Кроме того, в результатах режимных наблюдений находят отражение горнотехнологические факторы, непосредственное влияние которых на техногенный режим подземных вод не может быть оценено на стадии разведки.

В частности, при развитии очистных работ появляется возможность уточнить схему сдвижения горных пород и соответствующую гидродинамическую схему по результатам наблюдений за водопритоками в горные выработки и за изменениями уровней (напоров) водоносных горизонтов, залегающих над этими выработками [8, 42, 43]. На этом этапе может быть реализована увязка представлений о процессе сдвижения с гидродинамическим режимом дренируемых водоносных горизонтов; критерием согласованности этих схем является зафиксированная при наблюдениях реакция дренируемых водоносных горизонтов на их подработку (см. раздел 2.4).

Наряду с обоснованием схематизации условий на горных выработках на этом этапе возможно решение обратных задач по определению фильтрационных параметров, условий питания водоносных горизонтов, характеристик их взаимосвязи. Исходной информацией для решения обратных задач служат материалы режимных наблюдений за напорами подземных вод, водопритоками к горным выработкам и к дренажным сооружениям (см. гл. 5).

Интерпретация результатов режимных наблюдений должна выполняться при разумном сочетании аналитических методов

и математического моделирования в зависимости от сложности гидрогеологического объекта, объема и качества исходной информации о нем. В частности, оценка параметров слоистых водоносных комплексов может быть проведена только на математических моделях, позволяющих расшифровать плановую и профильную фильтрационную неоднородность, определить характеристики разделяющих водоупоров. Очевидно, что определение параметров слоистых водоносных комплексов возможно лишь при ощутимых перепадах напоров взаимодействующих горизонтов.

Наличие инфильтрационного питания водоносных горизонтов также существенно осложняет интерпретацию результатов режимных наблюдений. Определение интенсивности инфильтрации с одновременным уточнением проводимости горизонтов требует применения математического моделирования, на основе которого можно оценить изменения интенсивности инфильтрации в годовом цикле и в процессе водопонижения.

Результаты режимных наблюдений на стадии строительного водопонижения являются надежным источником информации о естественных запасах подземных вод. Отметим, что результаты опытных откачек, проводимых в условиях напорного режима, не дают возможности оценить гравитационную водоотдачу рыхлых или трещиноватых пород; проведение кратковременных откачек в безнапорных горизонтах зачастую также не позволяет достоверно определить расчетную гравитационную водоотдачу при малых понижениях уровней подземных вод. Анализ нестационарной фильтрации с целью определения расчетных значений водоотдачи (зачастую изменяющихся по площади) возможен лишь с привлечением математических моделей, воспроизводящих длительный период элипнуса [6, 29].

Наиболее эффективны непрерывные гидрогеологические исследования и наблюдения, по результатам которых математическая модель объекта может уточняться по мере поступления новой информации и сопоставления результатов прогноза и фактического хода водопонижения. Непрерывность и систематичность режимных наблюдений обеспечивают оценку нелинейности фильтрационных процессов, определение количественных закономерностей в изменении расчетных гидрогеологических параметров, позволяют установить корреляционные связи этих изменений с горнотехнологическими и природными факторами.

Поэтому полноценные режимные наблюдения целесообразно интерпретировать на постоянно действующих математических моделях [29]. Такие модели дают возможность наряду с определением фильтрационных параметров обоснованно наметить направление дальнейших наблюдений и опытных работ с целью уточнения существующих представлений об объекте. Эти модели позволяют также оптимизировать методику наблюдений, в частности обосновать рациональный регламент наблюдений, ориентируясь на энтропийность поступающей информации [25],

и выполнить целенаправленный анализ чувствительности расчетной схемы [6]. Применение постоянно действующих моделей позволяет практически осуществить идею о целесообразности проведения в процессе исследований поэтапной схематизации, направленной на последовательное улучшение расчетной схемы рассматриваемого объекта. Следовательно, постоянно действующая модель одновременно реализует все три основных принципа, лежащие в основе рационального изучения гидрогеологических и инженерно-геологических условий освоения месторождений [21, 25] (непрерывность исследований, обратная связь схематизации с прогнозируемыми процессами, адаптация математической модели).

Прогнозная оценка закономерностей техногенного режима подземных вод в региональном масштабе является наиболее сложной задачей, которая может быть решена только с применением моделирования. На первый план при решении прогнозных региональных задач выступает вопрос о гидрогеологической схематизации, являющейся основой доброкачественности любого прогноза. Возможность уточнения расчетной схемы непосредственно на модели по ходу решения прогнозной задачи является принципиально важным преимуществом моделирования.

Высокая информативность математической модели позволяет параллельно рассмотреть многовариантную прогнозную оценку условий эксплуатации горных выработок или дренажных сооружений (в частности, определить оптимальное количество и производительность дренажных скважин). В этом плане моделирование (применяемое в сочетании с технико-экономическими расчетами) может рассматриваться как совершенный вычислительный аппарат, используемый для оптимизационных оценок параметров проектируемых дренажных систем и схем отработки месторождения, влияющих на техногенный режим подземных вод. Моделирование позволяет рассмотреть аналог натурального эксперимента, проследить взаимосвязь отдельных элементов изучаемой системы, наметить программу наблюдений при выполнении эксперимента и методику интерпретации его результатов.

Достигнутый к настоящему времени уровень технического развития моделирования, состояние его научно-методических основ позволяют считать его не только совершенным вычислительным средством, но и самостоятельным методом гидрогеологических исследований. Достоинство моделирования как метода научных исследований проявляется прежде всего в том, что оно может эффективно использоваться на всех этапах гидрогеологических работ, в частности при изучении и прогнозе условий конкретных месторождений полезных ископаемых.

Математическое моделирование процесса фильтрации осуществляется на электронных вычислительных машинах (ЭВМ) и аналоговых вычислительных машинах (АВМ). В настоящее

время доминирующую роль среди аналоговых моделей играют электрические аналоги фильтрационных процессов. Технические (и некоторые принципиальные) различия реализации решения на ЭВМ или аналоговой модели не влияют на общность этих видов математического моделирования фильтрационных процессов.

Можно отметить, что электрические модели по сравнению с численными благодаря принципиальной и технической простоте обладают весьма важными преимуществами, которые проявляются прежде всего при схематизации гидрогеологических условий (при решении обратных задач).

Главным достоинством электрических моделей является их простота и наглядность, которая, психологически воздействуя на оператора-гидрогеолога, улучшает понимание объекта изучения, усиливает познавательную активность исследователя, что имеет первостепенное значение при изучении сложных гидрогеологических процессов.

Техническая «гибкость» электрической модели, возможность воспроизведения любой гидродинамической схемы позволяет эффективно осуществлять ее адаптацию, перестройку отдельных ее элементов. Поэтому решение обратных гидрогеологических задач по конкретным объектам в настоящее время базируется на использовании АВМ, что объясняется не только соображениями технико-экономического порядка, но и отмеченными выше принципиальными моментами. Предпочтение, отдаваемое в этой области АВМ, объясняется прежде всего тем, что решение обратных задач осуществляется на основе неформальных логических операций при пересмотре различных вариантов, подкрепляемых, как правило, скудной исходной информацией. Вместе с тем применение ЭВМ для решения обратных задач в дальнейшем может оказаться более перспективным по сравнению с АВМ. Одновременно можно отметить, что при решении обратных задач на электрических моделях вычислительные машины целесообразно применять параллельно для подготовительных операций и обработки промежуточной информации.

В целом можно сделать вывод о высокой эффективности электрических моделей при решении практических задач, связанных с анализом и прогнозом нарушенного режима на конкретных месторождениях.

Применение ЭВМ в настоящее время целесообразно для рассмотрения ряда однотипных вариантов расчетных схем. При этом следует учитывать, что ЭВМ в силу сложности математического обеспечения и технического обслуживания доступны в настоящее время лишь крупным организациям, занятым разработкой методических вопросов гидрогеологических исследований. Подобная ситуация не может считаться удовлетворительной, так как разработка машинных программ и их широкое внедрение в практику гидрогеологических исследований является необходимым элементом научно-технического прогресса в рассматриваемой области. Дальнейшее развитие численного моделирования может быть основано на опыте использования электрических моделей для изучения и прогноза фильтрационных процессов.

Таким образом, математическое моделирование является эффективным методом изучения и прогноза техногенного ре-

жима подземных вод, поэтому ему уделяется повышенное внимание и при дальнейшем рассмотрении методических вопросов гидрогеологических исследований.

2.2. Опытно-фильтрационные работы при изучении гидрогеологических условий месторождений на стадии их разведки*

Представление о прогнозируемом техногенном режиме подземных вод формируется на стадии разведки месторождений по результатам их геологического и гидрогеологического изучения. Основной задачей разведки является определение гидрогеологической структуры месторождения, фильтрационных параметров водоносных горизонтов, условий их питания и взаимосвязи. Надежность прогнозных оценок техногенного режима подземных вод находится в прямой зависимости от качества этой исходной гидрогеологической информации. Для решения отмеченных гидрогеологических задач проводится комплекс исследований, включающий в первую очередь опытнo-фильтрационные опробования водоносных горизонтов и наблюдения за режимом подземных вод.

Несмотря на то что методика проведения и интерпретации опытнo-фильтрационных работ в настоящее время разработана достаточно детально [3, 25], качество получаемых исходных данных зачастую не отвечает предъявляемым к ним требованиям. Одной из основных причин низкой информативности опытнo-фильтрационных работ является слабая их методологическая увязка с прогнозными гидродинамическими схемами.

Для оптимизации гидрогеологических исследований при разведке угольных и рудных месторождений целесообразно ориентироваться на определенные расчетные схемы, отражающие основные особенности прогнозируемого техногенного режима подземных вод на изучаемых шахтных и карьерных полях. При этом следует учитывать необходимость проведения по результатам детальной разведки многоцелевого гидрогеологического прогноза техногенного режима подземных вод. Прогнозные схемы должны не только отражать природные (геологические и гидрогеологические) особенности месторождения того или иного типа, но и учитывать горнотехнологические факторы, определяющие, в частности, характер геомеханических процессов, развивающихся при ведении горных работ и контролирующих развитие фильтрационных процессов.

Оценка каждого объекта может быть проведена по результатам предварительной разведки на базе методов геологической аналогии; на стадии детальной разведки она может быть

* Раздел написан И. Б. Петровой и Ю. А. Норватовым с участием А. Б. Анисимова

скорректирована и в дальнейшем уточнена по результатам режимных наблюдений на первых стадиях эксплуатации шахты или карьера.

Не претендуя на систематическое изложение всех вопросов, связанных с направленностью, организацией и методикой гидрогеологической разведки месторождений различного типа, рассмотрим возможности реализации основных принципов гидрогеологических исследований при выполнении опытно-фильтрационных работ на угольных и сланцевых месторождениях. Эти месторождения приурочены, как правило, к слоистым водоносным толщам, что предопределяет особую сложность техногенного режима подземных вод в пределах карьерных и шахтных полей. Определение фильтрационных параметров слоистых толщ требует специфического подхода и является в настоящее время наиболее актуальной научно-технической задачей в области методики опытно-фильтрационных работ.

Следует особо подчеркнуть необходимость дифференциации схем формирования техногенного режима подземных вод в слоистых комплексах в зависимости от способа отработки месторождения (открытого или подземного). Рассматриваемые ниже схемы подразделяются в зависимости от основного источника изменений гидродинамического режима, который может развиваться либо под влиянием одних лишь горных выработок (А), либо за счет необходимой эксплуатации дренажных сооружений (В). В этом отношении предлагаемая систематизация расчетных гидродинамических схем (рис. 2.1) может быть увязана с типизацией шахтных и карьерных полей по условиям их осушения (см. раздел 1.3).

Предлагаемая систематизация прогнозных гидродинамических схем конечной своей целью имеет обоснование требований к исходной гидрогеологической информации, определяемых в зависимости от совокупности природных и горнотехнических факторов. В прогнозных схемах, отвечающих условиям подземной разработки угля и сланца, отражен интегральный горнотехнологический фактор — высота зоны водопроводящих трещин, развивающихся при ведении подземных горных работ с обрушением кровли. На стадии планирования детальной разведки параметры зоны могут учитываться на базе методов геологической аналогии с последующим уточнением этих оценок на стадии эксплуатации шахты. Такой подход практически реализует не только принцип непрерывности изучения гидрогеологического объекта, но и принцип адаптации расчетной гидродинамической схемы.

Дифференциация прогнозных гидродинамических схем достаточно полно отражает разнообразие горно-геологических условий угольных и сланцевых месторождений. В частности, схема I отвечает таким условиям эксплуатации угольных шахт, при которых в процессе очистных работ зона водопроводящих трещин над выработанным пространством пересекает наиболее

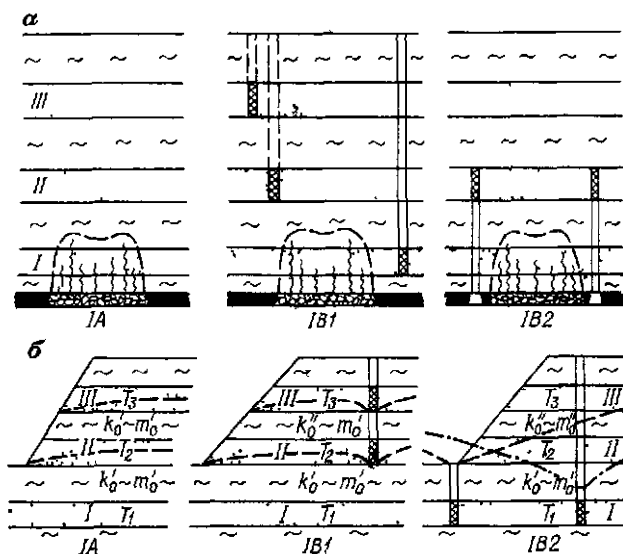


Рис 2.1 Прогнозные схемы для обоснования требований к гидрогеологическим параметрам применительно к подземному (а) и открытому (б) способам разра-
ботки месторождений

водообильный из нескольких водоносных пластов, залегающих в кровле выработок (рис. 2.1, а).

Вариант IA этой схемы соответствует типичным условиям эксплуатации ряда шахт в Кузбассе, Донбассе, Карагандинском и других бассейнах. Варианты IB1 и IB2 соответствуют условиям Подмосковского угольного и отчасти Прибалтийского сланцевого бассейнов. Схема I предполагает, что обводненность горных выработок определяется главным образом водопритоками по контуру очистных работ («боковым» притоком).

В отличие от схемы I схема II, являясь наиболее типичной для угольных месторождений, характеризуется преобладанием водопритоков в горные выработки за счет перетекания по площади очистных работ. В частности, водопритоки могут формироваться за счет перетекания из водоносного горизонта с практически неограниченными естественными ресурсами. Верхний из трех водоносных пластов данной схемы может быть представлен четвертичным водоносным горизонтом. Подобные условия характерны для шахт Кизеловского бассейна, отдельных шахт Львовско-Волынского бассейна.

Схема III может рассматриваться как частный случай схемы II, так как водопритоки в шахты в этом случае формируются также за счет перетекания по площади очистных работ. Однако для схемы III характерно явное взаимодействие всех трех водоносных пластов, проявляющееся в различной интенсивности их осушения при ведении подземных работ или при

проведении дренажных мероприятий. Техногенный режим, отвечающий схеме III, отличается особой сложностью, что предопределяет выделение этой схемы и специфический подход к ее изучению на стадии разведки и эксплуатации месторождения. Эта схема отражает условия эксплуатации шахт южной части Эстонского сланцевого бассейна, Ленинградского сланцевого месторождения, ряда шахт Подмосквовного и Печорского бассейнов.

Предлагаемые далее три прогнозные схемы отражают (с определенной долей условности) широкий круг условий эксплуатации угольных и сланцевых карьеров. Прогнозные схемы учитывают взаимодействие угольного и надугольного водоносных комплексов и дифференцируются по структурному признаку. Эти схемы подразделяются также по условиям эксплуатации карьера с применением и без применения средств глубинного дренажа. Отметим, что в данном случае нижний из трех водоносных горизонтов может быть представлен угольным пластом. В частности, схема I (рис. 2.1, б) соответствует условиям, при которых угольный пласт является основным, наиболее водообильным горизонтом слоистой толщи. Схема IA характерна для ряда карьеров, которые вскрывают слабопроницаемые отложения, представленные полускальными породами (с организацией только открытого водоотлива). Схемы IB1 и IB2 отражают условия эксплуатации карьеров, вскрывающих рыхлые песчано-глинистые отложения; необходимое для обеспечения нормальной эксплуатации карьеров осушение производится с применением средств глубинного дренажа. Схемы II и III соответствуют условиям, при которых горизонты с максимальной проводимостью приурочены к надугольным отложениям; эти условия достаточно типичны для многих угольных разрезов Кузбасса и сланцевых карьеров Эстонского месторождения.

Требования к исходной гидрогеологической информации для оценки техногенного режима подземных вод при подземном и открытом способах разработки месторождений угля и сланца представлены в табл. 2.1 и 2.2. Следует обратить внимание на то, что наиболее жесткие требования к составу исходной гидрогеологической информации и к ее достоверности характерны для схем, отражающих варианты эксплуатации карьеров с применением средств глубинного дренажа. Гидродинамические схемы, отражающие особенности техногенного режима подугольного водоносного комплекса при эксплуатации шахт и карьеров, в целом идентичны схемам, соответствующим варианту подработки надугольного водоносного комплекса подземными выработками (по требованиям к исходной информации и по постановке опытно-фильтрационных работ).

Рассмотренные прогнозные гидродинамические схемы отвечают условиям формирования техногенного режима в многопластовых комплексах, в частности представленных тремя водоносными пластами, разделенными относительными водоупорами.

Следует отметить, что методика проведения и интерпретации опробований трехпластовых систем (два водоносных горизонта, разделенных относительным водоупором) разработана достаточно детально и нашла отражение в соответствующей литературе.

Интерпретация опытных откачек в многопластовой системе вызывает значительные осложнения ввиду отсутствия строгих аналитических зависимостей для расчета параметров взаимодействующих пластов и относительных водоупоров. Для оценки фильтрационных параметров многопластовых систем необходимо повышение информативности опытных опробований, а также совершенствование вычислительного аппарата за счет использования математического моделирования для интерпретации результатов опытно-фильтрационных работ. Рекомендации по совершенствованию методики опытных опробований многослойных водоносных систем представлены в табличной форме, отражающей специфику подземных и открытых горных работ (табл. 2.3 и 2.4), а также на рис. 2.2 и 2.3.

Комментируя предлагаемые рекомендации, в целом следует еще раз отметить, что при необходимости организации дренажных мероприятий требования к исходным фильтрационным параметрам должны существенно повышаться. Для выполнения этих требований и повышения информативности опытных откачек рекомендуется широко использовать современную измерительную аппаратуру — датчики гидростатического давления [32]. При опробовании слоистых комплексов достоинства малоинерционных датчиков проявляются в следующем:

- установка датчиков в проницаемых пластах дает возможность детально проанализировать начальный этап откачки, когда пласт «работает» как изолированный (датчики позволяют сделать 12—15 измерений напора за минуту);

- установка датчиков в относительных водоупорах позволяет однозначно зафиксировать начало «отжатия» воды из последних и диагностировать процесс перетекания между взаимодействующими горизонтами;

- при большой мощности разделяющего водоупора и его низкой проницаемости ($k_0 < 10^{-4}$ м/сут) датчики гидростатического давления, установленные в водоупоре являются единственным приемлемым средством для получения информации, позволяющей оценить пьезопроводность водоупора вкост пластов с последующим определением коэффициента фильтрации слабопроницаемых отложений;

- при суммарном опробовании слоистой системы гирлянды датчиков обеспечивают определение проводимости отдельных водоносных пластов (при параллельном проведении расходомерии) и оценку времени наступления квазистационарного режима фильтрации;

- установка гирлянд датчиков дает возможность оценить структуру потока в пределах слоистой толщи.

Систематизация прогнозных гидродинамических схем и требований к фильтрационным параметрам при изучении условий эксплуатации шахт

| Группа прогнозных схем, выделяемая с учетом условий разгрузки наиболее водообильного (основного) из дренируемых водоносных горизонтов | Тип расчетной схемы с учетом задач прогноза и сложности гидрогеологических условий эксплуатации шахты | Фильтрационные параметры прогнозных ² расчетных схем, подлежащие определению или оценке |
|--|--|--|
| I. Основной (наиболее водообильный) водоносный горизонт I вскрывается горной выработкой или зоной водопроводящих трещин над выработанным пространством (ЗВТ) | I.A. Прогноз напоров дренируемых водоносных горизонтов и водопритоков в шахту, эксплуатируемую в простых гидрогеологических условиях без применения средств глубинного дренажа | Оценка суммарной проводимости водоносного комплекса $T_{\text{сум}}$ и средневзвешенного коэффициента пьезопроводности $a_{\text{ср}}$ |
| | I.B1. Прогноз напоров дренируемых водоносных горизонтов и водопритоков в шахту, эксплуатируемую в сложных гидрогеологических условиях с применением средств глубинного дренажа, обеспечивающих сокращение водопритоков в горную выработку; оценка параметров системы дренажа | 1. Определение фильтрационных параметров I водоносного горизонта (T_1, a_1). 2. Определение суммарной проводимости и средневзвешенного коэффициента пьезопроводности II и III водоносных горизонтов (T_2-3, a_2-3). 3. Оценка фильтрационной характеристики I относительного водоупора (k'_0/m'_0) |
| | I.B2. Прогноз напоров дренируемых водоносных горизонтов и водопритоков в шахту, эксплуатируемую с применением средств глубинного дренажа, обеспечивающих ликвидацию опасности прорывов из II водоносного горизонта; оценка параметров системы дренажа | 1. Определение суммарных фильтрационных параметров I, II и III водоносных горизонтов ($T_1, a_1, T_2, a_2, T_3, a_3$). 2. Определение фильтрационных характеристик I и II относительных водоупоров ($k'_0/m'_0, k''_0/m''_0$) |

| | | |
|---|---|---|
| II. Основной водный горизонт II не выражается горной выработкой (или 3ВГ) и отделен от верхней сабгоризонтальной оторочки (отдельным водоупором) | II.A. Проток паров дренажных водных горизонтов и водоупоров в шахту, эксплуатируемую в простых гидро- или геологических условиях без применения средств районного дренажа | 1. Определение проницаемости I и II водных горизонтов (T_1, T_2) 2. Определение среднего коэффициента пористости I и II водных горизонтов ($\mu_{ср}$) 3. Определение фильтрационной характеристики I отсасывающего водоноска ($K_{ф.отс}$) |
| II.B. Проток паров дренажных водных горизонтов и водоупоров в шахту, эксплуатируемую в сложных гидрогеологических условиях с применением средств глубокого дренажа, обеспечивающих сокращение водоупоров в горную выработку или ликвидацию опасности прорывов из II водного горизонта, оценки параметров системы дренажа | II.B. Проток паров дренажных водных горизонтов и водоупоров в шахту, эксплуатируемую в сложных гидрогеологических условиях с применением средств глубокого дренажа, обеспечивающих сокращение водоупоров в горную выработку или ликвидацию опасности прорывов из II водного горизонта, оценка параметров системы дренажа | Аналогично схеме I.B.2 |
| III. Основная водная толща III отделен от горной выработки (или 3ВГ) двумя отсасывающими водоупорами и основным водоупором меньшей проницаемостью | III.A. Проток паров дренажных водных горизонтов и водоупоров в шахту, эксплуатируемую в простых гидрогеологических условиях без применения средств глубокого дренажа | 1. Определение проницаемости I водоносного горизонта (T_1) 2. Определение фильтрационных характеристик I и II отсасывающих водоупоров ($K_{ф.отс}, K_{ф.уп}$) 3. Определение фильтрационных параметров III водоносного горизонта (T_3, μ) |
| III.B. Проток паров дренажных водных горизонтов и водоупоров в шахту, эксплуатируемую в сложных гидрогеологических условиях с применением средств глубокого дренажа, обеспечивающих сокращение водоупоров в горную выработку или ликвидацию опасности прорывов из II водоносного горизонта, оценка параметров системы дренажа | III.B. Проток паров дренажных водных горизонтов и водоупоров в шахту, эксплуатируемую в сложных гидрогеологических условиях с применением средств глубокого дренажа, обеспечивающих сокращение водоупоров в горную выработку или ликвидацию опасности прорывов из II водоносного горизонта, оценка параметров системы дренажа | Аналогично схеме I.B.2 (проницаемость добавлена к параметру отсасывающего водоупора) III отсасывающих водоупоров |

Систематизация прогнозируемых схем и требований к физическим параметрам при изучении условий эксплуатации карьеров

| Группа прогнозируемых схем, выделяемая с учетом условий разработки залежей и особенностей их строения | Условия эксплуатации карьеров при разработке залежей с учетом их строения и особенностей их строения | Формализованные параметры прогнозируемых схем, выделяемых с учетом особенностей их строения |
|---|--|--|
| 1. Разработка залежей открытым способом | 1. А. Прогнозируемые II и III группы залежей, подлежащих разработке открытым способом, в зависимости от их строения и особенностей их строения | 1. Определенная проходимость II группы залежей (P_{II}) 2. Определенная проходимость III группы залежей (P_{III}) 3. Определенная проходимость залежей с учетом особенностей их строения $(P_{III}^{(1)})$ 4. Определенная проходимость залежей с учетом особенностей их строения $(P_{III}^{(2)})$ |
| 1. Разработка залежей открытым способом | 1. А. Прогнозируемые II и III группы залежей, подлежащих разработке открытым способом, в зависимости от их строения и особенностей их строения | 1. Определенная проходимость II группы залежей (P_{II}) 2. Определенная проходимость III группы залежей (P_{III}) 3. Определенная проходимость залежей с учетом особенностей их строения $(P_{III}^{(1)})$ 4. Определенная проходимость залежей с учетом особенностей их строения $(P_{III}^{(2)})$ |
| 1. Разработка залежей открытым способом | 1. А. Прогнозируемые II и III группы залежей, подлежащих разработке открытым способом, в зависимости от их строения и особенностей их строения | 1. Определенная проходимость II группы залежей (P_{II}) 2. Определенная проходимость III группы залежей (P_{III}) 3. Определенная проходимость залежей с учетом особенностей их строения $(P_{III}^{(1)})$ 4. Определенная проходимость залежей с учетом особенностей их строения $(P_{III}^{(2)})$ |

II. Водобольный водо-осевый горизонт III залегают в верхней части вскрышной толщи

II.A. Прогноз напоров II и III дренаруемых водонесных горизонтов и оценка водопитов в карьере, эксплуатируемый в простых гидрогеологических условиях без применения средств глубокого дренажа; водопитов и открытых водотлив щелевобораз на промежуточной борте борта

1. Определение проводимости II и III водонесных горизонтов (T_2, T_3).
2. Оценка фильтрационной характеристики II относительного водоупора (k_0/m_0)

II.B1. Прогноз напоров II и III дренаруемых водонесных горизонтов и оценка водопитов в карьере, эксплуатируемый в сложных гидрогеологических условиях с применением средств глубокого дренажа; оценка параметров системы дренажа вскрышной толщи

1. Определение фильтрационных параметров II и III водонесных горизонтов (T_2, a_2, T_3, a_3); повышенные требования к их надежности.
2. Определение фильтрационной характеристики II относительного водоупора (k_0/m_0)

II.B2. Прогноз напоров I водонесного горизонта, экранированного относительным водоупором от подошвы карьера и влияющего на общую устойчивость борта; оценка параметров системы дренажа подугольной толщи

- Дополнительно к схеме I.B2 определение фильтрационной характеристики II относительного водоупора (k_0/m_0) и проводимости III водонесного горизонта (T_3)

Рекомендуемые схемы обследования элементов толщ на месторождениях, предназначенных для разработки подземным способом

| Тип проектной расчетной схемы | Цели обследования и/или обследования | Классификация опытного куста геологических элементов | Дополнительные измерения по оборудованию опытного куста |
|--|--|--|--|
| I.A | Кустовая отметка из I водонесущего горизонта | 2-3 пьезометра на I водонесущий горизонт; 1-2 пьезометра, оборудованных раздатками на II и III водонесущих горизонтах | |
| I.B1 | 1. Групповая отметка из I водонесущего горизонта 2. Кустовая отметка из II и III водонесущих горизонтов (суммарное обследование) | 1. 4-5 пьезометров на I водонесущий горизонт 2. 2-3 пьезометра, оборудованных на II и III водонесущих горизонтах | |
| I.B2 | 1. Групповая отметка из I водонесущего горизонта 2. Кустовая отметка из II и III водонесущих горизонтов (раздельное обследование) | 1. 4-5 пьезометров на I водонесущий горизонт 2. 3-4 пьезометра на II и III водонесущих горизонтах | Связанная с датчиками гидрометрического давления (1 датчик во I водонесущем горизонте; 2 датчика в I относительно водонесущего) |
| II.A | 1. Створная отметка из II водонесущего горизонта 2. Кустовая отметка из I водонесущего горизонта | 1. 4-5 гидрогеологических скважин на II водонесущий горизонт 2. 3-4 пьезометра на I водонесущий горизонт; 2 пьезометра на III водонесущем горизонте | Связанная с датчиками гидрометрического давления (по 1 датчику в I водонесущем горизонте и I относительно водонесущего; 2-3 датчика в I относительно водонесущего) |

| Табл. расчетной схемы | Целеобразные виды опробования | Конструкция опытного куста гидрогеологических скважин | Детальные решения по оборудованию опытного куста |
|-----------------------------|--|---|---|
| II.B | 1. Групповая откачка из II водонесного горизонта 2. Кустовые откачки из I и III водонесных горизонтов (раздельное опробование) | 1. 4-5 пьезометров на II водонесный горизонт 2. 2-3 пьезометра на III водонесный горизонт. 3-4 пьезометра из I водонесный горизонт | Две скважины с детскими пьезостатического давления (по I скважину в I водонесном горизонте и II скважину в I водонесном горизонте. 3-4 скважины в I водонесном горизонте) |
| III.A | Кустовые откачки из I, II и III водонесных горизонтов (раздельное опробование) | 3-4 скважины пьезометра на каждый из опробуемых горизонтов | Связки с детскими пьезостатического давления (по I скважину в I водонесном горизонте, по 2-3 скважины в I и II водонесных горизонтах) |
| III.B | 1. Групповая откачка из III водонесного горизонта 2. Скважины откачки из II водонесного горизонта 3. Кустовая откачка из I водонесного горизонта | 1. 4-5 пьезометров на III водонесный горизонт 2. 2-4 гидрогеологических скважины на II водонесный горизонт 3. 2-3 пьезометра на I водонесный горизонт | Две скважины с детскими пьезостатического давления (по I скважину в I водонесном горизонте, 2-4 скважины в отношении I и II водонесных горизонтов) |

Рекомендуемые схемы отработанных систем толш на месторождениях, предназначенных для разработки отработым способом

| Тис. 1 представ- ляющая схему | Центро-образные или отработанные | Конструктив отработанных систем | Дополнительные рекомендации по оборудованию отработанных систем |
|--|--|---|---|
| 1.А | Кустовые системы из II и III вод- ных систем (раздельные отработанные системы) | 2-3 предмета на каждый из отработанных горизонтов | — |
| 1.В1 | 1. Гидро-отделка из II вод- ной системы 2. Системы оттока из III вод- ной системы | 1. 4-5 предмета на II вод- ной системе 2. 4-5 гидро-отделочных свя- зей (оборудованных на III вод- ной системе) | Две системы с разными гидро- отделочными системами (по I и II и III вод- ной системе) с разными 2-3 предмета на II вод- ной системе |
| 1.В2 | Кустовые системы из I и II вод- ных систем (раздельные от- работанные системы) | 3-4 предмета на каждый из отработанных горизонтов | Системы с разными гидро- отделочными системами (по I и II и III вод- ной системе) с разными 2-3 предмета на I вод- ной системе |

| Тип проектной расчетной схемы | Целесообразные виды обустройства | Конструирование опытного куста гидростатических скважин | Дополнительные рекомендации по оборудованию опытного куста |
|--|--|--|---|
| II.A | Кустовые откачки из II и III водоносных горизонтов (раздельное обустройство) | 4—5 пьезометров на каждый из опробуемых водоносных горизонтов | Скважина с датчиками гидростатического давления (1 датчик во II водоносном горизонте, 1 датчик в подошве II относительного водоупора) |
| II.B1 | 1. Групповая откачка из III водоносного горизонта 2. Кустовая откачка из II водоносного горизонта | 1. 4—5 пьезометров на III водоносный горизонт 2. 3—4 совершенных пьезометра на II водоносный горизонт | Скважина с датчиками гидростатического давления (по 1 датчику во II и III водоносных горизонтах, 2—3 датчика во II относительном водоупоре) |
| II.B2 | Кустовые откачки из I, II и III водоносных горизонтов (раздельное обустройство) | 3—4 пьезометра на каждый из опробуемых горизонтов | Две скважины с датчиками гидростатического давления: первая — 1 датчик в I водоносном горизонте, 2—3 датчика в I относительном водоупоре; вторая — 1 датчик во II водоносном горизонте, 2—3 датчика во II относительном водоупоре |

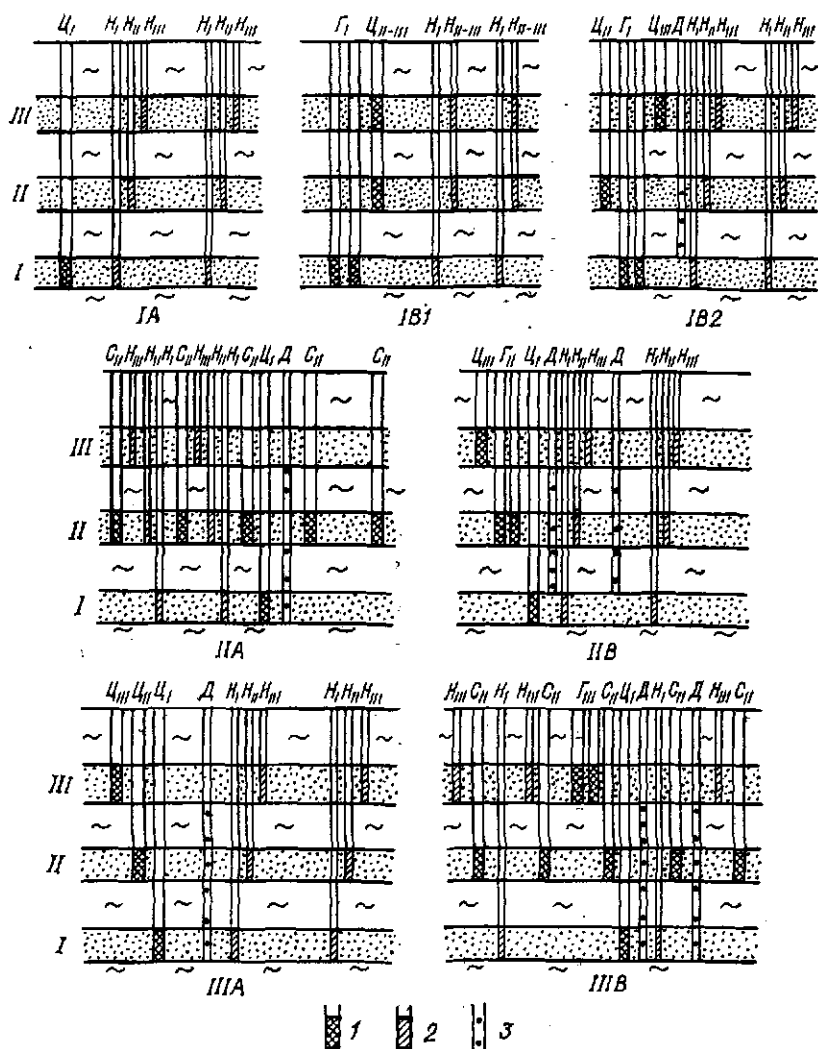


Рис. 2.2. Схемы опробования слоистых водоносных толщ на месторождениях, предназначенных для разработки подземным способом.

1 — опробуемые интервалы слоистой толщи (оборудованные фильтрами водопонижающих скважин); 2 — интервалы установки пьезометров (фильтров наблюдательных скважин) в водоносных пластах; 3 — положение датчиков гидростатического давления в слоистой водоносной толще.

I, II и III — индексы водоносных пластов опробуемой слоистой толщи; Ц — центральная (водопонижающая) скважина для кустовой откачки; Н — наблюдательная скважина гидрогеологического куста; Д — скважина (станция) с датчиками гидростатического давления; Г — водопонижающие скважины для групповой откачки; С — гидрогеологические скважины для створовых откачек.

Для выполнения опытно-фильтрационных работ целесообразно использовать малогабаритные датчики гидростатического давления струнного типа ПДС, выпускаемые в комплекте с тензометрической аппаратурой (периодомером типа ПЦП-1). Для

установки датчиков используется специальная скважина; при этом проводится следующий комплекс работ:

— бурится скважина диаметром 100—130 мм с полным отбором керна с промывкой ее чистой водой и с остановкой забоя на 0,5 м глубже намеченного интервала установки нижнего датчика;

— в скважине выполняется комплекс гидрогеофизических работ (КС, ПС, ГК, расходомерия, резистивиметрия, кавернометрия);

— определяются глубины установки датчиков; в соответствии с напором подземных вод выбираются датчики требуемой модификации;

— датчики помещаются в специальную капсулу и оснащаются кабелем с битумной гидроизоляцией соединений;

— каждый датчик градуируется путем погружения в скважину под уровень воды с регистрацией показаний на фиксированных отметках (глубинах).

Основными требованиями к условиям размещения датчиков в скважине при их оборудовании в виде гирлянды для наблюдений за рядом обособленных водоносных горизонтов являются обеспечение гидравлической связи чувствительных элементов датчиков с исследуемыми слоями и тщательная гидроизоляция приборов друг от друга по стволу скважины. Практически при

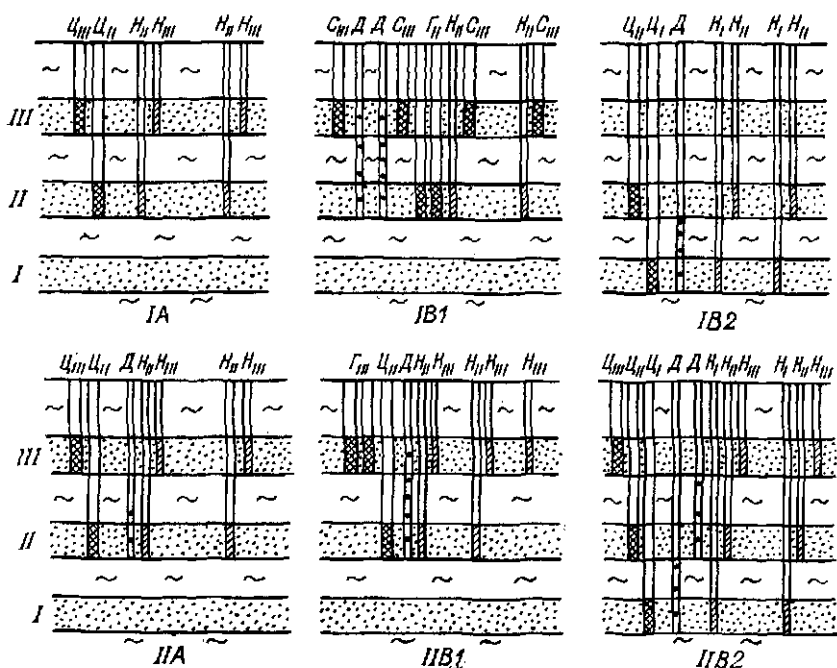


Рис. 2.3. Схемы опробования слоистых водоносных толщ на месторождениях, предназначенных для разработки открытым способом.

использовании датчиков в опытных откачках целесообразно устанавливать их в скважину с засыпкой наблюдаемого интервала песком и с изоляцией этих интервалов друг от друга глиной (глинистыми шариками).

Непосредственно после установки датчиков в скважине проводятся измерения давлений с частотой не реже 1 раза в сутки до относительной стабилизации показаний. При назначении регламента измерений давлений по датчикам в процессе опытной откачки и в период восстановления уровней в целом можно ориентироваться на выполнение стандартных требований к откачкам. Следует отметить и ряд характерных моментов.

Поскольку измерение давления по каждому датчику занимает 3—5 с, целесообразно в первые моменты откачки попытаться сделать максимальное число измерений давлений в наиболее проницаемом прослое, где ожидается максимальный темп снижения уровней. Для удобства наблюдений по нескольким датчикам целесообразно иметь простейшее приспособление — шаговый переключатель, с помощью которого датчики последовательно коммутируются с измерительным прибором (периодомером). С интервалом 2—4 мин следует контролировать давления по датчикам, установленным в относительном водоупоре и во взаимодействующем горизонте. Если по этим датчикам не отмечается изменение давления, интервалы между измерениями по ним в дальнейшем можно увеличить до 5—10 мин. Если по датчикам в водоупоре фиксируется начало развития процесса «отжатия» воды, то особое внимание следует уделить этим датчикам. В целом наблюдения давлений должны проводиться с постепенно возрастающими интервалами, начиная от непрерывных измерений в первые 1—2 мин и кончая несколькими наблюдениями в сутки при стабилизации процесса фильтрации.

Для построения графиков временного прослеживания необходимо провести первичную обработку материалов, т. е. перевести показания периодомера в значения напоров. Эта операция выполняется на основе паспортных данных каждого из датчиков с учетом результатов контрольной их градуировки в скважине.

Для надежного определения коэффициента проницаемости водоупора вкrest напластования и выявления возможной анизотропии водоупора рекомендуется оборудовать как минимум две скважины с датчиками гидростатического давления (по 2—3 датчика в каждой скважине). Датчики устанавливаются вблизи кровли или подошвы опробуемого водоупора.

Учитывая ограниченный опыт проведения откачек с использованием датчиков гидростатического давления, целесообразно рассмотреть методические аспекты этих гидрогеологических работ на примере опытного опробования слоистого водоносного комплекса на поле шахты «Пермско-Юла» Эстонского месторождения горючих сланцев. В этом случае в трех скважинах, вскрывающих три водоносных пласта, были размещены гирлянды датчиков, которые

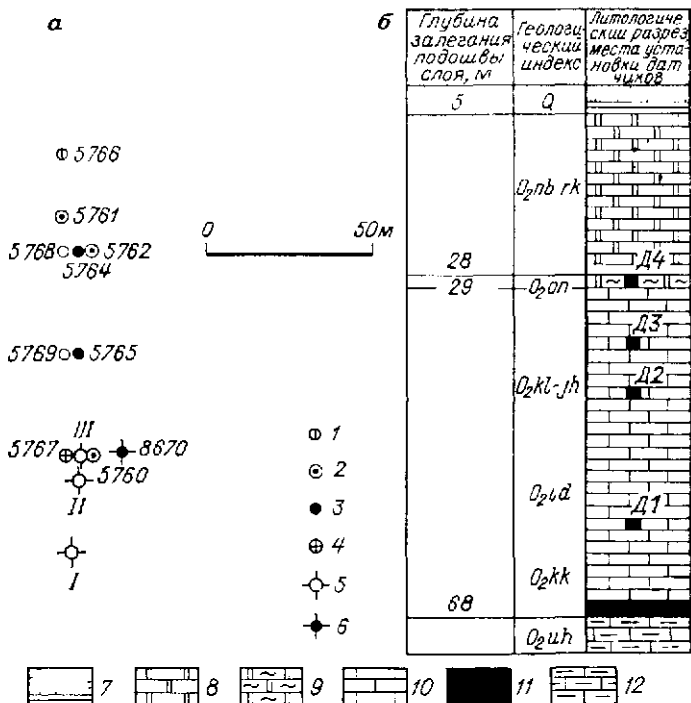


Рис 24 Схема расположения гидрогеологических скважин (а) и литолого-стратиграфическая колонка (б) по участку опытной откачки на поле шахты «Пермискуля» Эстонского месторождения горючих сланцев.

1—4 — пьезометры на ухакусские (1), набала-раквересские (2), кейла-кукрузесские (3) и ласнамяэ-кундаские (4) отложения; 5 — скважина с гирляндой датчиков гидростатического давления; 6 — центральная скважина при откачке из кейла-кукрузеского водоносного горизонта; 7 — песчано-глинистые отложения; 8 — доломиты трещиноватые, 9 — глинистые доломиты; 10 — известняки и доломиты трещиноватые, 11 — пром-пласт; 12 — глинистые известняки

позволили провести диагностирование интерпретационных схем, оценку параметров водоносных пластов и относительных водоупоров (рис. 2.4).

Гидрогеологический разрез в районе работ характерен для всего месторождения. Полезное ископаемое залегает здесь на глубинах 70—80 м. Пром-пласт перекрыт пачкой карбонатных пород ордовикского возраста, в которой выделяются два региональных водоносных горизонта — кейла-кукрузеский (известняки и доломиты мощностью 39 м) и набала-раквересский (доломиты мощностью около 23 м), разделенные оандуским водоупором (глинистые доломиты мощностью около 1 м). Выделение этих водоносных горизонтов по стратификационным признакам является условным, так как подземные воды приурочены к отдельным зонам повышенной трещиноватости. Непосредственно под пластом горючих сланцев залегают ухакусский водоупор (глинистые известняки мощностью 14 м) и ласнамяэ-кундаский водоносный горизонт (известняки и доломиты мощностью 19 м). Ордовикские карбонатные породы перекрыты песчано-глинистыми четвертичными отложениями мощностью около 5 м.

Для оценки фильтрационных параметров горных пород, слагающих ордовикский комплекс на поле «Пермискуля», предусматривалось проведение опытных откачек длительностью по 7 сут каждая из всех выделенных водо-

носных горизонтов. Объектами детальных гидрогеологических исследований явились набала-раквереский и кейла-кукрузеский водоносные горизонты. Схема расположения скважин гидрогеологического куста представлена на рис 2.4, а. Три скважины (I, II и III) были оборудованы датчиками гидростатического давления. Детальное расчленение разреза опробуемой толщи проведено с помощью расходомерии, результаты которой позволили выбрать интервалы установки датчиков давления. При монтаже гирлянды датчиков в скважинах интервалы расположения каждого датчика (около 1 м) засыпались гравием; по стволу скважины датчики изолировались друг от друга гранулированной глиной. Датчик Д12 (скважина II) был задавлен на глубину 4,7 м установкой вибрационного бурения.

Методику проведения откачек с применением датчиков давления и особенности интерпретации их результатов можно рассмотреть на примере опробования кейла-кукрузеского водоносного горизонта. Откачка продолжительностью 7 сут проводилась из скважины 8670 с дебитом $Q=100 \text{ м}^3/\text{сут}$ при понижении уровня $S=40 \text{ м}$. Наблюдения за понижением уровней проводились по двум открытым пьезометрам (скважины 5765 и 5764) и датчикам давления (Д1, Д2, Д3, Д4, Д13, Д15); графики временного прослеживания понижений представлены на рис. 2.5. Пьезометры и датчики давления, оборудованные на набала-раквереский и ласиамеэ-кундаский горизонты, на откачку не реагировали. Наблюдения по датчикам в совокупности с результатами расходомерии

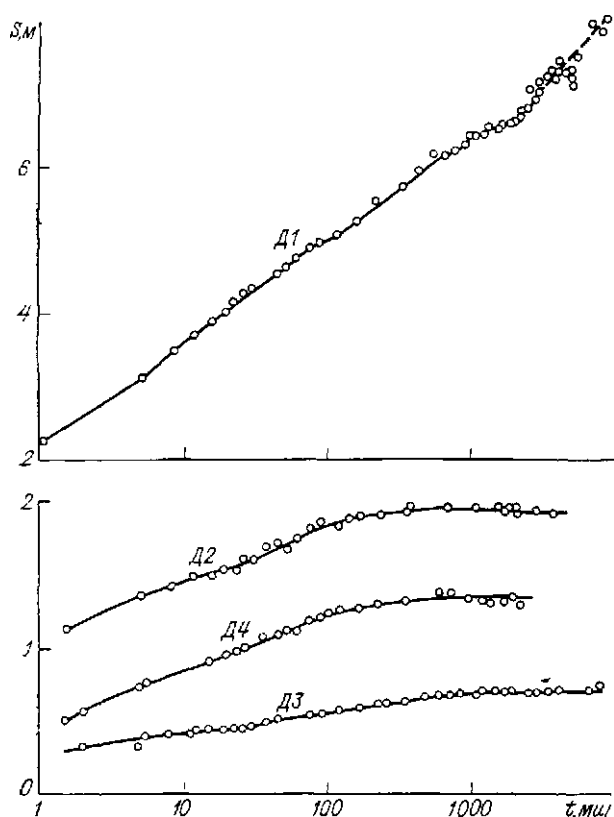


Рис. 2.5. Графики временного прослеживания понижения напора S при откачке из кейла-кукрузеского водоносного горизонта.

скважин позволили дифференцировать кейла-кукурузский горизонт с выделением двух зон повышенной проводимости, приуроченных к интервалам 32—44 м и 64—74 м.

Суммарный расход откачки из кейла-кукурузского водоносного горизонта разделялся с учетом данных расходомерии центральной скважины: верхняя зона — 34 м³/сут, нижняя — 66 м³/сут. Характер понижений напоров по датчикам давления свидетельствует о достаточно хорошей изоляции выделенных проницаемых зон. Так, по датчикам Д2, Д3, Д4 (верхняя зона) отмечается довольно быстрая стабилизация уровней, что связано с влиянием водообильного набала-раквереского водоносного горизонта. Отсутствие явно выраженных понижений по датчику Д1 (нижняя зона) свидетельствует о достаточно хорошей изоляции нижней части водоносного горизонта от верхней. Качественный анализ индикаторных графиков понижений напоров в нижней и верхней зонах кейла-кукурузского водоносного горизонта позволил выбрать следующие расчетные схемы для оценки фильтрационных параметров кейла-кукурузского водоносного горизонта: для верхней зоны — схема с перетеканием, для нижней зоны — схема изолированного пласта.

Оценка фильтрационных параметров верхней зоны проводилась с помощью известной формулы Хантуша с использованием площадного прослеживания понижений по датчикам Д4 и Д15 на конец откачки. В результате расчета определена проводимость верхней зоны кейла-кукурузского горизонта $T = 2,5$ м²/сут и коэффициент фильтрации относительного водоупора между этой зоной и набала-раквересским горизонтом $k_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ м/сут. Обработка результатов опыта методом типовой кривой временного прослеживания не представлялась возможной в связи с непостоянством расхода откачки на начальном этапе.

Расчет фильтрационных параметров нижней зоны водоносного горизонта выполнен по понижениям напоров, полученным по датчику Д1. Обработка опытных данных проводилась при временном прослеживании понижений напоров методом Джейкоба. В результате расчета получены следующие фильтрационные параметры этой части водоносного горизонта: проводимость $T = 8$ м²/сут, пьезопроводность $a = 10^7$ м²/сут.

В целом следует отметить, что анализ результатов опытной откачки с использованием аналитических зависимостей проблематичен, так как в начальный, наиболее представительный для совмещения типовых кривых, период откачки (первые 20 мин) зафиксировано скачкообразное (на 40 м) понижение уровня в центральной скважине, вызванное ее колюматацией, и заметное изменение расхода.

Уточнение параметров кейла-кукурузского водоносного горизонта с учетом осложняющих факторов проводилось на электрической модели. Моделирование выполнялось на схеме Либмана в осесимметричной постановке [13].

Решение обратной задачи по методу Либмана сводилось к определению соотношения между значениями электрических сопротивлений, моделирующих проводимость нижней проницаемой зоны и условия ее взаимосвязи с верхней зоной. Подбор контролировался темпом снижения уровня по датчику Д1. Водоотдача нижнего пласта принималась соответствующей трещиноватости массива и упругости воды. Подбор сопротивлений контролировался наблюдениями потенциалов, соответствующих напорам в верхней (по датчику Д4) и нижней (по датчику Д1) зонах на расчетный момент времени. Результаты моделирования приведены в табл. 2.5.

Таким образом, с учетом результатов моделирования суммарная проводимость кейла-кукурузского водоносного горизонта оценивается в 8 м²/сут.

Проводимость, рассчитанная по схеме изолированного пласта исходя из результатов наблюдений в открытых пьезометрах (скважины 5764 и 5765), оборудованных на всю опробуемую мощность кейла-кукурузского водоносного горизонта, характеризуется следующими значениями: $T_{\text{вр}} = 15 \div 20$ м²/сут (временное прослеживание), $T_{\text{пл}} = 5$ м²/сут (площадное прослеживание). Неоднозначность полученных параметров, вероятно, связана с наличием профильной неоднородности кейла-кукурузского водоносного горизонта, со сложным процессом осреднения уровней в открытом пьезометре, вскрывающем две водопроницаемые зоны.

Результаты определения на электрической модели параметров кейла-кукрузеского горизонта

| Зона | Понижения напоров, м, по датчикам на расчетные моменты времени | | Фильтрационные параметры зон, подобранные на модели |
|---------|--|-------------|--|
| | $t = 0,5$ сут | $t = 1$ сут | |
| Верхняя | 1,3 | 1,3 | Проводимость $T_1 = 3 \text{ м}^2/\text{сут}$, коэффициент фильтрации оандуского водоупора $k_0 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м/сут}$ |
| Нижняя | 6,13 | 6,48 | Проводимость $T_2 = 5 \text{ м}^2/\text{сут}$, пьезопроводность $a = 5 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$, коэффициент фильтрации относительного водоупора $k_0 = 10^{-4} \text{ м/сут}$ |

Проведенный анализ результатов обработки опытной откачки позволяет сделать важный в практическом и методическом отношении вывод: при планировании опытных откачек на Эстонском месторождении горючих сланцев рекомендуется раздельное опробование верхней и нижней зон кейла-кукрузеского водоносного горизонта.

Полученные расчетные параметры водоносных горизонтов и характеристики их взаимосвязи использованы для прогноза водопритоков в горные выработки проектируемой шахты. В частности, детализация гидрогеологической структуры дала возможность оценить условия проходки шахтного ствола на участке проведения опытного опробования слоистого водоносного комплекса.

Оценка водопритоков в выработанное пространство проектируемой шахты не может быть выполнена по результатам разведочных работ, которые не дают представления о техногенной проницаемости водоупоров, залегающих в кровле промпласта сланца. Для такой оценки приходится использовать опыт эксплуатации шахт в рассматриваемом районе, т. е. ориентироваться на методы гидрогеологической аналогии. Вместе с тем опытно-фильтрационные опробования позволяют оценить боковой приток к выработанному пространству и уровенный режим дренируемых водоносных горизонтов (интенсивность инфильтрационного питания подземных вод определяется при этом также методами аналогии).

Другим примером эффективного использования датчиков давления является откачка, проведенная при гидрогеологических исследованиях Вазавереской погребенной долины на Эстонском месторождении горючих сланцев. Целью откачки являлась оценка взаимосвязи водоносного горизонта четвертичных отложений, выполняющих погребенную долину, и водоносного горизонта

зонта известняков ордовика Эти горизонты разделены относительным водопором, представленным моренными отложениями мощностью 3 м (рис 26, б) Откачками раздельно опробовались оба горизонта Дебиты откачек соответственно составляли из верхнего (четвертичного) — 0,67 л/с, из нижнего — 1,2 л/с. Наблюдения за снижением уровней в ходе откачек проводились по 7 наблюдательным скважинам (рис 26, а) Для фиксации снижения уровня в отдельных прослоях четвертичного водоносного горизонта и в моренных отложениях была пробурена специальная скважина, расположенная на расстоянии 8,3 м от центральных и оборудованная датчиками гидростатического давления Наблюдения за ходом снижения уровней при откачках проводились по трем датчикам гидростатического давления

Полученные по наблюдениям в открытых пьезометрах напоры в данном случае не позволили однозначно обосновать расчетную схему фильтрации при откачках из верхнего и нижнего горизонтов В частности, при откачке из четвертичного горизонта пьезометры, оборудованные на взаимодействующий горизонт известняков, отреагировали на откачку раньше и активнее, чем пьезометры в основном горизонте (рис 27) Этот парадоксальный эффект полностью исключал возможность оценки параметров четвертичного водоносного горизонта по начальному этапу откачки Между тем при раздельном опробовании водоносных горизонтов с применением датчиков давления открывается принципиальная возможность независимой оценки фильтрационных параметров в рамках расчетной схемы Тейса на первых этапах откачки, когда взаимодействие горизонтов практически не проявляется Инерционность открытых пьезометров (скв 8665 и 8666), проявившаяся на первых стадиях откачки, исключает возможность использования схемы Тейса Однако положение существенно улучшается, если принять во внимание показания датчика Д2, установленного в песчаном прослое четвертичных отложений Совмещение индикаторного графика временного прослеживания уровня по датчику Д2 с типовой кривой Тейса позволяет получить по начальному этапу откачки следующие фильтрационные параметры песчаного прослоя проводимость $T_2 = 16,5 \text{ м}^2/\text{сут}$, коэффициент пьезопроводности $a = 2 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{сут}$

По результатам временного прослеживания напоров по скв 8669 на начальном этапе откачки из нижнего водоносного горизонта рассчитаны (методом типовой кривой) следующие фильтрационные параметры известняков

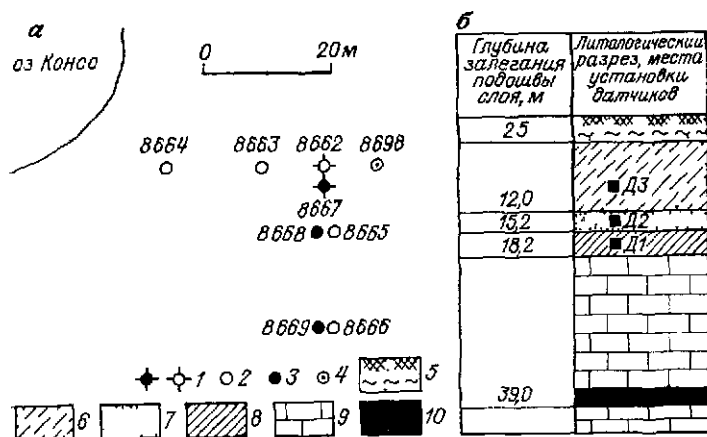


Рис 26 Схема расположения гидрогеологических скважин (а) и литолого-стратиграфическая колонка по скважине 8698 с гирляндой датчиков гидростатического давления (б)

1 — центральные скважины, 2 и 3 — пьезометры на четвертичный (2) и ордовикский (3) водоносные горизонты; 4 — скважина с датчиками давления, 5 — торф 6 — алевроит, 7 — песок мелкозернистый, 8 — суглинок моренный, 9 — известняк 10 — горючий сланец

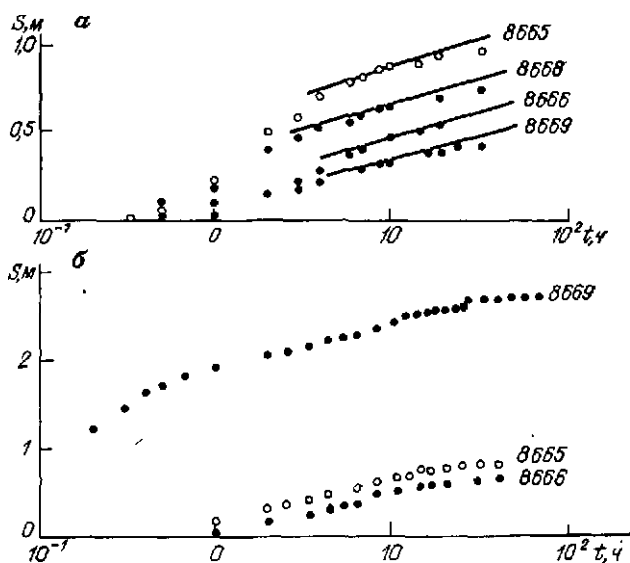


Рис. 2.7. Графики временного прослеживания понижения напора S по пьезометрам при откачке из четвертичного (а) и ордовикского (б) водоносных горизонтов.

ордовика: проводимость $T_1 = 2,5 \text{ м}^2/\text{сут}$, коэффициент пьезопроводности $a = 10^4 \text{ м}^2/\text{сут}$.

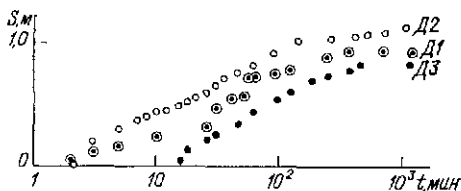
Опробуемые водоносные горизонты разделены относительным водоупором, поэтому для оценки параметра перетекания в рамках трехслойной схемы требуются данные о прослеживании понижений напоров по двум парам пьезометров, расположенным на разных расстояниях от центральной скважины. В рассматриваемом примере один из четырех пьезометров (скважина 8668), вероятно, попал в аномальную зону, что исключает возможность оценки параметра перетекания методом площадного прослеживания. При наличии одной пары пьезометров параметры перетекания можно оценить по формуле Хаитунша при известном значении проводимости водоносного горизонта, из которого проводится откачка. Для рассматриваемых условий параметр перетекания B получен равным 20 м.

Зная параметр перетекания и проводимости взаимодействующих горизонтов, можно определить коэффициент фильтрации моренных отложений

$$k_0 = \frac{T_1 T_2 m_0}{(T_1 + T_2) B^2} = 0,015 \text{ м/сут.}$$

Оценка суммарной проводимости комплекса способом временного прослеживания уровней (рис. 2.7 и 2.8) на этапе квазистационарного режима дает значение 38—40 $\text{м}^2/\text{сут}$, что не соответствует оценке параметров каждого горизонта в отдельности. Вероятно, завышенные значения суммарной проводимости являются результатом того, что напоры четвертичного водоносного горизонта формируются при развитии перетекания из слабопроницаемого пласта, залегающего в его верхней части. Подтверждением этого предположения могут служить результаты измерений понижений напоров по датчикам давления: разность напоров, фиксируемая по датчикам в песчаном (Д2) и алевроитовом (Д1) прослоях, свидетельствует о наличии вертикального нисходящего потока в верхней части четвертичного водоносного горизонта.

Рис. 2.8. Графики переменного прослеживания понижений напора S по датчикам гидростатического давления при откачке из ордовикского водоносного горизонта.



Таким образом, расчетная схема должна учитывать профильную неоднородность четвертичного водоносного горизонта, т. е. в принципе должна отвечать условиям фильтрации в четырехслойной толще. Наличие датчиков гидростатического давления позволяет определить параметры прослая алеврита, залегающего в кровле четвертичных отложений, и оценить роль этого элемента расчетной схемы.

Датчик давления, установленный в прослой алеврита, отреагировал на откачку из водоносного горизонта известняков ордовика примерно через час после ее начала. Эти данные позволяют ориентировочно оценить коэффициент пьезопроводности слабопроницаемого пласта вкrest напластования по приближенной зависимости $a_0 \approx 0,1 z^2/t_0$ (где z — расстояние от кровли водоносного горизонта до точки установки датчика, t_0 — время начала реакции датчика). Коэффициент пьезопроводности алевритового прослая вкrest напластования оценивается значением $28 \text{ м}^2/\text{сут}$. Аналогичным способом рассчитан коэффициент пьезопроводности моренных отложений — $288 \text{ м}^2/\text{сут}$.

Значимость каждого элемента слоистого водоносного комплекса анализировалась также на математической модели с использованием результатов измерений напоров по датчикам гидростатического давления. Для моделирования использовалась специализированная программа SATIR, позволяющая учитывать профильную неоднородность опробуемого водоносного комплекса в рамках осесимметричной расчетной схемы. Программа предусматривает имитацию условий проведения откачки в режиме заданного расхода центральной скважины. В результате рассмотрения ряда вариантов изучаемой расчетной схемы на математической модели подобраны параметры слабопроницаемых отложений при заданных параметрах водоносных пластов [32]. В частности, коэффициент фильтрации алевритов оценивается значением около $0,04 \text{ м}/\text{сут}$ при удельной водоотдаче $\beta_0 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$. Коэффициент фильтрации моренных отложений подобран равным $0,05 \text{ м}/\text{сут}$.

Результаты математического моделирования показывают, что наличие прослая алеврита практически не влияет на расчетные значения параметров проводимости водоносных пластов, полученные методом Тойса поначальному этапу откачки. Вместе с тем влияние прослая сказывается на существенном завышении суммарной проводимости, полученной способом временного прослеживания на этапе синхронного снижения уровней.

Результаты опытно-фильтрационных работ дают возможность сделать предварительные оценки степени влияния горных работ на режим четвертичного водоносного горизонта и на соответствующие изменения экологических условий Вазаверской долины (охраняемого природного комплекса). С другой стороны, рассмотренный пример иллюстрирует важное научно-методическое положение о том, что комплексные гидрогеологические исследования фильтрационных свойств слоистых толщ, основанные на совместном использовании датчиков гидростатического давления при опытных откачках и применении математического моделирования для интерпретации последних, обеспечивают надежное определение расчетных гидрогеологических параметров.

Наряду с профильной неоднородностью на угольных и сланцевых месторождениях зачастую необходимо изучать плановую неоднородность, которая играет важную роль, особенно при оценке условий эксплуатации дренажных систем. Изучение фильтрационной неоднородности требует организации групповых,

створовых откачек или опытно-эксплуатационного водопонижения (см. табл. 2.3 и 2.4). Створовая откачка предполагает оборудование профиля гидрогеологических скважин с последовательным опробованием отдельных скважин при использовании остальных в качестве пьезометров. При этом рекомендуется проводить откачки из скважин, вскрывших зоны повышенной проводимости.

Особо следует остановиться на оптимизации масштаба опробований, планируемых при детальной разведке. Как правило, на этой стадии исследований отдается предпочтение кустовым откачкам; одиночные откачки проводятся лишь в ограниченных объемах, определяемых степенью корреляции с данными кустовых откачек. Вместе с тем, как показывает опыт разведки Эстонского и Ленинградского месторождений горючих сланцев, в слоистых комплексах с резко выраженной неоднородностью опробование кустовыми откачками также не может дать желаемого результата. В подобных условиях можно рекомендовать проведение крупномасштабного опытного или опытно-эксплуатационного водопонижения. Наряду с оценкой фильтрационных параметров опытно-эксплуатационные водопонижения должны быть ориентированы на определение параметров питания, а также граничных условий водоносных горизонтов, на уточнение их емкостных характеристик, обусловленных гравитационной водоотдачей.

Для повышения эффективности гидрогеологических исследований на угольных и сланцевых месторождениях необходимо рациональное сочетание различных методов полевых исследований. Комплексирование методов следует проводить исходя из возможностей их взаимного дополнения и контроля. При этом целесообразно сочетать прямые методы определения фильтрационных свойств и косвенные геофизические методы, позволяющие оценить свойства массивов горных пород, которые корреляционно могут быть увязаны с проницаемостью. Различные геофизические методы целесообразно использовать при проведении опытно-фильтрационных опробований для оценки структуры потока, что особенно важно при изучении слоистых комплексов.

Следует особо отметить эффективность гидрогеофизических методов — резистивиметрии, расходометрии, термометрии. Их применение должно обеспечивать главным образом уточнение и контроль расчетной гидродинамической схемы (выявление профильной и плановой неоднородности водоносного комплекса), а также оценку условий проведения опытно-фильтрационного опробования (контроль изоляции опробуемых интервалов и распределения расходов отдельных горизонтов по стволу скважин). В целом комплексирование различных полевых методов исследований массивов горных пород создает условия для более глубокого изучения физики фильтрационных процессов, для оперативной корректировки опытных опробований, для одно-

значной схематизации при интерпретации результатов опытных опробований.

В заключение следует особо подчеркнуть, что достоверная оценка фильтрационных параметров в рамках рассмотренных сложных гидродинамических схем требует широкого применения математического моделирования — электрических моделей и специализированных программ ЭВМ. Математическое моделирование обеспечивает повышение достоверности расчетных фильтрационных параметров за счет использования всего объема исходной информации, полученной в процессе опытно-фильтрационных опробований водоносных комплексов. С другой стороны, имитация опытно-фильтрационных опробований позволяет априори оптимизировать их планирование. Разработанная и апробированная совместно ВНИМИ и Ленинградским горным институтом специализированная программа SATIR позволяет проводить подобные исследования процессов фильтрации в профильно-неоднородных комплексах применительно к схеме осесимметричного потока, характерного для опытных опробований слоистых водоносных толщ.

2.3. Гидрогеологические работы по изучению техногенного режима подземных вод в период строительства и эксплуатации горнодобывающих предприятий

Как уже отмечалось, наиболее представительную информацию о закономерностях техногенного режима подземных вод позволяют получить гидрогеологические наблюдения и эксперименты, организованные при строительстве и эксплуатации горнодобывающих предприятий. Планирование и проведение наблюдений за режимом подземных вод на каждом конкретном месторождении требуют дифференцированного подхода в зависимости от специфики природных и горнотехнических условий. Вместе с тем можно сформулировать общие задачи наблюдений на шахтах и карьерах, решение которых в совокупности обеспечивает всестороннее изучение техногенного режима подземных вод. Основными задачами наблюдений являются [18]:

- оперативный контроль водопритоков к горным выработкам и к дренажным сооружениям, оценка эффективности принятой системы осушения;

- оценка влияния горных, дренажных работ и других инженерных мероприятий на изменение природных условий, водоснабжения, экологической обстановки в районе месторождения;

- уточнение представлений о гидрогеологических характеристиках месторождения (о гидрогеологическом строении, о фильтрационных параметрах водоносных горизонтов и водупоров, об источниках формирования подземных вод, параметрах их питания и связи с поверхностными водоемами и потоками и т. д.);

— обеспечение прогноза техногенного режима подземных вод при развитии горных работ;

— обоснование инженерных рекомендаций по изменению системы отработки или осушения месторождения с целью безопасной и экономичной его эксплуатации, а также с учетом необходимости охраны природных объектов.

Как известно, гидрогеологические наблюдения в период строительства и эксплуатации горнодобывающих предприятий включают:

— определение напоров основных водоносных горизонтов по сети пьезометров;

— измерения водопритоков в горные выработки, дренажные сооружения, определение производительности водозаборов, расходов источников;

— наблюдения за уровнями водоемов и водотоков (иногда определение расходов последних);

— наблюдения за геодинамическими явлениями, которые отчасти или полностью обусловлены наличием потока подземных вод в массиве горных пород.

В любом случае определение напоров и измерения расходов подземных вод следует производить по возможности синхронно. Наблюдения за напорами подземных вод нужно выполнять по всем дренируемым водоносным пластам, а также по горизонтам, которые либо являются источниками питания дренируемых пластов, либо создают потенциальную угрозу нормальной эксплуатации горных выработок, либо подлежат охране от истощения или загрязнения. В зависимости от целевого назначения пьезометры наблюдательной сети можно подразделить на две группы: контрольно-режимные и режимные. Контрольно-режимные пьезометры тяготеют к дренажным контурам и располагаются по площади горных работ, а также в зоне, непосредственно примыкающей к горным выработкам и дренажным сооружениям. Эти пьезометры обеспечивают контроль эффективности водопонижения, а также служат для оценки условий разгрузки подземных вод на горных выработках. Наблюдения по пьезометрам этой группы выполняются геологическими службами шахт или карьеров.

Режимные пьезометры предназначены для оценки развития депрессионных воронок по площади карьерных и шахтных полей и за их пределами. Наблюдения по режимным пьезометрам внешней сети выполняются либо специализированными организациями Мингео СССР (в крупных горнодобывающих районах), либо шахтными (карьерными) геологическими службами*. В большинстве случаев режимные пьезометры целесообразно располагать в виде створов, ориентированных по

* Постановка, анализ и интерпретация наблюдений по этим сетям зачастую сопровождаются преодолением субъективных трудностей из-за ведомственного разобщения.

потоку подземных вод. Створовое размещение пьезометров позволяет оптимизировать интерпретацию результатов режимных наблюдений, создает условия для идентификации структуры потока в плане при минимальном числе точек наблюдений. Отдельные режимные пьезометры специального назначения целесообразно располагать на особых участках, важных по гидродинамическим аспектам (вблизи поверхностных водоемов или водотоков, около границ выклинивания водоносных пластов или у границ их фациального изменения, на участках водозаборов или барражей, тектонических нарушений и т. д.).

Для фиксирования напоров подземных вод следует использовать (кроме пьезометров режимной сети) все водопонижающие скважины (находящиеся в работе, в бурении или на ремонте), сквозные и забивные фильтры, взрывные скважины. Напоры водоносных горизонтов целесообразно измерять на участках высачивания подземных вод в открытых и подземных выработках, фиксировать уровни и напоры в затопленных подземных выработках, уровни воды в котлованах, траншеях, мульдах сдвижения. В открытых выработках полезно фиксировать отметки выходов подземных вод на отдельных уступах при многоярусном высачивании на бортах.

При дренировании слоистых водоносных толщ необходимо фиксировать дифференцированные напоры взаимодействующих водоносных пластов по площади их развития с помощью пьезометров, сгруппированных в виде «кустов».

Количество пьезометров режимной сети зависит от строения месторождения и определяется сложностью гидрогеологических условий его эксплуатации, объемом дренажных мероприятий и характером дренажных сооружений.

Для месторождений с простыми гидрогеологическими условиями (см. раздел 1.3) в период строительства горнодобывающего предприятия на участке первоочередных работ необходимо иметь 3—4 контрольно-режимных пьезометра на основной (дренируемый) водоносный горизонт и по 1—2 пьезометра на каждый из горизонтов, которые могут потенциально дренироваться за счет связи с основным горизонтом или выступать в качестве питающей границы. На шахтных полях пьезометры, оборудованные на несколько горизонтов, целесообразно располагать в виде «куста» около участка первоочередных очистных работ для определения высоты зоны водопроводящих трещин, оценки характера связи горизонтов и условий на контурах горных выработок (см. раздел 2.4). В зонах, прилегающих к участкам первоочередных работ, целесообразно оборудовать 1—3 створа пьезометров (по 2—3 пьезометра в каждом), ориентированных перпендикулярно к фронту горных работ. Расстояния между пьезометрами и длина створов определяются расчетом исходя из гидрогеологических параметров дренируемых водоносных пластов (коэффициентов пьезопроводности, параметров питания). Общее количество пьезометров на месторождениях с про-

стыми гидрогеологическими условиями может достигать 10—15 в зависимости от условий питания подземных вод и количества взаимодействующих горизонтов. По мере развития горных работ режимная сеть должна пополняться новыми пьезометрами.

На месторождениях со сложными гидрогеологическими условиями режимная сеть требует обоснования в каждом конкретном случае. Некоторым ориентиром могут служить следующие рекомендации. На участке первоочередного вскрытия целесообразно иметь 5—10 контрольно-режимных пьезометров на основной водоносный горизонт и не менее 5 пьезометров на связанные с ним горизонты. В частности, пьезометры должны оборудоваться на изолированные водоносные пласты, залегающие в почве горных выработок, для оценки напоров, влияющих на общую устойчивость бортов или на возможность прорывов в подземные выработки. Перпендикулярно к дренажным контурам полезно иметь створы, состоящие из 2—3 контрольно-режимных пьезометров, причем часть из них оборудуется непосредственно на дренажном контуре (между скважинами). Расстояния между профилями составляют 300—500 м.

При интенсивном развитии открытых горных работ срок службы контрольно-режимных пьезометров нередко ограничен, поэтому приходится ориентироваться на оперативное бурение наблюдательных скважин непосредственно на рабочих уступах для проведения кратковременных наблюдений или разовых измерений напора. Сеть режимных пьезометров на месторождениях со сложными гидрогеологическими условиями может быть представлена 15—30 наблюдательными скважинами.

Количество пьезометров на месторождениях с особо сложными гидрогеологическими условиями не должно строго регламентироваться.

Можно предложить общий подход к обоснованию оптимального числа пьезометров на месторождениях со сложными и особо сложными гидрогеологическими условиями. Этот подход учитывает перспективу использования результатов наблюдений для уточнения и оценки фильтрационных параметров дренируемых водоносных горизонтов (комплексов) в условиях их плановой неоднородности. Для выявления и оценки гидрогеологических параметров каждого крупного относительно однородного участка (зоны) необходимо иметь на этом участке от 3 до 6 пьезометров (2—4 пьезометра на внешних границах участка и 1—3 пьезометра в пределах участка). Вопрос о выделении расчетных участков, уточнении их границ обычно остается открытым в течение длительного (многолетнего) периода наблюдений. На месторождениях со сложными и особо сложными гидрогеологическими условиями общее количество пьезометров может достигать многих десятков. Например, на Эстонском сланцевом месторождении режимная сеть насчитывает более 150 пьезометров, на Ленинградском сланцевом более 50, район Лебединского карьера характеризовался сетью пьезометров,

число которых также измерялось несколькими десятками. Однако опыт интерпретации результатов режимных наблюдений на этих объектах свидетельствует о том, что даже такое внушительное количество пьезометров далеко не полностью обеспечивает надежность идентификации расчетных гидродинамических схем.

Измерения напоров при развитии горных работ на месторождениях с простыми гидрогеологическими условиями могут проводиться ежемесячно, а на месторождениях со сложными гидрогеологическими условиями — 2—3 раза в месяц. В паводковые периоды напоры полезно измерять через 3—5 сут (иногда через 1—2 сут и чаще). При оценке дренирующего эффекта очистных подземных выработок в период первой посадки основной кровли напоры приходится измерять ежедневно. Наблюдения за уровнями водоемов и водотоков на шахтных и карьерных полях должны проводиться синхронно с наблюдениями напоров водоносных горизонтов по ближайшей группе пьезометров (в паводковые периоды должно строго фиксироваться время наблюдений).

При проведении опытно-эксплуатационных водопонижений расположение пьезометров и регламент наблюдений за напорами и расходами зависят от конкретных гидрогеологических условий; обычно можно ориентироваться на требования, которые предъявляются к опытным откачкам. Параллельно и синхронно с наблюдениями за напорами подземных вод должны фиксироваться водопритоки в открытые и подземные горные выработки, оцениваться производительность дренажных средств (в частности, путем контрольных наблюдений дебитов объемным способом).

На месторождениях со сложными гидрогеологическими условиями полезно измерять дебиты по отдельным участкам горных выработок и дренажных контуров, дифференцированно оценивать водопритоки за счет подземных вод и атмосферных осадков, поверхностных водоемов или водотоков. При определении водопритоков к очистным выработкам шахт особого внимания заслуживает разделение общего притока на «боковой» (по выработкам, тяготеющим к контуру горных работ) и на приток по площади очистных работ.

В подземных горных выработках должны проводиться наблюдения за водоявлениями на локальных участках вскрытия тектонических нарушений, зон фациального замещения, на участках прорывов подземных вод и пльвуинных пород. Особое внимание должно быть обращено на режим прорывов; с этой целью фиксируется изменение дебитов прорывов в увязке с изменениями напоров по ближайшим контрольно-режимным пьезометрам. Наблюдения за крупными прорывами (более 10—20 м³/ч) в первоначальный период их развития могут потребовать максимальной частоты измерений дебитов и напоров (до нескольких измерений в час). В дальнейшем целесообразно кор-

ректировать регламент измерений, сократив их число в зависимости от общей тенденции изменения дебитов и напоров. Параллельно с определением дебитов и напоров подземных вод при прорывах следует фиксировать температуру воды, ее химический состав, объем выносимых пород. Полезно провести оперативную увязку местоположения прорывов и их характеристик с геологическим строением участка, с гидрогеологической ситуацией, что в дальнейшем позволит прогнозировать прорывы методом аналогии.

В открытых горных выработках (карьерах, разрезных траншеях, котлованах) следует фиксировать фильтрационные деформации для установления корреляционных связей между длиной языков оплывания песков, углом наклона поверхности переломленного материала, высотой промежутка высачивания, удельным расходом подземного потока, гранулометрическим составом песков, скоростями поверхностных потоков. При деформациях глинистых пород типа выпора или циклического оползания [24, 41] следует фиксировать параметры этих явлений.

На месторождениях, сложенных полускальными метаморфизованными породами, следует документировать вскрытые карьером тектонические нарушения, на участках которых полезно измерять отметки высачивания подземных вод, определять их химический состав. При этом необходимо обращать внимание на незначительные по дебиту высачивания, которые могут служить основанием для косвенного определения напоров не вскрытых карьером водоносных горизонтов, разгружающихся по тектоническим нарушениям.

Самое серьезное внимание необходимо обращать на обследование участков крупных деформаций бортов карьера, фиксируя все водопроявления, организуя бурение специальных пьезометров для определения напоров водоносных пластов, влияющих на напряженно-деформированное состояние массива горных пород.

Наряду с наблюдениями за режимом подземных вод на карьерных и шахтных полях и за геодинамическими явлениями в открытых и подземных горных выработках полезно проводить периодическую гидрогеологическую съемку за пределами этих выработок. При этом изучению подлежат рельеф земной поверхности, состав, строение и фильтрационные свойства покровных отложений, состояние водоотводных канав, участки возможной инфильтрации дренажных вод, мелкие водоемы и водотоки (их гидрологический режим, строение и литологический состав террас, поймы, русла).

Над площадью очистных работ на территории шахтных полей следует фиксировать оседания земной поверхности, локальные ее деформации (трещины, заколы, провалы, воронки), скопления воды в мульдах сдвижения, состав и свойства покровных отложений. Этим наблюдениям должно уделяться мак-

симальное внимание при эксплуатации шахт на малых глубинах для обоснования инженерных мероприятий по снижению поступления атмосферных осадков и талых вод в горные выработки. На участках очистных работ целесообразно проводить наблюдения за режимом грунтовых вод для оценки возможного подтопления земной поверхности, оснований зданий или других инженерных сооружений, для оценки условий заболачивания территории.

Особенности формирования техногенного режима подземных вод иногда определяют необходимость постановки специфических наблюдений. В частности, при оценке баланса подземных и поверхностных вод приходится проводить определение испарения с водной поверхности водоемов и гидроотвалов в совокупности с наблюдениями за инфильтрацией, оценивать изменение проницаемости покровных отложений, залегающих в основании последних. Для оценки эффективности дренажных устройств и уточнения гидрогеологического строения дренируемых комплексов нередко приходится проводить расходомерию безнасосных скважин (поглощающих или сквозных фильтров), определяя их дебит и распределение последнего по стволу. К специфическим видам наблюдений можно отнести также измерения напоров в затопленных подземных выработках или прослеживание темпов затопления шахт (аварийного или планомерного). Систематические наблюдения за гидрохимическим режимом организуются при эксплуатации шахт и разрезов, находящихся в особых условиях (обычно в тех случаях, когда остро стоят природоохранные вопросы, решаются проблемы предотвращения загрязнения подземных вод).

Полученную в результате разнообразных гидрогеологических наблюдений информацию целесообразно систематически интерпретировать на количественном уровне — уточнять фильтрационные параметры дренируемых горизонтов, характеристики их питания и связи с другими горизонтами, с водоемами и водотоками. Для месторождений со сложными гидрогеологическими условиями эта интерпретация должна включать характеристику изменений водного баланса в изучаемом районе с оценкой роли поверхностного и подземного стока.

Наряду с наблюдениями за водопитоками в горные выработки, за уровнями водоносных горизонтов и за геодинамическими процессами, развивающимися при эксплуатации шахт и карьеров, целесообразна постановка специальных экспериментов, которые должны быть направлены на уточнение и конкретизацию расчетных гидродинамических схем. Кроме уже упоминавшихся опытно-эксплуатационных водопонижений к таким специальным работам можно отнести опытные запуски трассеров и другие гидрогеофизические эксперименты для оценки структуры потоков подземных вод, а также работы по определению техногенной проницаемости массивов над выработанным пространством для оценки условий формирования водоприток

в шахты. Методика и результаты таких работ рассмотрены ниже на примере различных по гидрогеологическим условиям месторождений.

2.4. Экспериментальные гидрогеологические работы в период эксплуатации шахт *

Исследования техногенного режима подземных вод на шахтных полях наряду с оценкой изменений условий их питания должны предусматривать и изучение условий на контурах дренажа.

Изменения естественной проницаемости подработанных пород и условия их дренирования формируются под влиянием гидрогеомеханических процессов, сопровождающих сдвигание кровли при очистных работах. В этом плане в период эксплуатации шахты возникает возможность экспериментально, применительно к конкретным геологическим и горнотехническим условиям, определить или существенно уточнить техногенные изменения гидродинамического режима в водоносных слоях, залегающих непосредственно над выработанным пространством — определить здесь высоту зоны водопроводящих трещин (ЗВТ), оценить техногенную проницаемость подработанного массива над ЗВТ вдоль водопроводящих слоев и по нормали к напластованию относительно водоупорных слоев. Для совместного изучения геомеханических и гидродинамических процессов вблизи подземных горных выработок в период эксплуатации месторождений выполняется комплекс специальных гидрогеологических исследований.

Изменения гидродинамического режима слоев отражаются в напорах. Наблюдения за напорами на подрабатываемом участке целесообразно проводить во всех водонасыщенных слоях кровли (прежде всего в слоях, наиболее проницаемых) над целиком в нескольких метрах от границ очистной выработки или непосредственно над выработанным пространством в зоне разгрузки. Период наблюдений по возможности должен охватывать все состояния слоев кровли: естественное, деформирования при подработке и последующей стабилизации.

Техногенные изменения напоров в слоях над очистными выработками могут быть зафиксированы посредством наблюдательных скважин, оборудованных традиционными пьезометрами, дистанционными манометрами или съемными тампонирующими устройствами. Пьезометры и манометры, предназначенные для наблюдений непосредственно над очистными выработками в периоды деформирования кровли, должны иметь мягкую гидроизоляцию, удлиненные свободно перемещающиеся по скважине колонны труб и компенсаторы на кабелях манометров.

* Раздел написан Ф. П. Стрельским, А. С. Мировым и Б. И. Леваньковым.

метров в целях предупреждения соответственно нарушений изоляции наблюдаемых интервалов или разрывов труб и кабелей. Применение любых дистанционных манометров дает возможность в одной скважине установить наблюдения за всеми водопроницаемыми слоями исследуемой толщи. Малоинерционные струнные дистанционные манометры типов ПДС или ДС-13 являются универсальным средством наблюдений за гидростатическим давлением воды в порах и трещинах пород с любой (в том числе и весьма малой) проницаемостью.

При изучении режима напоров в слабопроницаемых подрабатываемых породах целесообразно использовать только струнные дистанционные манометры, обладающие во много раз большей, чем любые пьезометры, скоростью восприятия давления воды в окружающих породах. В этих случаях необходимо обращать внимание на проницаемость тампонажного материала k_t , изолирующего наблюдаемый слой от соседнего с ним, так как она определяет погрешность измерений напоров

$$\Delta h < \frac{\Delta H k_t r^2}{2Tl} \ln \frac{R}{r_c}, \quad (2.1)$$

где ΔH — максимальная разность напоров в наблюдаемом и соседнем относительно водопроводящих слоях; r_c — радиус наблюдательной скважины; T — минимальная проводимость наблюдаемого слоя; l — расстояние между относительно водопроводящими слоями; R — максимальное расстояние от наблюдательной скважины до границы слоя.

При относительно малой проводимости соседнего слоя или при градиенте напора в затампонированном интервале скважины $\Delta H/l$ меньше начального градиента фильтрации для тампонажного материала погрешность измерений напоров, связанная с качеством тампонажа, незначительна.

Пьезометры и дистанционные манометры позволяют вести длительные наблюдения, но их оборудование в скважинах требует значительных затрат времени и материалов. В связи с этим при необходимости только разовых оценок напоров в подработанных слоях весьма эффективен метод последовательного восстановления уровней в слоях в процессе бурения скважин. Каждый исследуемый слой кровли бурится на всю его мощность, забой скважины останавливается в подстилающем водоупорном слое, а все вышележащие обводненные слои изолируются съёмным тампонирующим устройством. Колонна труб, удерживающая на заданной глубине тампон, должна иметь герметичные соединения, гидравлическую связь с изолированным интервалом скважины и свободно пропускать измеритель уровня. Этим методом в процессе бурения одной скважины могут быть измерены напоры во всех слоях подработанной толщи, соответствующие периоду бурения скважины.

Для экспериментальных определений высоты зоны водопроводящих трещин (ЗВТ) используется ряд прямых и косвенных

методов. Прямые (гидродинамические) методы основаны на наблюдениях за напорами или за водопоглощениями при нагнетаниях или наливах в скважины [8]. Косвенные методы основаны на анализе распределения температур в подработанной толще и скоростей движения в ней упругих волн.

Метод наблюдений за напорами наиболее прост и надежен. Принадлежность слоя к ЗВТ определяется по практически полному снижению в нем напоров на участке выработки в процессе техногенных изменений гидродинамического режима подземных вод. Наблюдения за напорами при определении высоты ЗВТ должны вестись в группе слоев, тяготеющих к зоне вероятного расположения верхней границы ЗВТ. Чем чаще чередуются относительно водопроницаемые и водоупорные слои, тем больше может быть промежуточных пунктов наблюдений за напорами и выше точность определения высоты ЗВТ. С помощью пьезометров и дистанционных манометров можно вести продолжительные наблюдения, охватывающие весь цикл развития ЗВТ от возникновения до сокращения в результате постепенного уплотнения подработанной толщи [42].

Очевидно, что наибольшие снижения уровней будут наблюдаться непосредственно над очистной выработкой, но установка здесь наблюдательных скважин связана с риском разрыва в них труб пьезометров или кабелей дистанционных манометров в период интенсивных деформаций сдвижения. Для гарантии сохранения наблюдательных скважин, предназначенных для фиксации техногенных изменений напоров в кровле выработки на протяжении всего периода сдвижения, может быть допущено их размещение над целиком у границы выработки. В этом случае полного снижения уровней в слоях, захваченных ЗВТ, может быть не отмечено, и суждение о принадлежности слоя к ЗВТ делается исходя из относительного падения напора в нем после прохождения очистного забоя мимо наблюдательной скважины.

Оборудование наблюдательных скважин малоинерционными струнными манометрами позволяет использовать метод наблюдений за напорами для определения высоты ЗВТ в толщах, сложенных слабопроницаемыми глинистыми породами. При этом положение верхней границы ЗВТ определяется по существенной разнице в скоростях снижения гидростатического давления выше и ниже этой границы. Чем сильнее профильная анизотропия проницаемости толщи, тем резче различие интенсивностей рассеивания порового давления в ЗВТ и над ней [43].

Разовая оценка высоты ЗВТ в любой момент ее развития может быть эффективно выполнена посредством измерений напоров в слоях кровли в процессе бурения одной скважины с изоляцией каждого наблюдаемого интервала съемным тампонирующим устройством.

Метод наблюдений за интенсивностью водопоглощений при нагнетаниях или наливах в скважины основан на сравнении удельных водопоглощений в одних и тех же слоях до и после их

подработки. Удельные водопоглощения слоев могут быть определены как путем опытных наливов (нагнетаний) в изолированные интервалы скважин, так и расходометрическим каротажом скважин при наливах или нагнетаниях. В целях повышения надежности результатов опытные скважины при реализации метода целесообразно направлять через зону разгрузки, прилегающую к границам очистных выработок, поскольку развитые здесь трещины расслоения существенно повышают вероятность гидравлической связи скважины с секущими слоистыми водопроводящими трещинами. Метод эффективен в слоистых массивах с любой проницаемостью пород.

При реализации метода удельное водопоглощение q_n в слое, полученное в результате нагнетания в подработанной толще на участках развития расслоений, сравнивается с ожидаемым здесь удельным водопоглощением q_n^0 , вычисленным по зависимости

$$q_n^0 = \frac{q_k \lg(R/r_c)}{0,25M/r_0 + \lg(1 + R/r_0)}, \quad (2.2)$$

где q_n — удельное водопоглощение в слое до подработки или над целиком; $R = \sqrt{\pi a l}$ — расчетный радиус влияния; a — пьезопроводность слоя, l — продолжительность опытного нагнетания или налива; r_c — радиус скважины; r_0 — приведенный радиус очистной выработки; M — мощность испытываемого слоя.

Если $q_n > q_n^0$, то опробованный интервал относят к ЗВТ.

В процессе опытных нагнетаний и наливов следует ограничивать повышение уровней в испытываемых интервалах скважин, чтобы не вызвать посредством гидроразрыва расслоений дополнительных деформаций слоев, подстилающих расслоения, и тем самым не увеличить искусственно при опыте высоту ЗВТ.

Метод определения высоты ЗВТ наблюдением за температурами подработанных пород основан на нарушении естественного температурного режима пород в результате дренирования в ЗВТ подземных вод и циркуляции по водопроводящим трещинам теплого воздуха, поступающего из действующих выработок. В связи с этим слои пород с повышенной после подработки температурой можно относить к ЗВТ. При отсутствии информации о естественном распределении температур в кровле пласта измерения температур подработанных пород необходимо проводить через равные интервалы глубин в любом количестве пунктов, но не менее 4. Положение верхней границы ЗВТ определяется с помощью неравенства

$$T_{i+1} - T_i > \frac{(T_i - T_{i-1})^2}{T_{i-1} - T_{i-2}}, \quad (2.3)$$

где T_{i-2} , T_{i-1} , T_i и T_{i+1} — температуры пород в 4 последовательных и равноудаленных по нормали к слоистости пунктах с порядковыми номерами, возрастающими сверху вниз.

Существенное превышение левой части неравенства (2.3) над правой дает основание считать, что пункт с температурой T_{i+1} находится в пределах ЗВТ.

Наряду с гидродинамическими и термометрическими методами исследований режима подземных вод в подработанных массивах используются активные сейсмические методы. Использование сейсмического прозвучивания для изучения техногенного режима подземных вод основано на контрастности акустических характеристик сдренированных и водонасыщенных слоев массива. Техногенно нарушенный массив горных пород характеризуется несколькими акустическими параметрами: скоростью распространения продольной упругой волны, спектральным составом и поглощением искусственно генерируемых упругих волн. Эти акустические характеристики косвенно отражают изменения гидродинамического режима и трещиноватости исследуемых слоев. По результатам исследований, выполненных на конкретных объектах, оценка техногенного режима подземных вод базируется на выделении в деформированном массиве зоны трещин, нормальных к напластованию и гидравлически активно связанных с горной выработкой.

Продольные упругие колебания, для которых направление смещения частиц совпадает с направлением распространения волны, в силу своей природы реагируют на трещины, нормальные к направлению их распространения. При этом скорость упругих волн в массиве с ростом трещиноватости уменьшается тем существеннее, чем меньше плотность материала, заполняющего трещину. Амплитуда регистрируемых колебаний при прочих равных условиях также уменьшается вследствие поглощения энергии и высокочастотных составляющих спектра упругих волн.

Дренирование трещиноватого массива приводит к еще более заметному снижению его акустической жесткости, что проявляется в виде более резкого снижения скорости распространения в нем упругих волн, поглощения высокочастотных составляющих спектра и затухания упругих колебаний в деформированных слоях кровли горной выработки. Практическая реализация сейсмического метода предусматривает бурение трех скважин, образующих два створа. Один из створов проходит через нарушенный массив, по нормали к границам выемочного столба, другой — в ненарушенном массиве (см. рис. 2.16). Глубина скважин должна обеспечивать захват границы ЗВТ. Оптимальный диаметр бурения, как показала практика, 93—112 мм.

В процессе эксперимента, на различном удалении по скважине от кровли пласта (см. рис. 2.16) в пределах исследуемого слоя устанавливают небольшой заряд ВВ, например, в скв. 2, в двух других скважинах (скв. 1 и скв. 3) в пределах того же слоя размещают сейсмоприемники, соединенные в виде гирлянды. Сейсмоприемники обеспечивают преобразование даже небольших по амплитуде механических колебаний в элек-

трические импульсы, передаваемые по кабелю на поверхность. Заряд ВВ возбуждается электродетонатором мгновенного действия. Возникшие при взрыве колебания в виде упругой волны распространяются в исследуемом массиве. Момент прихода колебаний в точки, где установлены сейсмоприемники, регистрируется наземной сейсмической аппаратурой на сейсмограмме или магнитной ленте.

В процессе обработки записанной информации вычисляют скорости продольных волн в соответствующих слоях над целиком полезного ископаемого и над выработанным пространством, определяют спектральный состав пришедших колебаний и степень изменения их амплитуды. Аналогичным образом проводят исследования, возбуждая упругие колебания в исследуемых слоях в скважинах 1 и 3 поочередно и регистрируя приход упругих волн в двух оставшихся скважинах. Такая компоновка позволяет определить акустические характеристики пород массива, соответствующие различным его состояниям. Контрастность значений акустических характеристик естественного и сдвинутного массива позволяет количественно оценить степень деформированности массива. По потенциальным возможностям сейсмическое прозвучивание приближается к методу пьезометрии, так как оно позволяет оценивать состояние массива в определенной плоскости, ограниченной двумя скважинами. Следовательно, сейсмический метод дает возможность оценить осредненные характеристики массива на определенной базе.

Техногенные изменения проницаемости массива над ЗВТ в результате сдвижения проявляются в ее резком увеличении вдоль слоистости за счет образования трещин расслоения между отдельными прогибающимися слоями или группами совместно прогибающихся слоев [8] и по нормали к слоистости за счет растяжения слоев, увеличивающего раскрытие естественных секущих трещин. Трещины расслоения и расширяющиеся естественные секущие слои трещины локализуются над крайними частями выработанного пространства, в зоне разгрузки. Очевидно, что наиболее благоприятные условия для образования и сохранения трещин расслоения складываются в массивах более прочных пород.

Трещины расслоения могут иметь раскрытие от единиц до нескольких десятков миллиметров. Положение и проводимость трещины расслоения удобно выявлять с помощью расходометрического каротажа и нагнетаний в изолированные тампоном интервалы опытных скважин. Наиболее эффективно совместное применение этих двух методов в виде расходометрического каротажа изолированного тампоном интервала скважины в процессе нагнетания. Это позволяет исключить искажающее опыт влияние слоев и трещин с высокой проводимостью и повысить водопоглощение в тонких трещинах расслоения повышением давления воды в испытуемом интервале кровли. Расходомер

перемещается по скважине при расслабленном тампоне без изменений установленного расхода нагнетания.

Экспериментальные оценки проницаемости пород по нормали к слоистости и интенсивности перетекания через относительно водоупорные слои в естественном (ненарушенном) состоянии и на подработанных участках целесообразно проводить с использованием термометрии. Измерения температур пород по пути фильтрации через один относительно слабопроницаемый слой или свиту таких слоев общей мощностью m удобно выполнять через равные интервалы глубин Δm в кровле, в середине и в почве свиты, что позволяет оценить скорость фильтрации (перетекания) v_{Π} по зависимости [44]

$$v_{\Pi} = -\frac{2\lambda}{\Delta m c_0 \rho_0} \left(1 - 2 \frac{T - T_K}{T_{\Pi} - T_K} \right), \quad (2.4)$$

где λ — теплопроводность слабопроницаемых пород; c_0 — удельная теплоемкость воды; ρ_0 — плотность воды; T_K , T и T_{Π} — соответственно температура пород, измеренная в кровле, в середине и в почве слабопроницаемого слоя или свиты таких слоев.

Коэффициент фильтрации через слабопроницаемый слой

$$k_0 = \frac{v_{\Pi} m}{H_K - H_{\Pi}}, \quad (2.5)$$

где H_K и H_{Π} — напоры в кровле и почве слабопроницаемого слоя.

Рассмотренный выше комплекс методов специальных исследований уже на протяжении многих лет широко используется ВНИМИ при изучении изменений гидродинамического режима подземных вод для анализа и схематизации гидрогеологических условий на подработанных участках шахтных полей.

В Прибалтийском сланцевом бассейне, на поле шахты «Ленинградская» (1975—1980 гг.) проводились комплексные специальные гидрогеологические исследования для долгосрочного прогнозирования водопритоков в шахты и уровня режима подрабатываемых водоносных горизонтов. Кровля промпласта горючих сланцев (сверху вниз) сложена набаласким O_3nb (мощностью до 25 м), везенбергским O_3ws (12—17 м), вазалемским O_2vs (2 м), кегельско-хревитским O_2kg+hr (14—22 м), шундоровским O_2sn (10—20 м), итферским O_2it (12—16 м) и кукерским O_2kk (до 24 м) горизонтами.

Везенбергский горизонт, сложенный закарстованными кавернозными известняками и доломитами, представляет собой самый водообильный горизонт кровли промпласта с проводимостью порядка $100 \text{ м}^2/\text{сут}$. Все остальные горизонты в основном сложены глинистыми, доломитизированными или мергелистыми известняками. Единичные тонкие закарстованные прослои с проводимостью порядка $10 \text{ м}^2/\text{сут}$ в набаласком, кегельско-хревитском, итферском и кукерском горизонтах дают основание считать их водоносными, тогда как вазалемский и шундоровский

горизонты, включающие слои глины и не закарстованные, можно считать относительными водоупорами.

Для выяснения характера гидродинамической связи выработок с везенбергским водоносным горизонтом при управлении кровлей полным обрушением изучался техногенный режим фильтрации в подработанной кровле над лавой панели 103 с помощью наблюдательной скважины, оборудованной над целиком в 45 м от монтажной камеры и в 7 м от штрека лавы 10316. В скважине были установлены 9 датчиков гидростатического давления — дистанционных струнных манометров ДС-13. Глубина кровли промпласта на участке лавы составляет 72 м, вынимаемая его мощность 1,9 м, длина очистного забоя лавы 70 м. Положение горизонтов в разрезе кровли, глубины установок манометров и измеренные давления воды представлены на рис. 2.9.

Наблюдения за показаниями манометров были начаты через несколько месяцев после выхода очистного комплекса из монтажной камеры. В связи с этим информации о режиме напоров подземных вод в кровле выработки в период ее первых посадок не было. Полученные в дальнейшем результаты измерений давлений воды на различных глубинах показали, что при высоте столба воды в везенбергском горизонте более 12 м уровень в залегающем под ним иевском водоносном горизонте, приуроченном к кегельско-хревитским отложениям, находился ниже относительно водоупорного вазалемского горизонта. Постепенное уменьшение с глубиной напоров в иевских и шундоровских отложениях свидетельствует о наличии перетекания через шундоровский водоупор из иевского в итферско-кукерский водоносный горизонт и далее в выработанное пространство. По соотношениям напоров, измеренных манометрами 5, 6, 7 и 8, установлено, что относительно водоупорна только нижняя часть шундоровского горизонта, проницаемость его верхней части по нормали к напластованию такая же, как и в иевском. Полное отсутствие гидростатических давлений только на манометрах 3 и 4 давало основание считать, что водопроводящие трещины не захватили слои шундоровского горизонта. Таким образом, высота ЗВТ над лавой 10316 не превышала 23 м и прямой гидравлической связи по водопроводящим трещинам между лавой и везенбергским водоносным горизонтом не было.

На участке панели 22 шахты «Ленинградская» над лавами с полным обрушением кровли высота ЗВТ определялась наблюдениями за напорами и температурами в подработанной кровле, расходометрическим каротажем скважин и сейсмическим прозвучиванием. Очистные работы на участке панели 22 проводились на глубине 92 м при вынимаемой мощности и длине очистных забоев лав таких же, как на участке панели 103.

Наблюдения за напорами выполнялись в скважине, расположенной над целиком в 13 м от штрека лавы 2206 у середины выемочного столба, посредством 7 датчиков гидростатического

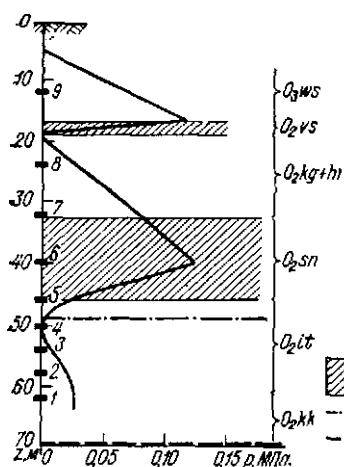


Рис 2.9. График изменения гидростатического давления p с глубиной z в кровле промпласта, подработанной лавой 10316.

1 — манометр и его номер; 2 — относительно водоупорные породы; 3 — верхняя граница зоны водопроводящих трещин; 4 — кровля промпласта.

давления (дистанционных струнных манометров ДС-13), установленных до глубины 72 м. Результаты наблюдений показали, что характер изменения давления воды в подработанной кровле такой же, как над лавой 10316, а высота ЗВТ над лавой 2206 не превысила 20 м.

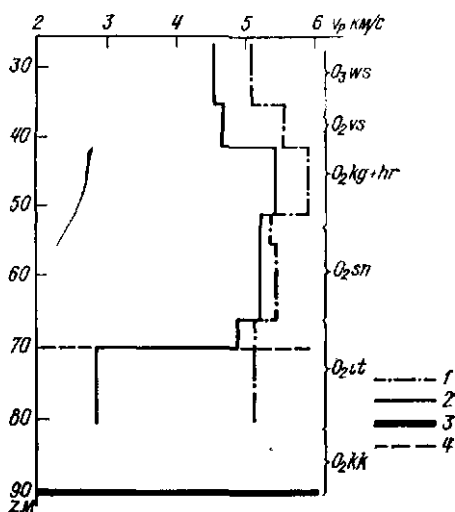
Сейсмическое прозвучивание на участке панели 22 выполнялось над двумя спаренными лавами 2203 и 2204, разделенными целиком шириной 8 м. Результаты исследований показали, что ЗВТ над выработанным пространством распространилась на высоту не более чем 20 м (рис. 2.10). В этой зоне отмечено резкое изменение скорости передачи упругих колебаний в породах итферско-кукерского водоносного горизонта. Повторным определением высоты ЗВТ над лавами 2203 и 2204 через 2 года практически не установлено «залечивания» нормально секущих трещин в породах кровли очистной выработки.

В двух скважинах, пробуренных до глубины 80 м над целниками у внешних границ выработанного пространства лав 2203 и 2204 для сейсмического прозвучивания их кровли, был выполнен расходометрический картаж, в результате которого отмечено поступление воды в обе скважины из закарстованного просоя на глубине 72 м. Поглощение воды из скважин отмечалось на несколько метров глубже. Следовательно, высота ЗВТ над лавами 2203 и 2204 по результатам расходометрического каротажа не более 18 м.

После сейсмического прозвучивания кровли в скважине, расположенной у внешней границы лавы 2204, оценивались высота ЗВТ и интенсивность перетекания из везенбергского и иевского водоносных горизонтов через деформированный сдвижением шундоровский относительный водоупор в очистные выработки. С этой целью в кровле, в середине и в подошве шундоровского горизонта на глубинах соответственно 50, 60 и 70 м были установлены терморезисторы типа ММТ, проградуирован-

Рис 2 10 Результаты сейсмического прозвучивания массива пород над лавами 2203 и 2204.

1 — график изменения скорости продольных волн v_p с глубиной z в породах над целиком полезного ископаемого; 2 — то же, в породах над выработанным пространством; 3 — кровля разрабатываемого пласта; 4 — верхняя граница ЗВТ.



ные с лимитированием погрешности не выше $0,04^{\circ}\text{C}$. Пространство скважины между терморезисторами было заполнено глиной для исключения конвективного переноса тепла. Измеренные температуры пород горизонта сверху вниз составили в августе 1979 г. $5,58$, $5,68$ и $6,2^{\circ}\text{C}$. При таком распределении температур в шундоровском водоупоре ЗВТ могла захватить только самую нижнюю его часть на глубине около 70 м, где отмечено резкое повышение температуры на $0,52^{\circ}\text{C}$ вместо отмеченного выше — на $0,1^{\circ}\text{C}$. В результате четырех методов определения высоты ЗВТ было установлено, что водопрводящие трещины над выработками с обрушением кровли на участке панели 22 не распространяются выше чем на 20 м и не пронизывают шундоровский слой.

В соответствии с отмеченными выше распределением температур в шундоровском горизонте и зависимостью (2.4) при среднем для горизонта коэффициенте теплопроводности пород $2,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ скорость вертикальной фильтрации в конце лета 1979 г. была близкой к $6 \cdot 10^{-3} \text{ м/сут.}$ Скорость перетекания для этого же пласта, оцененная балансовым методом, оказалась практически такой же — $6,8 \cdot 10^{-3} \text{ м/сут.}$

В Карагандинском угольном бассейне на поле шахты им. М. И. Калинина в 1975 г. ВНИМИ выполнялись исследования для оценки условий ведения горных работ под аллювиальными отложениями долины р. Чурубай-Нура. Гидрогеологические условия опытного участка характеризуются наличием водообильного приповерхностного горизонта, приуроченного к гравийно-галечниковым аллювиальным отложениям мощностью до 15 м, которые залегают в кровле водоносного комплекса каменноугольных отложений, представленного песчаниками, пластами угля, аргиллитами и алевролитами. Этот горизонт подстилается

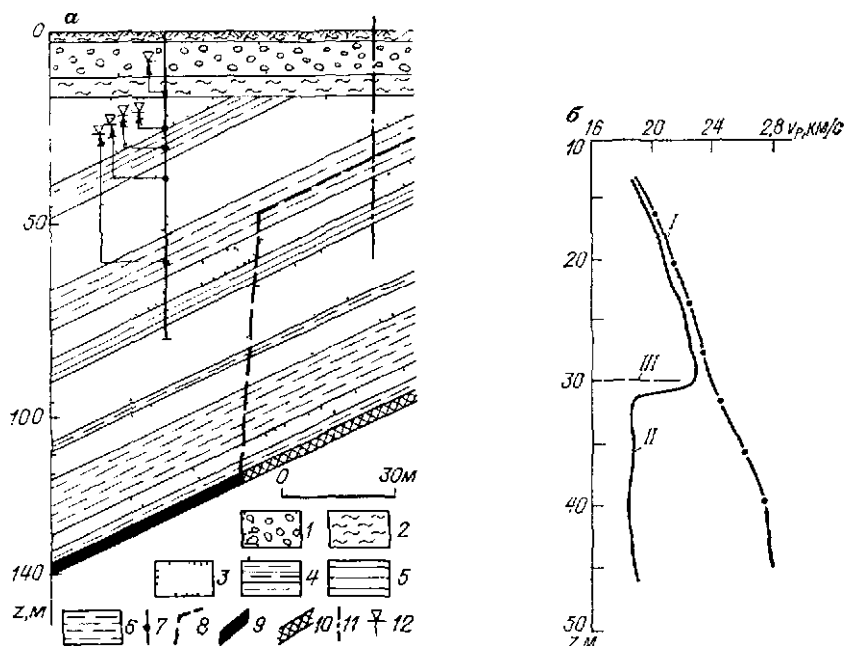


Рис. 2.11 Результаты исследований на поле шахты им М. И. Калинина
 а — геологическое строение опытного участка и распределение напора H по глубине z в кровле пласта K_{12} , б — графики изменения с глубиной z скорости продольных волн v_p в кровле пласта K_{12} над целиком (I) и над выработанным пространством (II) и верхняя граница ЗВТ (III)
 1 — песок с галькой, 2 — глина, 3 — песчаник, 4 — переслаивание аргиллита и алевролита, 5 — аргиллит, 6 — алевролит; 7 — скважина с манометрами, 8 — граница ЗВТ; 9 — угольный пласт, 10 — выработанное пространство, 11 — профиль сейсмического прозвучивания, 12 — пьезометрический уровень по манометру

слоем неогеновых глин мощностью 5—7 м (рис. 2.11, а). Наряду с определением высоты ЗВТ в данных условиях возникла необходимость в изучении режима наноров в подрабатываемом водоносном комплексе. Горные работы на опытном участке велись по пласту K_{12} на глубине 100—140 м. Длина очистного забоя лавы составляла около 60 м, вынимаемая мощность — 2,3 м. Управление кровлей — полное обрушение. Определение высоты ЗВТ выполнялось параллельно наблюдениям за напорами и сейсмическим прозвучиванием массива.

Для фиксирования напоров во время проведения очистных работ в скважине, пробуренной вблизи выемочных границ лавы по пласту K_{12} , были установлены датчики гидростатического давления (струнные манометры ДС-13) в различных слоях подрабатываемой кровли с глубины 60 м и выше. Длительные наблюдения за изменением давлений по датчикам выявили устойчивый разрыв уровней четвертичного водоносного горизонта и напоров угленосного комплекса, что свидетельствует прежде всего о затрудненной гидравлической связи между ними. Вместе

с тем напоры на всех манометрах, установленных в угленосной толще, оставались достаточно высокими, свидетельствуя о расположении верхней границы ЗВТ на участке скважины глубже 60 м от поверхности или о высоте ЗВТ над кровлей выработки не более 60 м (см. рис. 2.11, а). Таким образом, очистные работы по пласту K_{12} не повлияли на режим подземных вод четвертичного водоносного горизонта.

По результатам сейсмического прозвучивания (рис. 2.11, б) установлено, что над выработанным пространством на глубине 30 м от поверхности происходит резкое изменение скорости продольных волн и заметное поглощение высокочастотных составляющих упругих колебаний. Следовательно, залегающие глубже отложения характеризуются явно повышенной трещиноватостью и сдренированностью, а верхняя граница ЗВТ в исследуемых условиях расположена на глубине 30 м. Высота ЗВТ над кровлей выработанного пространства в таком случае равна 60 м и совпадает с результатом наблюдений за напорами.

Результаты исследований послужили основанием для рекомендации по частичной выемке запасов угля под обводненными аллювиальными отложениями долины р. Чурубай-Нура на глубинах меньших регламентированных действовавшими в то время бассейновыми правилами охраны природных объектов.

В Донбассе, на шахте им. Г. Г. Капустина при изучении в 1972—1973 гг. условий выемки запасов угля из предохранительного целика под р. Северный Донец высота ЗВТ над выработками по пласту m_3 определялась параллельно двумя методами: наблюдением за напорами и сравнением удельных водопоглощений в подработанной кровле и над целиком. Участок для проведения исследований с характерным для пойменной части шахтного поля геологическим строением был выбран вне зоны влияния реки в пределах выемочных границ западной лавы 5. Угленосные отложения здесь представлены алевролитами, песчаниками, известняками и аргиллитами (рис. 2.12). На опытном участке были опробованы две скважины: одна над целиком, другая — в подработанной толще. В процессе бурения скважин через каждые 15—20 м производились опытные нагнетания воды для оценки проницаемости пород и измерялись напоры подземных вод в изолированных тампоном интервалах. Положение верхней границы ЗВТ было установлено в результате сравнения удельных водопоглощений, полученных по нагнетаниям в целике $q_n = 0,004$ л/(мин·м²) в интервале глубин 189—211 м и в подработанной толще $q_n = 0,8$ л/(мин·м²) в интервале глубин 198—205 м. Результаты наблюдений за напорами подземных вод в скважине, пройденной в подработанной толще пород, показали, что в слоях, залегающих над кровлей пласта m_3 в 90 м и выше, напоры устанавливались на 2—10 м выше земной поверхности. В слоях, залегающих в пределах 90 м над пластом угля, напоры оказались сниженными

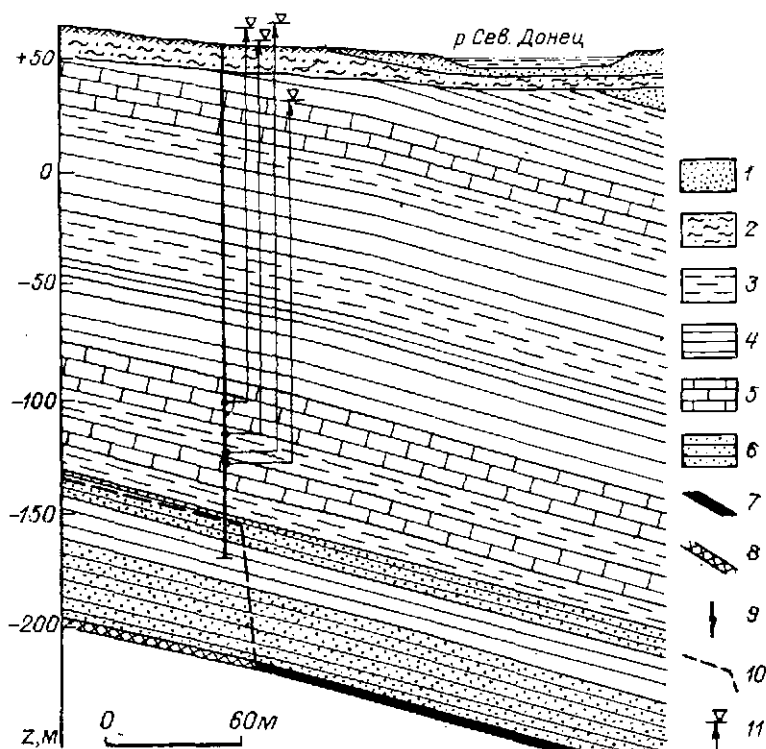


Рис. 2.12. Геологическое строение и распределение напоров в кровле пласта m_3^H на опытном участке шахты им. Г. Г. Капустина.

1 — песок; 2 — суглинок; 3 — алевролит; 4 — аргиллит; 5 — известняк; 6 — песчаник; 7 — угольный пласт; 8 — выработанное пространство; 9 — опытная скважина; 10 — граница ЗВТ; 11 — пьезометрический уровень в опробуемом интервале.

и составили около 30 м. Зафиксированная сравнительно малая высота ЗВТ (около 60 м) над кровлей разрабатываемого пласта m_3^H и ограниченное нарушение гидродинамического режима в подработанной слоистой толще определили возможность выемки запасов угля из предохранительного целика под р. Северный Донец.

Исследования для определения высоты ЗВТ и оценки техногенной проницаемости пород по нормали к напластованию между верхней границей ЗВТ и подрабатываемым водным объектом проводились в 1981—1982 гг. на шахте «Пионерка» ПО «Ленинскуголь» в Кузбассе. Исследования были направлены на определение условий безопасной выемки свиты, представленной тремя угольными пластами с суммарной мощностью 5,8 м, залегающими на глубинах 300—350 м от земной поверхности и на 150—200 м ниже затопленных выработок. Исследования проводились для оценки параметров ЗВТ и определения проницаемости пород вскрест напластования с целью прогноза водопрытков по мере увеличения площади

горных работ. Датчики гидростатического давления и температуры были установлены в скважине, пройденной на опытном участке над целиком в 10 м от выемочных границ лавы по пласту 11 с вынимаемой мощностью 1,8 м; к моменту заложения скважины на этом участке уже был отработан в 1970 г. пласт 9 мощностью 1,8 м на глубине 292 м, а в 1976 г. — пласт 10 мощностью 2,2 м на глубине 329 м. Датчики давления и температуры были попарно размещены в виде гирлянды по стволу скважины начиная с глубины 150 м и изолированы друг от друга глинистыми пробками. Результаты наблюдений установившихся давлений и соответствующих напоров подземных вод в толще пород, подработанных пластами 9 и 10, показаны на рис. 2.13, а. Анализ приведенных графиков свидетельствует о нисходящем характере нотока подземных вод в этой толще.

Высота ЗВТ на опытном участке определялась различными методами. При отработке свиты пластов 9 и 10 высота ЗВТ

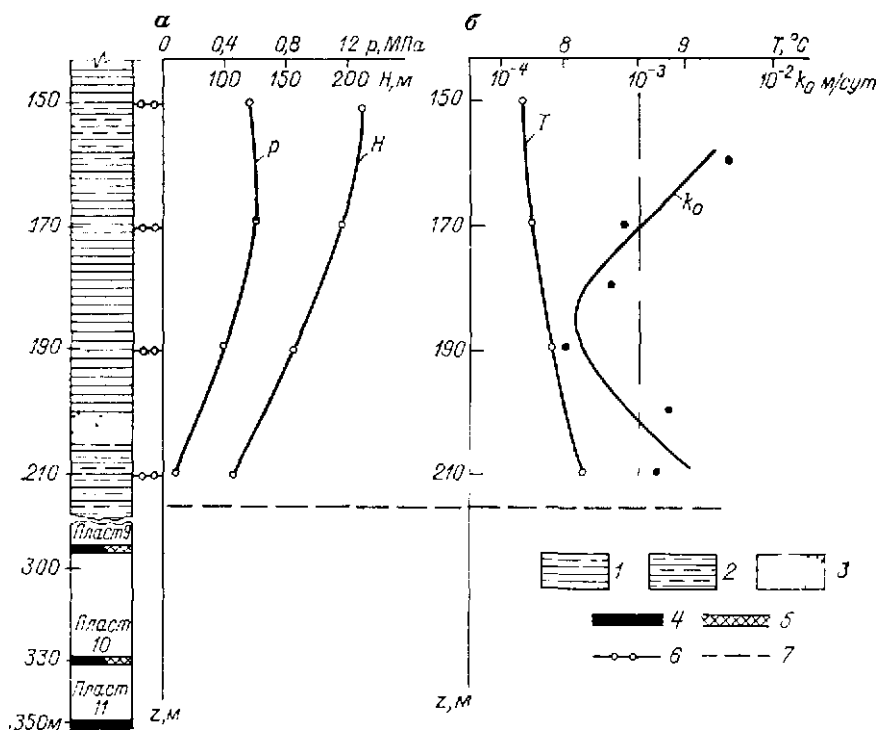


Рис. 2.13. Результаты исследований на шахте «Пионерка» (Кузбасс). а — литологическая колонка и графики распределения гидростатического давления p и напора подземных вод H в кровле отработанных пластов 9 и 10, б — графики изменения температуры T и коэффициента вертикальной фильтрации k_v . 1 — аргиллит; 2 — переслаивание аргиллита и алевролита; 3 — песчаник; 4 — угольный пласт; 5 — выработанное пространство; 6 — глубина расположения датчиков давления и температуры; 7 — верхняя граница ЗВТ.

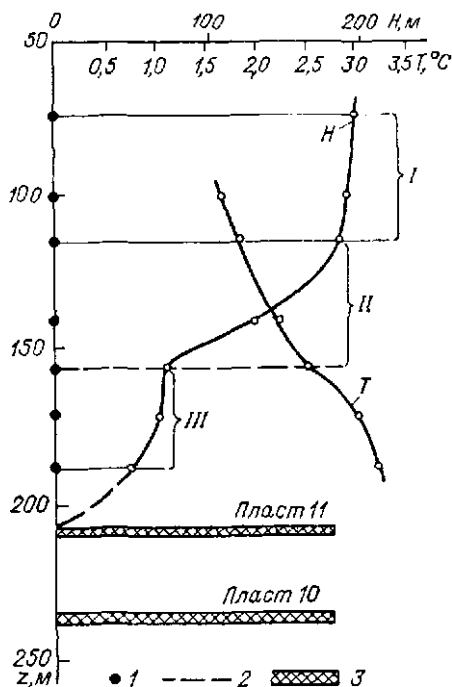
составила 90 м над кровлей верхнего пласта 9. После развития очистных работ по нижнему пласту 11 высота ЗВТ и характер распределения напоров подземных вод в слоях пород над ее верхней границей практически не изменились. По результатам наблюдений температур в различных точках подработанной толщи (рис. 2.13, б) можно сделать вывод, что температурное поле осталось неизменным после проведения очистных работ по нижнему пласту 11. Обработка данных термометрии с учетом распределения напоров в слоях пород, расположенных выше верхней границы ЗВТ, позволила определить значения коэффициентов вертикальной фильтрации k_0 , получив их распределение по глубине изучаемой толщи (см. рис. 2.13, б). При среднем значении $k_0 = 10^{-3}$ м/сут расчетный водоприток по площади очистных выработок вполне соответствует фактическим притокам в горные выработки, что может аргументировать достоверность оценки проницаемости подработанного массива.

Аналогичные комплексные исследования были выполнены в 1984—1985 гг. в Печорском угольном бассейне на шахте «Глубокая» ПО «Интауголь», где изучались условия выемки свиты из двух сближенных угольных пластов 11 и 10 с суммарной вынимаемой мощностью около 5 м, залегающих под р. Угольная выше горизонта безопасной глубины, предусмотренной действующими в настоящее время нормативами [38]. Одна из скважин была пробурена на участке, уже подработанном обоими пластами — вначале верхним пластом 11, а затем (через 6 месяцев) нижним пластом 10. В скважине были установлены датчики для измерения гидростатического давления и температуры в подработанной толще. На графике распределения напоров H подземных вод в исследуемой толще (рис. 2.14) можно выделить три участка: I — с высокими остаточными напорами от 195 до 185 м (напоры отсчитываются от кровли верхнего пласта 11); II — со сниженными напорами (до 70—185 м) в техногенно нарушенной слабопроницаемой толще переслаивания аргиллитов, алевролитов и песчаников; III — зона существенного снижения напоров, в пределах которой 3 нижних датчика зафиксировали отсутствие давлений. «Перелом» на графике распределения напоров (граница участков II и III) соответствует положению верхней границы ЗВТ, расположенной в 40 м над кровлей выработанного пласта 11. Совместная обработка данных пьезометрии и термометрии дала возможность определить коэффициенты вертикальной фильтрации пород техногенно нарушенной толщи над верхней границей ЗВТ и затем оценить удельный водоприток по отработанной площади, составивший $3,3 \cdot 10^{-4}$ м³/сут.

Комплексация пьезометрии и термометрии скважин позволяет контролировать безопасность очистных горных работ путем систематических наблюдений по соответственно оборудованным станциям. С 1982 г. систематические наблюдения та-

Рис. 2.14. Графики изменения напоров H и температур T по глубине z в массиве над выработанным пространством по пластам 10 и 11 на шахте «Глубокая» в Печорском угольном бассейне.

1 — места установки датчиков гидростатического давления и температуры; 2 — верхняя граница ЗВТ; 3 — выработанное пространство.



кого рода ведутся на поле шахты «Восточная» ПО «Интауголь» для контроля безопасности разработки угольного пласта 10 при вынимаемой мощности 2,5 м под р. Большая Инта. В 1984 г. на участке исследований одна из наблюдательных станций была оборудована в целике в 15 м от рельсового штрека лавы, где пласт 10 залегал под руслом реки на минимальной глубине 120 м. По отношению к границе ранее отработанной площади по вышележащему пласту 11 станция располагалась в 80 м (в направлении восстания слоев). Наблюдательная скважина расположена в 100 м от линии уреза воды в реке. Оборудование станции-скважины было закончено к моменту, когда линия очистного забоя лавы находилась от нее на расстоянии 100 м. Графики временного прослеживания напоров подземных вод в различных по глубине точках подрабатываемого массива представлены на рис. 2.15, а.

Активное снижение напоров в слоях пород, к которым приурочены четыре нижних датчика, началось до подхода очистного забоя к станции. После прохождения забоя мимо наблюдательной станции в конце апреля — начале мая 1985 г. напоры подземных вод, фиксируемые нижними датчиками, продолжали снижаться и начиная с сентября 1985 г. стабилизировались. Снижение напоров обусловлено дренирующим действием очистной выработки по пласту 10, активизированным горными выработками по ранее отработанному пласту 11. В то же время напоры подземных вод в слоях пород, залегающих до глубины 40—50 м, практически не изменились после прохождения очистного забоя около наблюдательной станции.

Распределения напоров и температур в пределах изучаемого массива (рис. 2.15, б) свидетельствуют о весьма ограниченной вертикальной фильтрации подземных вод, что под-

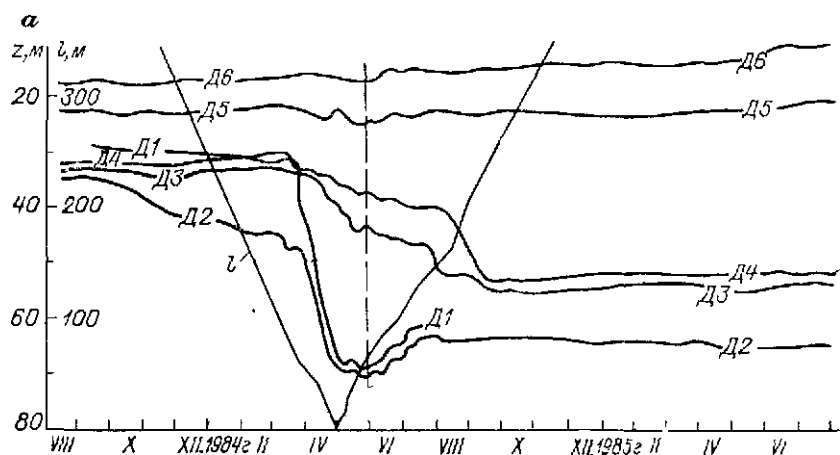
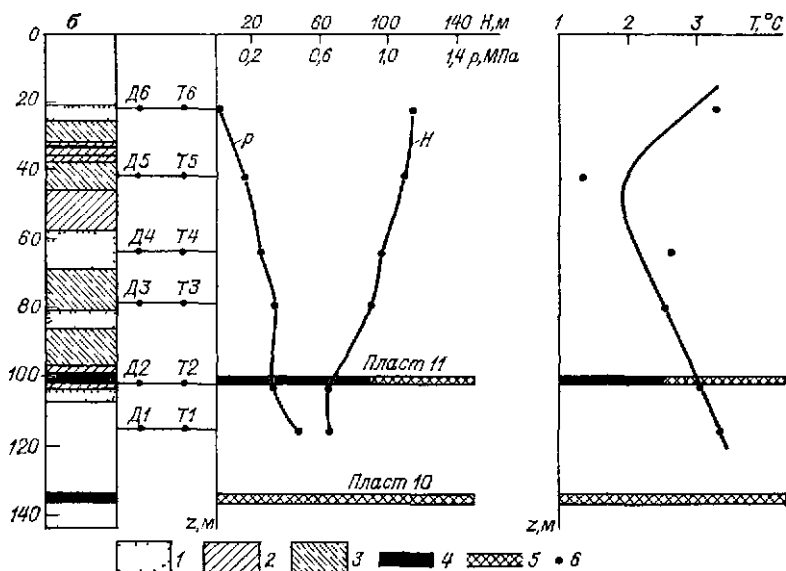


Рис. 215. Результаты исследований на шахте

a — графики временного прослеживания уровней подземных вод по датчикам давления подземных вод от земной поверхности, *l* — расстояние от очистного забоя до распределения гидростатического давления *p*, напора
1 — песчаник; 2 — аргиллит; 3 — алевролит; 4 — угольный пласт; 5 — выработанное

твердилось практически полным отсутствием водопритоков в лавы, отрабатываемые по пласту 10 под р. Большая Инта. В целом результаты проведенных исследований на шахте «Восточная» позволили сформулировать вывод об ограниченном влиянии очистных работ на режим подземных вод в подрабатываемой толще пород даже при выемке двух сближенных пластов 11 и 10, проявившемся в минимальном развитии техногенной трещиноватости в кровле отработанных пластов, незначительных «срезках» уровней в слоях пород, залегающих глубже 50 м, и отсутствии изменений уровня режима в горизонтах, расположенных до глубины 50 м. Это связано, по-видимому, с особенностями геологического строения Интинского месторождения и литологического состава пород угленосного комплекса. По рекомендациям ВНИМИ, основанным на результатах исследований, под р. Большая Инта на шахте «Восточная» извлечено более 2 млн. т угля.

Комплексные исследования условий ведения горных работ под водоносным горизонтом проводились в 1974—1975 гг. и на рудном месторождении пластового типа. Кровля промпласта представлена переслаиванием слабых песчаников и алевролитов, глин и карбонатных пород. Выше, на удалении 51—77 м от кровли промпласта, залегают песчаники, к которым приурочен водоносный горизонт.



«Восточная» в Печорском угольном бассейне.

ления Д1—Д6 в процессе ведения очистных горных работ (z — глубина залегания наблюдательной станции); б — литологический разрез по опытной скважине, эпоры подземных вод H и температуры массива T на 1 июня 1985 г. пространство, б — места установки датчиков давления и температуры.

Исследования выполнялись на опытном участке, где водоносный горизонт отсутствовал. Очистные работы там проводились на глубине 80 м от поверхности при длине забоя лавы около 50 м и вынимаемой мощности 3 м. Высота ЗВТ определялась сейсмическим прозвучиванием и длительными наблюдениями за поровым давлением в слоях кровли очистной выработки.

Скважины для сейсмического прозвучивания были расположены по одному створу (рис. 2.16, а) и позволили оценить акустические характеристики пород в естественном залегании и над выработанным пространством. Результаты сейсмического прозвучивания массива над выработанным пространством (рис. 2.16, б) свидетельствуют о том, что заметное изменение скорости распространения продольных волн наблюдается на глубине около 50 м от поверхности. При этом происходит одновременное снижение частоты упругих колебаний в области первого вступления в 2 раза при уменьшении их амплитуды в 3 раза. Эти данные говорят о том, что ЗВТ распространилась над выработанным пространством на высоту около 30 м от кровли выработки и всего лишь в 10 раз превысила вынимаемую мощность.

На этом же участке над целиком, в 6 м от границы выработанного пространства, в специальной скважине были уста-

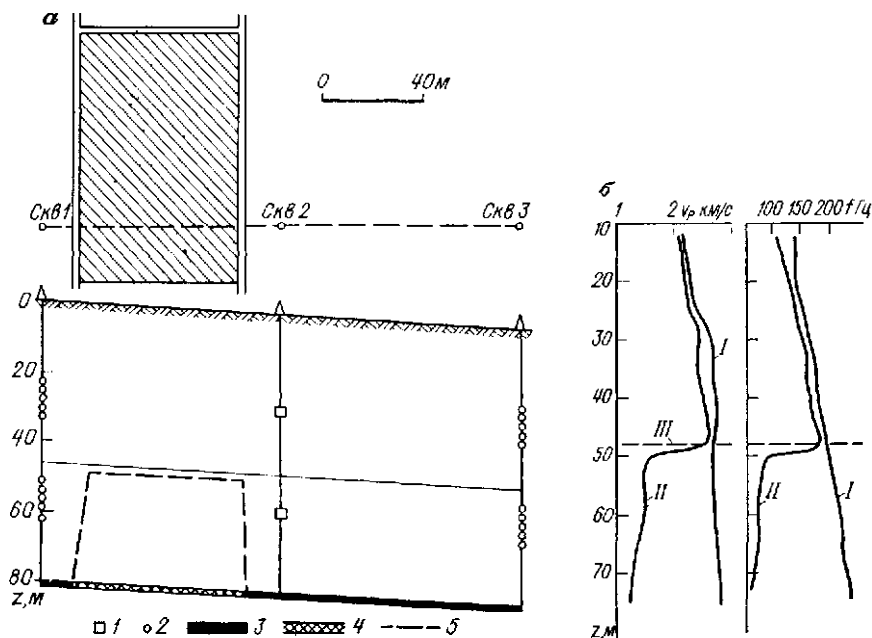


Рис 216 Схема расположения скважин для сейсмического прозвучивания массива на опытном участке (а) и графики изменения с глубиной z скорости продольных волн v_p и частоты упругих колебаний f над целиком (I) и над выработанным пространством (II) и верхняя граница ЗВТ (III) (б) 1 — взрываемые заряды; 2 — сейсмоприемники; 3 — вынимаемый пласт (целик); 4 — выработанное пространство; 5 — границы ЗВТ

новлены 5 датчиков гидростатического давления — дистанционных струнных манометров ДС-13. Датчики располагались над кровлей промпласта в 13,0; 21,2; 26,5; 39,5 и 51,2 м. После прохождения очистного забоя рядом со скважиной на двух нижних датчиках было отмечено снижение давления, средний к этому времени вышел из строя, а на двух верхних давление не менялось. Следовательно, высота ЗВТ по наблюдениям за давлениями (напорами) воды в кровле выработки не превысила 39 м. Таким образом, результаты сейсмического прозвучивания и наблюдений за напорами показали, что при подработке водоносного горизонта верхняя граница ЗВТ над промпластом должна находиться значительно ниже подошвы водоносного горизонта.

После окончания очистных работ в лаве давление воды на датчике, расположенном в 21,2 м от кровли промпласта, начало постепенно расти и за 12 мес (к концу 1975 г.) поднялось до 0,045 МПа, а к концу 1976 г. — до 0,15 МПа. Это свидетельствует о том, что с течением времени часть глинистых слоев в подработанной кровле постепенно восстановила свои водо-

упорные свойства и уже через год высота ЗВТ снизилась по крайней мере до 21 м.

На всех рассмотренных выше и многих других шахтах специальные гидрогеологические исследования в период эксплуатации позволили обосновать возможность безопасной выемки значительных запасов сланца, угля и руды, законсервированных в предохранительных целиках. Отсюда очевидна большая народнохозяйственная эффективность таких исследований. С другой стороны, специальные гидрогеологические исследования в период эксплуатации шахт позволили существенно уточнить условия формирования водопритокков в горные выработки, что имеет важное значение при оценках закономерностей техногенного режима подземных вод.

3. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМАТИЗАЦИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ И ПРОГНОЗЕ ТЕХНОГЕННОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

3.1. Общие принципы гидрогеологической схематизации

Гидрогеологическая схематизация предполагает представление реальных природных и инженерных условий в виде определенной расчетной схемы-модели. Термин «схематизация» объединяет широкий круг вопросов, связанных с выбором и обоснованием логической и математической моделей изучаемого объекта. Переход к расчетной схеме является одним из наиболее важных звеньев в общем цикле гидрогеологических исследований, поскольку от доброкачественности схематизации зависит достоверность и надежность прогноза. Сложность схематизации усматривается в том, что в основе ее лежит творческое начало, так как феноменальность изучаемого природного процесса и обычная ограниченность информации об условиях его развития серьезно лимитируют возможности однозначного построения детерминированной или стохастической расчетной модели. Представление о схематизации как о формальном переходе от качественной гидрогеологической схемы к математической модели путем «механического» наделения первой количественными характеристиками не отвечает современным требованиям к методике гидрогеологических исследований. Схематизация предполагает в конечном итоге полную математическую формулировку схемы-модели, которая включает установление параметров последней, граничных и начальных условий, выбор способа реализации модели и оценку ее качества. В связи с этим актуальной является задача рационального сочетания критериев физического правдоподобия с формально-математическими критериями при обосновании конкретной расчетной схемы.

В рамках гидрогеологической схематизации целесообразно выделить этап вычислительной схематизации, целью которой является выбор и обоснование оптимального способа реализации математической модели, сформулированной на предшествующем этапе. Направленность, детальность и формы схематизации определяются конкретными условиями, однако в любом варианте должны быть учтены:

— цели и задачи гидрогеологического прогноза, масштаб прогнозируемого процесса, его специфика;

— степень геологической и гидрогеологической изученности рассматриваемого объекта;

— требуемая детальность и точность прогноза;

— применяемые методы прогноза (аналитический, балансовый, аналогия, моделирование).

В общем случае должна сохраняться определенная последовательность схематизации, основными этапами которой являются:

— анализ геологических особенностей изучаемого объекта, позволяющий составить представление о его гидрогеологической структуре, выделить основные водоносные горизонты;

— оценка условий питания и разгрузки подземных вод в естественном и техногенном режиме;

— количественная оценка параметров выделенных водоносных горизонтов, характеристик их питания по данным опытно-фильтрационных работ и режимных наблюдений, выбор и полная математическая формулировка схемы-модели фильтрационного процесса;

— проверка функционального соответствия математической модели результатам натурных наблюдений и вспомогательной информации об изучаемом объекте;

— оценка качества модели;

— вычислительная схематизация.

Геологический и гидрогеологический анализ, необходимый для обоснования математической модели фильтрационного процесса, является привилегией специалистов-гидрогеологов, однако количественная оценка этой модели требует от них определенной математической подготовки, гармонично сочетающейся с геологическим опытом и соответствующей интуицией. Особенностью схематизации при изучении месторождений полезных ископаемых является наличие обширных данных о геологическом строении изучаемого района (в отличие от задач мелнирации или водоснабжения), однако плотность этой информации обычно неравномерна — максимум ее связан с площадью рудного тела или пластовой (углеисной) структуры.

Доброкачественность схематизации может быть обеспечена при выполнении общих принципов гидрогеологических исследований, т. е. при непрерывности схематизации, адаптации расчетных схем, обратной связи схематизации с особенностями изучаемого объекта [21, 29]. Непрерывность схематизации определяется стадийностью в проведении разведочных работ и увеличением объема информации в процессе режимных наблюдений при строительстве и эксплуатации горнодобывающего предприятия. Последовательное и непрерывное проведение схематизации по мере накопления информации должно обеспечивать постоянное улучшение качества математической модели гидрогеологического объекта. Основные трудности при осуществлении непрерывной схематизации состоят в необходимости

согласования разномасштабной исходной информации, получаемой на различных стадиях разведки и эксплуатации месторождений. Принцип адаптации математической модели при схематизации предполагает максимальное использование имеющейся исходной информации для построения модели, оценку последней с планированием новых целенаправленных наблюдений и экспериментов для улучшения ее качества.

Согласно принципу обратной связи, схематизация должна выступать в качестве связующего звена между результатами гидрогеологических изысканий (наблюдений) и прогнозируемым поведением изучаемого объекта. Исходя из этого принципа математическая модель должна интерполяционно учитывать объективную информацию о гидрогеологических особенностях изучаемого природного объекта и субъективную информацию о влиянии проектируемых мероприятий на изменение естественного режима подземных вод. Согласно принципу обратной связи, схематизация должна осуществляться таким образом, чтобы наряду с эквивалентностью математической модели результатам режимных наблюдений обеспечивался инженерный запас в прогнозных оценках. Введение коэффициентов запаса является формальным признаком недостаточной изученности объекта исследований.

По той же причине прогнозные оценки приходится выполнять, придерживаясь стохастического принципа построения моделей; в простейшем случае этот принцип реализуется при рассмотрении крайних вариантов возможных расчетных схем, функционально соответствующих исходной информации. Более сложная стохастическая функциональная модель может предполагать варьирование ее параметров (например, проводимости или водоотдачи в пределах квазигоднородных участков поля фильтрации).

Схематизацию следует проводить на основе системного подхода к расчетной схеме-модели, которая должна обеспечивать прежде всего решение узко прагматической задачи с четко сформулированной целью прогноза. В этом плане можно ориентироваться на мнение Р. Шеннона [45], согласно которому «модель строится для достижения конкретной цели и ее адекватность оценивается в терминах этой цели».

Оценка качества гидрогеологической схематизации является обязательным ее этапом; принципы и методы оценки качества (калибрации) моделей в настоящее время находятся в стадии разработки. В общем случае оценка качества схемы-модели предусматривает определение ее функциональных свойств по одному или нескольким критериям, среди которых ведущим элементом являются критерии физического правдоподобия [6, 45]. Стратегия калибрации расчетных схем может строиться на основе их факторно-диапазонных оценок [6].

В последние годы основным направлением исследований в области схематизации является разработка различных ме-

тодов коррекции математических моделей, проводящейся по результатам калибровки последних. Улучшение качества модели достигается ее коррекцией после оценки чувствительности исходной модели. Анализ чувствительности модели, который является важнейшим элементом схематизации, заключается в определении связи между изменением параметров модели (или граничных условий) и реакцией на эти изменения. Таким образом, определение чувствительности исходной математической модели, выбранной на основе экспертных оценок исследователя, калибровка этой модели и последующая ее коррекция являются неразрывными звеньями анализа, который должен сопровождать схематизацию.

Использование математического моделирования как совершенного вычислительного средства открывает широкие возможности для проведения доброкачественной схематизации при корректировке исходной модели. Преимущества моделирования проявляются прежде всего в том, что оно позволяет с максимальной эффективностью использовать весь объем исходной информации об объекте в рамках единой математической модели. Моделирование реализует все три основных принципа схематизации, причем математическая модель позволяет отчасти компенсировать тот разрыв между полноценным геологическим анализом и математическими аспектами схематизации, который возникает при калибровке и коррекции модели из-за недостаточно четкого представления о качестве аналитических решений.

Возможность изменения структуры и параметров математических моделей создает предпосылки для оперативного анализа ряда субъективных представлений об объекте исследований и для сопоставления нескольких «конкурентоспособных» вариантов расчетных схем.

Электрическая модель в настоящее время является эффективным техническим средством для практического проведения многофакторного анализа сложной схемы-модели (для анализа ее чувствительности). В силу своей повышенной информативности моделирование дает возможность получать необходимые калибровочные характеристики исходной модели. Зачастую оценка чувствительности отдельных элементов математической модели осуществляется «автоматически» при подготовке электрической модели (несоизмеримость отдельных сопротивлений свидетельствует о подчиненной роли соответствующего элемента модели). Весьма важную роль при калибровке играет непосредственный контакт исследователя с моделью, наглядность получаемых результатов. Реализация математической модели в виде электрической сетки позволяет провести оценку чувствительности модели по расчетным узлам с автоматическим учетом взаимодействия между отдельными элементами поля фильтрации. В отличие от целесообразного при использовании ЭВМ принципа декомпозиции [40] проведение оценки чувствительности и калибровки электрических моделей может осуществляться без дополнительных допущений; проблема оценки согласованности данных по отдельным узлам электрической модели практически снимается.

Специфика техногенного режима подземных вод заключается в многообразии факторов, определяющих закономерности

фильтрационных процессов, поэтому схематизацию реального объекта приходится проводить, сочетая рассмотрение всей модели в целом с анализом отдельных ее элементов. Такое сочетание индуктивных и дедуктивных приемов целесообразно базировать на принципе итераций.

С этих позиций можно рассмотреть критерии эквивалентности типовых расчетных схем, соответствующих отдельным элементам многообразных сложных моделей реальных гидрогеологических объектов. Отметим, что анализ качества сложной расчетной схемы после схематизации ее элементов может быть проведен, как правило, только с применением математической модели.

3.2. Схематизация режима фильтрационных процессов

Природные фильтрационные процессы характеризуются нестационарностью, особенно явно выраженной в условиях нарушения режима подземных вод при эксплуатации месторождений полезных ископаемых. Вместе с тем представление нестационарного процесса стационарными моделями имеет исключительно важное практическое значение при решении обратных задач по определению проводимости и параметров питания. На определенных стадиях развития нестационарного процесса последний может рассматриваться как квазистационарный.

Квазистационарность фильтрационного процесса может фиксироваться в пределах расчетной зоны и характеризоваться следующим условием:

$$W_{c, \tau} / Q_x \leq \epsilon \rightarrow 0, \quad (3.1)$$

где $W_{c, \tau}$ — объем статических запасов водоносного горизонта, срабатываемый в пределах зоны за единицу времени; Q_x — фильтрационный расход, проходящий через расчетную зону.

Из условия (3.1) вытекают такие следствия:

- стабилизация напоров и расходов в зоне, прилегающей к границе дренажа с условиями первого рода;
- постоянная скорость снижения напоров во всех точках зоны, примыкающей к границе дренажа с условиями второго рода.

Критерии квазистационарности процесса должны содержать оценки либо по времени достижения этого его состояния, либо по достигнутым к этому времени понижениям. В частности, для схемы плоскопараллельного потока в условиях полуограниченного пласта при «мгновенном» понижении напора S_0 на контуре дренажа можно рассчитывать расходы потока в любом его сечении с координатой x [21, 46]:

$$q(x, t) = \frac{TS_0}{\sqrt{\pi at}} e^{-\frac{x^2}{4at}}, \quad (3.2)$$

где T и a — проводимость и коэффициент пьезопроводности пласта; t — расчетный момент времени.

Зависимость (3.2) дает возможность получить критерии квазистационарности режима в расчетной зоне, ограниченной координатой x (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Критерии квазистационарности режима фильтрации в полуограниченном пласте

| | | | | | |
|-------------------|------|------|------|------|------|
| $q(x, t)/q(0, t)$ | 0,99 | 0,95 | 0,90 | 0,80 | 0,70 |
| at/x^2 | 25 | 4,9 | 2,4 | 1,1 | 0,7 |
| S_x/S_0 | 0,89 | 0,75 | 0,65 | 0,5 | 0,4 |

Если ориентироваться на практическую точность измерений расходов на контуре дренажа, равную 10 %, то критерии квазистационарности можно записать в виде

$$t_{\text{кв}} > 2,5x^2/a; \quad (3.3)$$

$$S_x/S_0 > 0,65, \quad (3.4)$$

где $t_{\text{кв}}$ — время достижения квазистационарного режима; S_x — понижение напора в сечении с координатой x .

Критерий типа (3.4) является более предпочтительным, поскольку не содержит фильтрационных параметров, что особенно важно при решении обратных задач.

Аналогичные критерии можно получить для схемы плоскопараллельного потока в пласте длиной L , ограниченном непроницаемым контуром при мгновенном снижении напора на границе дренажа (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Критерии квазистационарности в пласте, ограниченном непроницаемым контуром

| | | | | |
|--------------------------|------|------|------|------|
| $\tau = at/L^2$ | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 |
| $q(x = 0,5L, t)/q(0, t)$ | 0,70 | 0,72 | 0,72 | 0,72 |
| at/x^2 | 1,6 | 2,4 | 3,2 | 4,0 |
| S_x/S_0 | 0,65 | 0,8 | 0,87 | 0,95 |

Сопоставление данных табл. 3.1 и 3.2 свидетельствует о том, что для схемы пласта, ограниченного непроницаемым контуром, наступление квазистационарного режима происходит значительно позднее, чем для зоны тех же размеров полуограниченного пласта. Практически переход к квазистационарности может рассматриваться при условии $\tau \geq 0,4$, однако погрешность схематизации при этом оказывается не ниже 30 % для всего периода истощения пласта.

Для плоских потоков, ограниченных контурами с заданным напором, стабилизация фильтрационного расхода на контуре дренажа достигается при выполнении условия

$$t_{\text{кс}} > 0,3L^2/a. \quad (3.5)$$

Для тех же граничных условий применительно к схеме равномерного потока глубиной h_0 на наклонном водоупоре ($i = \sin \alpha$) время установления квазистационарного режима может определяться критериями

$$t > \frac{1,5\mu h_0^2}{ki^2} \quad \text{при } L > \frac{2h_0}{i} \quad (3.6)$$

и

$$t > \frac{0,05\mu L^2}{kih_0} \quad \text{при } L < \frac{2h_0}{i}. \quad (3.7)$$

Для схем осесимметричной фильтрации в условиях неограниченного пласта и заданного расхода на контуре дренажа зону, в пределах которой режим близок к установившемуся, можно выделить исходя из выражения для расходов в любом сечении осесимметричного потока [21, 46]:

$$Q_r = Q_0 e^{-\frac{r^2}{4at}}, \quad (3.8)$$

где Q_0 — заданный расход на контуре дренажа; Q_r — расход в сечении, расположенном на удалении r от центра симметрии.

Результаты расчета представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Критерии квазистационарности режима осесимметричной фильтрации в неограниченном пласте

| | | | | |
|---------------------------|------|------|------|------|
| Q_r/Q_0 | 0,99 | 0,95 | 0,90 | 0,80 |
| r/\sqrt{at} | 0,2 | 0,45 | 0,65 | 0,94 |
| $\cdot S(r, t)/S(r_0, t)$ | 0,32 | 0,2 | 0,13 | 0,08 |

Приведенные критерии могут служить определенным ориентиром при фрагментарном рассмотрении реальных плановых нестационарных потоков, представленных плоскими или сегментарными лентами тока.

Наряду с использованием критериев типа (3.3) — (3.8) возможность перехода к квазистационарному режиму может быть оценена с помощью частных приемов. Например, по результатам режимных наблюдений может определяться ряд значений параметра проводимости пласта T_p на различные моменты времени исходя из стационарной постановки задачи с построением графика типа $T_p = f(t)$. Признаком стабилизации режима и «истинности» параметра служит выполаживание графика относительно временной оси. Этот прием достаточно хорошо

зарекомендовал себя при решении практических задач, однако его использование ограничено однородными фильтрационными полями, для которых проверка квазистационарности режима может быть осуществлена и по критериям, учитывающим понижения на расчетный момент времени. При неоднородности пласта стабилизация расчетного значения его проводимости может быть связана с влиянием этого фактора, который во всех случаях служит серьезным препятствием для схематизации нестационарных процессов.

Наряду с нестационарностью режима фильтрационных процессов схематизации подлежит и их нелинейность. Напомним, что под нелинейностью фильтрационного процесса понимается его зависимость от изменения параметров водоносных горизонтов (параметрическая нелинейность первого рода) или положения границ и условий на них (нелинейность второго и третьего родов); в свою очередь эти изменения связаны с изменяющимися напорами.

Применение математического моделирования позволяет свести схематизацию нелинейных процессов до минимума. Тем не менее трудоемкость моделирования, технологические и принципиальные трудности решения задач в нелинейной постановке предопределяют необходимость обоснования эффективных приемов схематизации нелинейных процессов.

Из обширного класса нелинейных задач может быть выделена группа схем, наиболее благоприятных для схематизации. К этой группе относятся схемы безнапорной фильтрации в однородных толщах, подстилаемых горизонтальным водупором. В этом случае расчетная проводимость зависит от изменения положения уровней потока, поэтому линеаризация проводится путем введения в расчетные зависимости потенциальной функции $0,5h^2$ (где h — глубина потока).

При нестационарном режиме фильтрации погрешности такой линеаризации определяются осреднением проводимости потока kh_p в расчетном коэффициенте уровнепроводности a_p . Качественный анализ такого рода погрешностей может быть проведен при рассмотрении дифференциального уравнения нелинейной фильтрации, записанного в виде

$$\frac{1}{kh} \frac{\partial(kh)}{\partial t} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 = \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a_p} \right) \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (3.9)$$

где $a = kh_t/\mu_t$; $a_p = kh_p/\mu_p$; h_p и h_t — стабильная (расчетная) и фактическая (на момент t) глубина потока; μ_p и μ_t — стабильная (расчетная) и фактическая (на момент t) водоотдача пласта.

Если в выражении (3.9) принять значение a_p в соответствии с начальным распределением уровней ($h_p = h_0$), то при снижении последних правая часть выражения при отрицательном значении $\partial h/\partial t$ будет отрицательной и совпадение линеаризованного и нелинейного решений оказывается невозмож-

ным. Если принять в качестве расчетного значения h_p конечное распределение уровней h_t , то совпадение линейного и нелинейного решения возможно на определенный момент времени в пределах расчетного периода t . При среднем значении мощности (в пределах от h_0 до h_t), выбранном в качестве расчетного значения, такое совпадение возможно, но не обязательно. Следовательно, при схематизации нелинейных задач необходимо учитывать направленность процесса (понижение или повышение уровней), влияющую на выбор расчетного значения параметра. Среднее значение параметра не всегда обеспечивает максимальную точность решения. Использование удачно выбранного значения параметра при полной линеаризации процесса может обеспечить приемлемую точность получаемого решения за счет соответствующего «взвешивания» параметра по времени и пространству [46].

Сопоставление результатов решения некоторых частных задач на моделях в линейной и нелинейной постановке позволяет оценить погрешности того или иного способа линеаризации. На рис. 3.1 и 3.2 представлены графики относительных уровней, полученных для некоторых простейших (одномерных) схем безнапорной фильтрации в условиях дренирования однородного пласта на горизонтальном водоупоре [21]. Для этих схем линеаризация по Багрову — Веригину ($h_p = 0,66h_0$, где h_0 — первоначальная мощность потока) возможна при выполнении условия [8].

$$\tau = \frac{kh_0 t}{\mu L^2} < 0,7. \quad (3.10)$$

При $\tau > 1,5$ погрешности такой линеаризации превышают 50 %.

Процесс осушения безнапорного водоносного горизонта, оконтуренного системой дренажных штретков (длина прямоугольного контура l , ширина b), можно линеаризировать методом Багрова — Веригина при выполнении условия

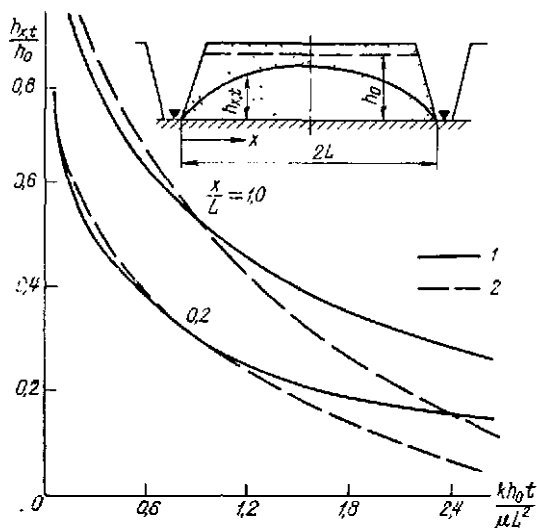
$$t < \frac{0,2\mu b^2 l^2}{(b^2 + l^2) kh_0}. \quad (3.11)$$

Решение нелинейных задач на моделях [8, 31] позволяет также сделать вывод о том, что при изменении мощности однородного потока в среднем на 10—20 % предпосылка о стабильности проводимости (различной в разных сечениях потока) не вносит существенных погрешностей в решение.

Полученные критерии позволяют оценить возможности линеаризации двумерных плановых задач (при фрагментарном анализе двумерных полей фильтрации). Для рассмотренных типовых схем целесообразно использовать соответствующие графики в качестве расчетных зависимостей (см. рис. 6.24—6.27) для оценки напоров в пределах плоских лент тока.

При относительно малых снижениях уровней безнапорных потоков (не более 20 % от первоначальной их мощности) не-

Рис. 3.1. Схема осушения безнапорного потока на горизонтальном водоупоре, «мгновенно» вскрытого двумя параллельными линейными дренами, и хронологические графики изменений уровней $h_x, t/h_0$ в расчетных сечениях x/L . 1 — уровни, полученные моделированием с учетом нелинейности нестационарной фильтрации; 2 — уровни, полученные расчетом по уравнению, линеаризованному методом Багрова-Веригина.



линейностью процесса можно пренебречь. В частном случае, при горизонтальном первоначальном уровне потока, можно рассматривать расчетную схему, в которой в качестве потенциальной функции принимается величина

$$U_S = 0,5 (2h_0 - S_0) S_0, \quad (3.12)$$

где h_0 — первоначальная мощность потока; S_0 — понижение уровня на границе его дренажа.

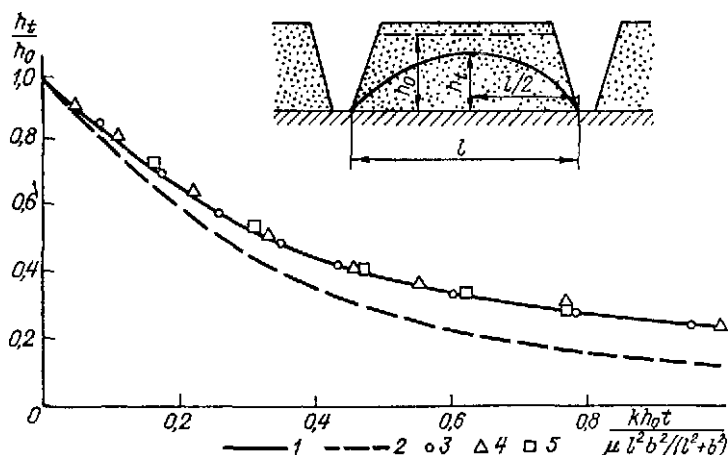


Рис. 3.2. Схема осушения и хронологические графики изменения уровней h_x/h_0 в центре прямоугольного участка (размером $l \times b$), околнуренного «мгновенно» пройденными дренами.

1 — уровни, полученные моделированием с учетом нелинейности нестационарной фильтрации; 2 — уровни, полученные расчетом по уравнению, линеаризованному методом Багрова-Веригина; 3 — $l/b = 4/3$; 4 — $l/b = 2$; 5 — $l/b = 1$.

Наличие уклона водоупора существенно ограничивает возможность схематизации нелинейных процессов; при стационарном режиме для оценки проводимости потока в этом случае можно использовать среднюю глубину потока (определяемую глубинами потока на границах питания и дренажа). Потенциальной функцией при этом должен быть напор. Как показали результаты наших исследований [8], такой прием допустим при выполнении условий: $h_d/(li) > 0,2$ для прямого падения водоупора и $h_d/(li) > 0,5$ для обратного падения водоупора (h_d — глубина потока на границе дренажа, i — уклон водоупора, l — расстояние между границами питания и дренажа). В случае невыполнения этих условий для расчета фильтрации следует использовать решения В. С. Козлова или Н. Н. Павловского [21, 46]. Безнапорная нестационарная фильтрация при наличии наклонного водоупора является неблагоприятным для линейаризации вариантом и поэтому должна рассматриваться на математических моделях. Истощение безнапорного потока на наклонном водоупоре сопровождается движением контура обводненности. Эту нелинейность второго рода целесообразно учитывать начиная с момента времени $t > 0,6\mu L_0/(ki)$ (где k и μ — коэффициент фильтрации и водоотдача пород, L_0 — первоначальная длина потока, i — уклон водоупора).

Нелинейность, определяемая положением границ потока в условиях стационарного напорно-безнапорного режима фильтрации, учитывается введением потенциальной функции вида

$$U_{нб} = 0,5 (2mH_0 - m^2), \quad (3.13)$$

где H_0 — напор на внешней границе напорной зоны; m — мощность пласта.

Нелинейность первого рода по проводимости и водоотдаче, связанная с напорно-безнапорным характером нестационарной фильтрации, может быть учтена при выполнении определенных критериев, полученных из анализа решений, предложенных В. А. МIRONENKO [21]. В частности, при $[m/(H_0 - m)] \sqrt{\mu/\mu^*} = A < 0,3$ нелинейная задача может быть сведена к схеме напорного пласта, а при $A > 3$ режим фильтрации может рассматриваться как безнапорный (при соответствующем применении линейризующих подстановок). Аналогичные критерии получены также Л. Н. Павловской.

При комплексной нелинейности процесса (с нелинейностями первого, второго и третьего рода) может проводиться либо полная, либо частичная линейаризация, причем погрешности в первом случае могут оказаться меньшими, чем во втором, за счет алгебраического сложения погрешностей каждой линейаризации. Комплексная нелинейность чаще всего не позволяет провести полиоценную схематизацию, и задачу приходится решать в нелинейной постановке методами электрического мо-

делирования или на ЭВМ. К этому классу расчетных схем относится прежде всего нестационарная безнапорная фильтрация в слоистых толщах.

3.3. Схематизация границ области фильтрации и условий питания водоносных пластов по площади их развития

Контуры открытых горных выработок, вскрывающих один или несколько водоносных горизонтов на полиую мощность, однозначно трактуются как границы дренажа с условиями первого рода (напор или его понижение, соответствующие отметке подошвы горизонта). Несвершенные выработки можно рассматривать как совершенные при выполнении условий

$$m > 0,1L_0 \text{ и } b > 0,5m, \quad (3.14)$$

где b — ширина выработки; m — мощность горизонта; L_0 — минимальное расстояние от выработки до границы питания горизонта.

Для вытянутых выработок с малым поперечным сечением $b < 0,5m$ на контуре дренажа целесообразно задавать фиктивное значение напора [21, 46]

$$H_\Phi = H_d + \frac{0,73q}{k} \lg \frac{m}{\pi r_0}; \quad (3.15)$$

где H_d — действительный напор на выработке; q — двухсторонний удельный приток к траншее; r_0 — приведенный радиус поперечного сечения траншей.

Контуры подземных горных выработок могут выступать в качестве плановых границ дренажа с разнообразными граничными условиями. Горизонтальные подготовительные или капитальные выработки обычно вскрывают водоносный горизонт, залегающий либо в почве, либо в кровле выработки, которая в этом случае рассматривается как совершенная граница дренажа с условиями первого рода. Экранированный от горных выработок относительным водоупором водоносный горизонт должен характеризоваться в контуре горизонтальной выработки условиями третьего рода (перетеканием через водоупор). Очистные выработки при управлении кровлей полным обрушением обычно являются контуром дренажа для водоносных пластов в кровле выработки, пересекаемых зоной водопроводящих трещин, которые характеризуются активной гидравлической связью с выработанным пространством [7]. В такой трактовке зона водопроводящих трещин (ЗВТ) рассматривается как продолжение горной выработки, т. е. как контур дренажа с заданным напором или понижением, соответствующим отметке подошвы водоносного пласта, пересекаемого трещинами. Высота ЗВТ как параметр, определяющий расчетную гидродинамическую схему, фиксируется по результатам специ-

альных режимных наблюдений. Этот параметр зависит от свойств пород в кровле выработки, ее размеров в плане, мощности вынимаемого пласта или рудной залежи. Для ориентировочной оценки высоты ЗВТ в слоистых комплексах, представленных циклическим чередованием песчаников, алевролитов и аргиллитов, могут быть использованы обобщенные эмпирические критерии, приведенные в табл. 3.4 [7, 38].

Таблица 3.4

Высота зоны водопродящих трещин при различных мощностях вынимаемого пласта и разном литологическом составе перекрывающих его отложений, м

| Мощность пласта m , м | Относительное содержание глинистых пород (аргиллитов, алевролитов, сланцев) в основной кровле (в интервале от 10 м до 60 м), % | | | | |
|-------------------------|--|-------|-------|-------|--------|
| | 0—20 | 21—40 | 41—60 | 61—80 | 81—100 |
| 1,0 | 60 | 55 | 50 | 45 | 40 |
| 1,5 | 90 | 80 | 75 | 70 | 60 |
| 2,0 | 115 | 105 | 95 | 85 | 80 |
| 2,5 | 125 | 115 | 105 | 95 | 85 |
| 3,0 | 140 | 130 | 115 | 105 | 90 |
| 3,5 | 150 | 140 | 125 | 110 | 95 |
| 4,0 | 160 | 150 | 135 | 120 | 105 |

При отработке рудных тел в метаморфизованных скальных и полускальных породах размеры ЗВТ существенно зависят от угла падения рудной залежи и вмещающих пород [15]. При углах падения $\varphi > 60^\circ$ высота ЗВТ может быть ориентировочно оценена по формуле [15]

$$z = K_1 \frac{bl}{\sqrt{b^2 + l^2}}, \quad (3.16)$$

где K_1 — коэффициент, определяемый по табл. 3.5; b и l — размеры выработки по простиранию и по падению пласта.

Таблица 3.5

Значения коэффициентов K_1 и K_2 для массивов пород различной прочности

| Коэффициент | Коэффициент крепости пород по Протодякову | | | | |
|-------------|---|-----|------|------|---------|
| | 4 | 5 | 6 | 7 | 8—11 |
| K_1 | 9 | 6,8 | 5,3 | 4,4 | 3,7—2,4 |
| K_2 | 18 | 16 | 14,5 | 13,5 | 13—11 |

При $\varphi < 60^\circ$ высота зоны существенных деформаций массива может оцениваться формулой [15]:

$$z = K_2 m_v, \quad (3.17)$$

где K_2 — коэффициент, определяемый по табл. 3.5; m_v — вертикальная мощность вынимаемой рудной залежи.

В случае формирования водопритоков в выработанное пространство за счет водоносных горизонтов, которые залегают выше ЗВТ, по площади очистных работ должны быть заданы условия перетекания с постоянным напором на границе дренажа, соответствующей верхней границе ЗВТ. Такая расчетная схема требует данных о вертикальной проницаемости относительных «водоупоров», экранирующих ЗВТ.

Зона водопроводящих трещин имеет максимальное развитие по высоте в периферийных частях горных выработок. Результаты непосредственного определения параметров ЗВТ целесообразно контролировать данными об изменении водопритоков к горным выработкам при развитии площади очистных работ. Прямая пропорциональность между водопритоком и периметром горной выработки свидетельствует о вскрытии зоной водопроводящих трещин водоносного пласта; пропорциональность водопритока площади очистных работ может служить признаком того, что ЗВТ экранирована от водоносного пласта слабопроницаемыми породами.

Условия на внешних границах области фильтрации предварительно оцениваются на основе геологического анализа с последующим уточнением по результатам режимных наблюдений. На стадии предварительного анализа граничных условий целесообразно рассматривать альтернативные варианты расчетной схемы: на контурах водотоков (водоемов) принимать либо условия первого рода (постоянство напора), либо «отсутствие» границы обеспеченного питания.

Условия обеспеченного питания могут быть приняты для границ, представленных контактами рассматриваемого водоносного пласта с более водообильным (при соотношении проводимостей 1 : 10), а также для контуров затопленных выработок, выходов пласта под покровные отложения с высокой гравитационной водоотдачей. В качестве внешних границ области фильтрации могут выступать водоразделы подземных потоков, которые следует трактовать как непроницаемые контуры.

Результаты режимных наблюдений дают возможность идентифицировать условия на внешних границах лишь при выполнении определенных условий. Критерии эквивалентности и различия граничных условий можно получить для некоторых типовых схем. Примером могут служить графики изменений относительных напоров в различных точках пласта для схемы с «мгновенным» снижением напора на границе дренажа при различных условиях на внешней границе плоскопараллельного

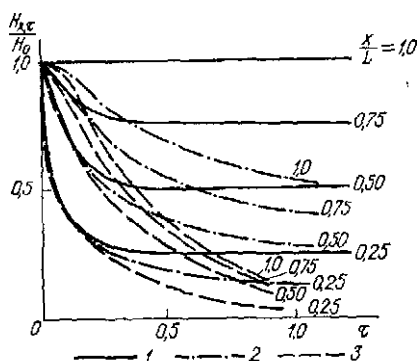


Рис. 3.3. Хронологические графики изменений напоров $H_{x,\tau}/H_0$ в различных точках пластов x/L с «мгновенным» снижением напора на границе дренажа ($S_r=H_0$).

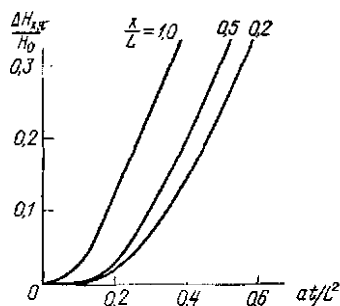
1 — при постоянном напоре на внешнем контуре ($H_0=\text{const}$); 2 — для схемы полуограниченного пласта; 3 — при непроницаемом внешнем контуре.

потока (рис. 3.3). Графики свидетельствуют о том, что различие в условиях на внешней границе можно обнаружить лишь при $0,7 > \tau > 0,3$ по характеру изменений градиентов потока. На рис. 3.4 и 3.5 представлены графики относительных погрешностей в напорах при замене схемы полуограниченного пласта схемой пласта с внешним непроницаемым контуром для плоскопараллельного и осесимметричных потоков. Графики можно рассматривать как критериальные характеристики эквивалентности и различия условий на внешних границах. С другой стороны, эти графики позволяют контролировать выбор конечных размеров модели, позволяющей реализовать условия неограниченного пласта.

Схематизация условий питания водоносных пластов по площади их развития предполагает анализ процессов инфильтрации и перетекания. Схематизация питания водоносных горизонтов за счет инфильтрации атмосферных осадков существенно зависит от постановки решаемой прогнозной или обратной задачи. При долгосрочных прогнозах или при анализе периода эпигноза, продолжительность которого составляет несколько лет, целесообразно оценивать интенсивность инфильтрационного питания среднегодовыми его характеристиками. При анализе и прогнозе гидродинамических процессов в пределах годового цикла следует оперировать сезонно изменяющимися характеристиками инфильтрации. Если инфильтрационное питание при нарушенном режиме остается без изменений, то его можно эффективно учесть в расчетных схемах, опираясь на принцип сложения течений. В этом варианте расчетная схема должна характеризоваться потенциальными функциями понижений напора, отсчитываемых от «естественных» уровней на расчетный момент годового цикла. При долгосрочных прогнозных и эпигнозных оценках в качестве расчетного положения «естественных» уровней целесообразно использовать их среднегодовые характеристики.

При изменении интенсивности инфильтрационного питания (по сравнению с естественным) его приходится непосредст-

Рис. 3.4. Относительные погрешности напоров $\Delta H_{x,t}/H_0$ в расчетных точках x/L полуограниченного пласта, возникающие при замене его схемой ограниченного пласта длиной L с непроницаемым внешним контуром.



венно учитывать в расчетных схемах и с этой целью использовать математическое моделирование.

Перетекание как частный случай питания водоносных пластов по площади их развития не поддается схематизации и должно учитываться в расчетных схемах с применением моделирования.

Необходимо отметить, что неверное представление о характере инфильтрационного питания водоносного горизонта может стать причиной существенных погрешностей при оценке фильтрационных параметров. Примером может служить искаженная трактовка схемы питания однородного водоносного горизонта за счет перетекания через слабопроницаемые покровные отложения. Замена схемы с перетеканием, интенсивность которого, как правило, уменьшается с удалением от границ дренажа, схемой с равномерно распределенным по площади питанием (инфильтрационного типа) приводит к существенному завышению проводимости, определенной по расходу на контуре дренажа с учетом зафиксированного распределения напоров по полю фильтрации. При этом создается ложный эффект закономерности в изменении параметра проводимости. Замена схемы

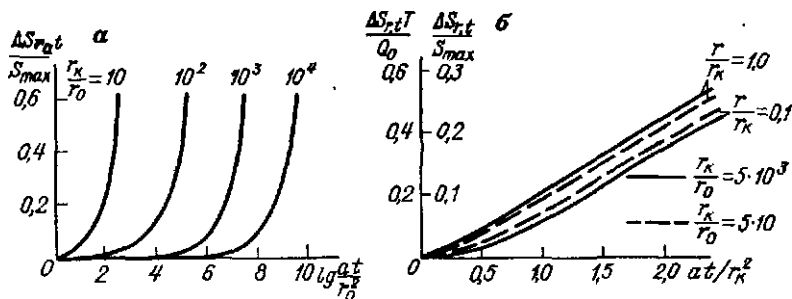


Рис. 3.5. Относительные погрешности понижений напоров в расчетных точках неограниченного пласта при осесимметричном потоке к выработке радиусом r_0 , возникающие при замене этой схемы круговым пластом, ограниченным непроницаемым контуром с радиусом r_k при «мгновенном» снижении напора S_{max} на контуре дренажа (а) и при заданном расходе Q_0 на контуре дренажа (б).

с перетеканием схемой с инфильтрационным питанием в некоторых случаях позволяет оценивать суммарную проводимость взаимодействующих пластов, однако обоснование такой схематизации требует решения специальных тестовых задач.

Пренебрежение инфильтрационным питанием приводит к погрешности в определении проводимости (к завышению этого параметра). При этом максимальная абсолютная погрешность параметра проводимости для схемы одномерного стационарного потока, ограниченного внешним непроницаемым контуром (линией водораздела), может быть оценена формулой

$$\Delta T = \frac{\omega L^2}{2\Delta H}, \quad (3.18)$$

где ΔT — разница рассчитанного и истинного значений проводимости; L — длина потока при перепаде напора на его границах ΔH ; ω — интенсивность инфильтрации.

Для этой же схемы относительные погрешности параметра проводимости, определенного по напору H_x в точке с координатой x , могут быть оценены по зависимости

$$\frac{T_p}{T_n} = \frac{2L}{2L - x}, \quad (3.19)$$

где T_p и T_n — рассчитанное и истинное значения проводимости.

Относительную погрешность в напорах, возникающую за счет пренебрежения инфильтрационным питанием нестационарного потока, можно оценить по зависимости

$$\frac{\Delta H(x, t)}{H(x, t)} = \frac{\omega x^2 + q_0 x}{T S_0 R(x, t)}, \quad (3.20)$$

где x — координата расчетной точки плоскопараллельного потока при «мгновенном» снижении напора на границе дренажа на S_0 ; T — проводимость пласта; q_0 — расход «естественного» потока; $R(x, t) = \Phi[x/(2\sqrt{at})]$ для полуограниченного пласта; $R(x, t) = T(x/L, at/L^2)$ для пласта длиной L , ограниченного непроницаемым контуром; $\Phi[x/(2\sqrt{at})]$ и $T(x/L, at/L^2)$ — табулированные функции [46].

Наличие питания водоносного горизонта иногда учитывается путем использования обобщенных параметров (расчетной водоотдачи или расчетного коэффициента пьезопроводности), однако такой прием требует в каждом конкретном случае особого обоснования, так как в принципе он может приводить к неконтролируемым погрешностям в прогнозных оценках режима подземных вод [50].

Интенсивность инфильтрационного питания и параметры перетекания могут быть достоверно оценены по результатам режимных наблюдений при выполнении определенных условий.

Расстояние между пьезометрами Δl для надежного определения инфильтрации должно контролироваться критерием

$$\Delta l > \frac{0,2TJ}{w}, \quad (3.21)$$

где J — средний градиент плоскопараллельного потока.

Для надежной идентификации перетекания расстояния между пьезометрами контролируются условием

$$\Delta l = \frac{1,2}{\sqrt{\frac{k_0}{m_0 T_2} \left(1 + \frac{T_1}{T_2}\right)}}, \quad (3.22)$$

где T_1 и T_2 — проводимости питающего и питаемого пластов; k_0 и m_0 — коэффициент фильтрации и мощность разделяющего водоупора.

3.4. Схематизация структуры и неоднородности фильтрационных полей

Реальные потоки подземных вод являются пространственными (трехмерными), что обусловлено сложной конфигурацией их границ, неоднородностью фильтрующих толщ. Схематизация структуры потоков направлена на снижение ее мерности, на упрощение структуры математической (в частности, аналоговой) модели.

Максимальные деформации потока в разрезе наблюдаются вблизи границ, несовершенных по степени вскрытия водоносного горизонта (вблизи несовершенных горных выработок), особенно при фильтрационной неоднородности толщи. При этом деформация потока в разрезе фиксируется в пределах зон с размерами $(1,0 \div 1,5)m\sqrt{k_x/k_y}$, где m — мощность пласта или глубина безнапорного потока, k_x и k_y — коэффициенты фильтрации пород в горизонтальном и вертикальном направлениях. Деформации потока в плане зависят от конфигурации и взаимного расположения внутренних и внешних границ (питания и дренажа) и неоднородности поля фильтрации.

Изучение структуры потока в конкретных условиях начинается с анализа граничных условий и характера фильтрационной неоднородности водоносного комплекса. Наиболее представительную исходную информацию дают наблюдения по сети пьезометров (в условиях плановых потоков) или по специальным датчикам, обеспечивающим «точечные» измерения напора в обводненных профильно-неоднородных толщах [32]. Оценка структуры плановых потоков по одиночным пьезометрам может быть осуществлена для типовых схем на основе индикаторных графиков временного и площадного прослеживания понижений: $S=f(\sqrt{t})$, $S=f(x)$ — для идентификации

плоскопараллельного потока, а также $S=f(\lg t)$, $S=f(\lg r)$ — для осесимметричного потока.

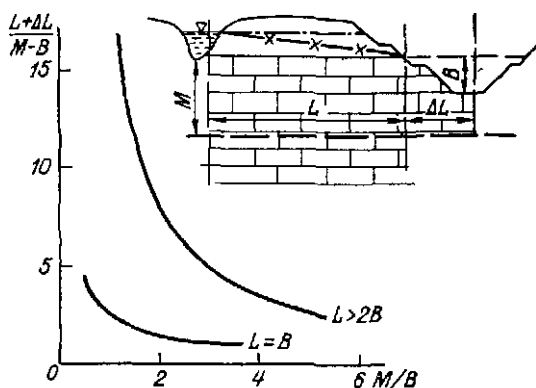
При определении напоров вблизи несовершенных границ питания и дренажа водоносных горизонтов, а также напоров планового потока вблизи границ сложной конфигурации возможности схематизации структуры потока существенно ограничены. При прогнозе фильтрационного расхода и при определении параметра проводимости схематизация структуры потока допустима в более широких масштабах, чем при оценке распределения напоров по полю фильтрации. В частности, несовершенством горной выработки (т. е. деформацией потока вблизи этой границы) можно пренебречь при определении притоков к ней, если выполняется условие (3.14). Аналогично для схемы вскрытия водоносного пласта горной выработкой со свободным высачиванием подземных вод на откос можно пренебречь деформацией гидродинамической сетки вблизи промежутка высачивания при определении фильтрационного расхода потока. Проведенные нами исследования показали, что ощутимые отклонения от истинных значений фильтрационных расходов наблюдаются при ограничении расстояния между границами потока (точнее, при отношениях максимальной глубины потока на границе питания к длине потока, превышающих 3—4). Учет деформаций плановых потоков (приведение их к схеме «большого колодца» в круговом пласте) возможен при определении притоков к дренажному контуру, расположенному вблизи разнообразных по форме внешних границ (см. табл. 3.6).

Критерием возможности пренебрежения деформацией потока при оценке расхода служит дополнительное фильтрационное сопротивление, которое определяется как разность между фильтрационными сопротивлениями потока с учетом и без учета локальной деформации. Такая возможность выявляется при сопоставлении дополнительного фильтрационного сопротивления с общим сопротивлением потока. Вместе с тем дополнительные фильтрационные сопротивления, которые согласно методу эквивалентных фильтрационных сопротивлений [46] непосредственно учитывают деформации потоков на локальных участках, позволяют определять истинные расходы потоков и их напоры (за пределами зон деформации потока).

Весьма сложный математический аппарат, применяемый ранее для оценки дополнительных сопротивлений потока в связи с локальными его деформациями [21, 46], в настоящее время практически полностью заменен математическим моделированием. Методика оценки дополнительных сопротивлений, учитывающих деформацию планового потока вблизи несовершенных границ и точечных стоков, детально проанализирована в работах В. М. Шестакова [46, 47], в ряде работ других авторов [17, 21, 24].

Учет несовершенства границ питания и дренажа требует особого подхода при рассмотрении водоносных толщ, не огра-

Рис. 3.6. Расчетная схема и график для определения мощности активной зоны M дренируемого пласта.



ниченных снизу водоупором. Проведенный анализ показал, что мощность так называемой активной зоны зависит от степени вскрытия горизонта, плановых размеров границ питания и дренажа, а также от расстояния между ними (рис. 3.6). Существующие аналитические зависимости [21, 46] не учитывают двух последних из перечисленных факторов, поэтому могут применяться лишь в частных случаях.

Методы схематизации, основанные на использовании принципа эквивалентных фильтрационных сопротивлений, ориентированы в основном на условия стационарной фильтрации. Возможности применения этих принципов для схематизации структуры нестационарных полей проанализированы лишь применительно к нескольким частным вариантам, поэтому вопросы оценки погрешностей схематизации для ранних стадий нестационарного процесса требуют дополнительного анализа.

При рассмотрении плановых задач фильтрации наиболее эффективная схематизация структуры двумерных потоков заключается в фрагментировании их, т. е. в выделении расчетных лент тока [21, 46]. При решении обратных задач такие ленты тока обычно должны выделяться на участках, наиболее полно освещенных информацией (известные расходы по участкам дренажных контуров и напоры вдоль лент тока). Выделение лент тока при анализе техногенного режима подземных вод в пределах карьерных и шахтных полей благоприятствует наличие линейных границ дренажа (контуров горных выработок) с измеренными на них расходами и напорами. Особое внимание при построении лент тока для определения гидрогеологических параметров должно быть уделено составлению карты изопьез. Прежде всего это построение не должно быть основано на формальной интерполяции напоров (свойственной в настоящее время многим программам ЭВМ).

Одним из эффективных приемов схематизации двумерных (плановых) потоков является реализация принципа «большого колодца» при рассмотрении условий фильтрации к одиночной горной выработке с круговым контуром дренажа радиусом r_0

(или к группе горных выработок, которая может быть приведена к эквивалентной одиночной). Структура стационарного потока в данном случае учитывается расчетным радиусом области фильтрации R , зависящим от характера и положения границ питания (табл. 3.6). Схематизация структуры двумерных фильтрационных полей при анализе их на математических моделях имеет специфические особенности, связанные с дискретным представлением моделируемой области (см. разд. 4.2).

Анализ полей фильтрации на сеточных моделях, соответствующих ортогональной разбивке поля фильтрации на элементарные блоки, сопровождается обычно заменой сложных криволинейных границ ступенчатыми контурами, что приводит к искажению структуры потока на этих участках. Подобная схематизация характеризуется погрешностями, зависящими от шага сетки. С целью снижения погрешности Л. Коллатц предложил линейную интерполяцию получаемых результатов, а Ш. Е. Микеладзе обосновал специальный интерполяционный прием. Однако использование интерполяционных формул существенно осложняет решение задач, поэтому практически приходится ориентироваться либо на применение повышенной дискретности пространственной разбивки рассматриваемой части моделируемой области вблизи границ, либо на особую организацию разбивки. В последнем случае наиболее эффективным представляется построение дискретной модели исходя из принципов разбивки и расчета треугольных сеток [40, 46].

Искажение структуры потока неизбежно при моделировании двумерных полей на сетках с неравномерной разбивкой. Погрешности зависят от структуры потока, соотношения элементов разбивки, причем искажение структуры наблюдается в области как крупной, так и мелкой разбивки. Проведенные нами исследования показали, что погрешности решения определяются в основном искажением структуры потока на границе перехода от мелкой разбивки к крупной. В этом варианте погрешности дискретности по пространству могут существенно превышать погрешности дискретности процесса по времени (см. раздел 3).

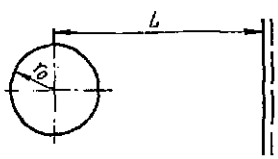
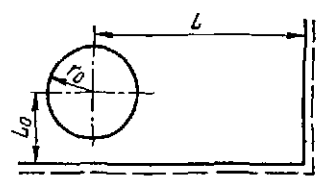
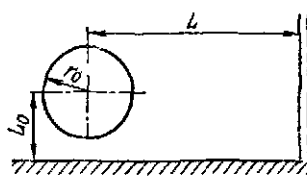
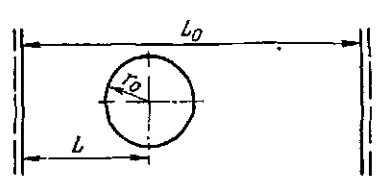
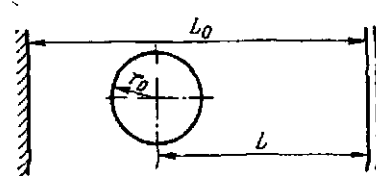
Для снижения погрешностей на границе зон с разновеликой разбивкой поля можно рекомендовать ориентирование этой границы параллельно линиям равных напоров. При ортогональной разбивке плановых полей фильтрации учет деформаций потока вблизи скважин или иных источников-стоков, формирующих локальный осесимметричный поток, осуществляется путем введения дополнительных сопротивлений, вычисляемых по зависимости

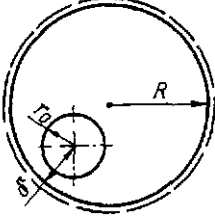
$$\Phi_0 = \frac{1}{2\pi T} \left(\ln \frac{\Delta x}{r_0} - C \right), \quad (3.23)$$

где Δx — средний размер элементарного участка, тяготеющего

Таблица 3.6

Расчетные радиусы области фильтрации R в пластах с различными условиями их питания и дренажа

| Условия питания и дренажа водонесного пласта | Схема | Выражение для R |
|--|---|--|
| Выработка вблизи линейной границы с постоянным напором |  | $2L$ |
| Выработка в пласте, ограниченном взаимно ортогональными контурами с постоянным напором |  | $\frac{2LL_0}{\sqrt{L^2 + L_0^2}}$ |
| Выработка в пласте, ограниченном взаимно ортогональными контурами (с постоянным напором и непроницаемым) |  | $2L \sqrt{\frac{L^2}{L_0^2} + 1}$ |
| Выработка между параллельными границами с постоянным напором |  | $\frac{2L_0}{\pi} \sin \frac{\pi L}{L_0}$ |
| Выработка между параллельными границами (с постоянным напором и непроницаемой) |  | $\frac{4L_0}{\pi} \operatorname{ctg} \frac{\pi L}{2L_0}$ |

| Условия питания и дренажа водоносного пласта | Схема | Выражение для R |
|--|---|--|
| Выработка в круговой области с постоянным напором на внешней границе |  | $R = \frac{(R - \delta)^2}{R}$ <p style="text-align: center;">при</p> $\frac{\delta - r_0}{R} > 0,1$ |

к узловой точке, к которой приурочен источник-сток с радиусом r_0 ; T — проводимость пласта; C — коэффициент, изменяющийся от 1,1 до 2,0 в зависимости от положения узла в сеточной области [17].

Теоретические разработки, посвященные учету структуры потока вблизи точечных источников в узловых точках нерегулярных треугольных (многоугольных) сеток, проведены Л. Лукнером и П. Ниллертом [17].

При моделировании фильтрационных полей, обладающих симметрией, схематизация структуры потока обычно заключается в выборе представительного фрагмента; например, при моделировании осесимметричного потока в двумерной постановке целесообразно моделировать сектор, при моделировании одномерного плоского потока с двумя симметричными границами дренажа моделируется половина потока с одной границей дренажа и непроницаемым контуром и т. д. Вместе с тем моделирование иногда целесообразно проводить параллельно на двух симметричных элементах с целью выявления технических погрешностей.

Возможности электрического моделирования позволяют существенно расширить сферу применения принципа фрагментирования. В частности, весьма эффективно использование комбинированных моделей, представленных электропроводной бумагой или сеткой сопротивлений в области двумерной фильтрации и дискретными сопротивлениями, отвечающими одномерной структуре потока (осесимметричной) в периферийной части поля фильтрации.

Таким образом, схематизация структуры потока является, как правило, вычислительной схематизацией, поэтому существенно зависит от целей и метода решения фильтрационной задачи.

Схематизация фильтрационной неоднородности водоносных толщ должна быть неразрывно связана со структурой пла-

ново-неоднородного или профилльно-неоднородного поля. Конкретная направленность этого вида гидрогеологической схематизации сводится к анализу одного из следующих вопросов, каждый из которых имеет самостоятельное значение:

- представление неоднородного в плане поля фильтрации совокупностью кусочно-однородных зон;

- представление профилльно-неоднородного водоносного комплекса схемой упорядоченной (слоистой) толщи;

- осреднение локальных характеристик поля фильтрации, т. е. приведение его к схеме квазиоднородного поля;

- осреднение фильтрационных характеристик профилльно-неоднородных водоносных толщ, т. е. приведение последних к схеме квазиоднородного пласта.

Фильтрационная неоднородность водоносных толщ в плане и в разрезе выявляется на основе анализа их геолого-литологических и структурных особенностей, увязанных с данными опытно-фильтрационных работ и наблюдений за режимом подземных вод. Результатом схематизации неоднородных полей фильтрации является установление границ между квазиоднородными зонами рассматриваемого водоносного пласта или комплекса. Схематизация профилльной неоднородности сводится к обоснованию гидрогеологической структуры водоносной толщи — к выделению отдельных водоносных пластов и разделяющих относительных водоупоров, охарактеризованных фильтрационными параметрами.

Выявленная фильтрационная неоднородность в плане или в разрезе может быть охарактеризована на качественном уровне с использованием критериев, которые предусматривают сопоставление размеров области фильтрации с размерами элементов неоднородности. Например, микронеоднородность может трактоваться как неоднородность, обусловленная зернистым строением фильтрующей среды или ее интенсивной трещиноватостью. При размерах элементов неоднородности, на два порядка меньших рассматриваемой области фильтрации, последняя может оцениваться как мезонеоднородная. Наконец, макронеоднородной является область, размеры которой сопоставимы (находятся в пределах одного порядка) с размерами элементов неоднородности. Понятия микро-, мезо- и макронеоднородности могут использоваться как рабочая классификация лишь применительно к конкретной области фильтрации. При таком подходе одни и те же физические элементы неоднородности могут расцениваться различно в зависимости от постановки и масштаба задачи. Например, при рассмотрении региональных задач трещиноватость массива фильтрующих пород обычно позволяет оценивать его как квазиоднородный [1, 2]; в то же время при анализе результатов опытных откачек эта трещиноватость существенно влияет [3, 25] на характер фильтрации, поэтому массив горных пород в области влияния откачки нередко оценивается как макронеоднородная среда.

Следовательно, такая классификация не учитывает структуры потока, взаимного расположения элементов неоднородности и границ области фильтрации, поэтому она не может лежать в основе схематизации фильтрационной неоднородности.

Более гибкой представляется классификация по уровням неоднородности, согласно которой различаются неоднородности высшего и низшего порядка, а также эффективная неоднородность, допускающая осреднение единичных параметров при выборе расчетных характеристик квазиоднородной среды (эффективных параметров). Неоднородность высшего и низшего порядков не требует специального анализа при схематизации, так как не проявляется в закономерностях процесса фильтрации. Градация по уровням неоднородности также приемлема лишь для конкретного рассматриваемого поля фильтрации, поэтому при переходе к другому масштабу задачи характер неоднородности, как правило, должен быть пересмотрен. Практически это приводит к тому, что при обработке результатов опытно-фильтрационных работ выявленный уровень неоднородности локального участка не соответствует уровню неоднородности при решении прогнозной региональной задачи.

Таким образом, схематизация фильтрационной неоднородности заключается прежде всего в определении эффективного параметра, т. е. осредненного расчетного параметра, обеспечивающего тождественность реального фильтрационного процесса и идеализированного процесса в однородной среде.

Обычно получение эффективного параметра заключается в осреднении единичных значений параметров отдельных элементов неоднородности. Осреднение может быть основано на применении методов математической статистики, которое, однако, лимитируется следующими моментами:

- характер неоднородности должен быть случайным (хаотическим), размеры элементов неоднородностей — на порядок ниже размеров рассматриваемой области фильтрации;

- единичные значения параметров должны обладать свойством статистической устойчивости [10];

- необходимо учитывать закон распределения единичных значений параметра и характер решаемой задачи (определение расходов или напоров); например, при нормальном законе распределения минимальные погрешности в расходах (не более 10 %) фиксируются при коэффициенте вариации единичных значений параметра $V < 0,45$, а при логарифмическом — при $V < 0,7$ [3, 24].

Однако даже при выполнении перечисленных требований применение на практике формализованных методов математической статистики зачастую становится невозможным вследствие малой представительности выборки единичных параметров при обычной ограниченности исходной информации. В частности, доказательство свойства статистической устойчивости

(т. е. доказательство того, что каждому единичному значению параметра соответствует вполне определенный эффективный параметр) требует повышенного объема информации. Можно согласиться с мнением В. М. Гороховского [10], что вопрос о выборе среднего не может контролироваться только законом распределения.

Тем не менее специальные исследования говорят о возможности практического использования статистических методов для определения эффективных параметров в частных случаях. Например, в работе [25] показана возможность получения эффективной проводимости по среднегеометрическому значению единичных параметров, подчиняющихся логнормальному закону распределения. Здесь же указывается на недостатки среднеарифметического осреднения параметра.

В общем случае область использования формально-статистических методов при определении эффективных параметров весьма ограничена: выбор среднего оказывается корректным, когда это среднее контролируется одним числом (общим расходом или уровнем в конкретной точке поля). При прогнозе напоров во многих точках пространственно-временных полей применение среднего значения влечёт за собой неконтролируемые ошибки. Максимальные погрешности в прогнозах возникают при осреднении параметра без учета повышенного «веса» зон неоднородностей вблизи границ питания или дренажа водоносного горизонта. Выявление роли каждого из элементов неоднородности и учет его в общем фильтрационном сопротивлении потока при тех или иных граничных условиях является необходимым элементом анализа неоднородности поля при схематизации. Следовательно, при оценке возможности осреднения фильтрационных параметров неоднородных полей необходимо учитывать структуру фильтрационного потока, задачу прогноза (определение расхода или напора), а также соотношение параметров зон неоднородности.

Проведенные нами исследования простейших схем стационарной одномерной фильтрации свидетельствуют о том, что без учета структуры потока осреднение параметра проводимости возможно при сравнительно узком диапазоне его изменения. На рис. 3.7 изображены графики изменения относительной погрешности в определении расходов $\Delta = Q_{\phi}/Q_p$ потока с условиями первого рода на границах в зависимости от соотношения проводимостей двух прямоугольных зон T_1 и T_2 и модулей их формы $M = l_1/l_2$ (где l — один из изменяемых линейных размеров зон при зафиксированном другом размере b).

В качестве расчетного (эффективного) значения проводимости в данном случае принято среднеарифметическое значение $(T_1 + T_2)/2$. Графики на рис. 3.7, а соответствуют направлению потока вдоль границы раздела двух зон неоднородности, при котором относительная погрешность расхода оценивается зависимостью

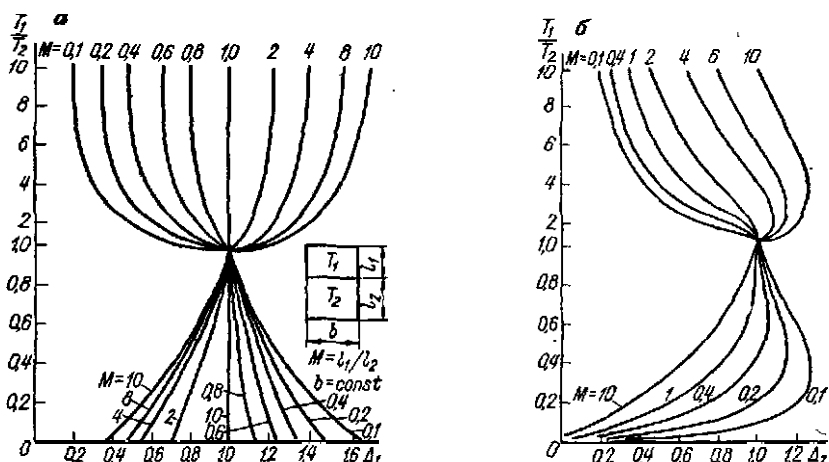


Рис. 3.7. Графики относительных погрешностей расхода потока, рассчитанного при осреднении проводимости зон фильтрационной неоднородности. а — поток ориентирован параллельно границе раздела зон; б — поток ориентирован нормально к границе раздела.

$$\Delta_1 = \frac{Q_{\Phi}}{Q_p} = \frac{2(nT_2 + mT_1)}{(T_1 + T_2)(m + n)}, \quad (3.24)$$

где $n = b/l_1$; $m = b/l_2$.

Графики, представленные на рис. 3.7, б, соответствуют направлению потока, перпендикулярному к границе раздела двух зон; относительная погрешность в этом случае

$$\Delta_2 = \frac{Q_{\Phi}}{Q_p} = \frac{2(m + n)T_1T_2}{(T_1 + T_2)(T_2m + T_1n)}. \quad (3.25)$$

Анализ графиков позволяет судить о том, что для широкого диапазона значений модуля формы M погрешности в расходах не превышают 20—30 % (обычная ошибка определения единичного параметра) при условии, если отношение T_1/T_2 не выходит за пределы 0,5—2,0 при любом из возможных направлений потока. Очевиден и тот факт, что при конкретном направлении потока эти пределы могут быть расширены. Вариант ориентации потока, перпендикулярного к границе раздела двух зон, является самым неблагоприятным для получения эффективного параметра (как среднеарифметического значения) при расчете расходов потока с граничными условиями первого рода. Для плановых двумерных потоков возможно расширение указанных рамок применимости статистических методов осреднения параметров [3, 25], в особенности при условиях второго рода на границе дренажа (водопонижающих скважин), однако это обстоятельство не может служить основанием для излишне категоричных выводов о возможностях статистических методов при выборе эффективных параметров и преимуществах той или иной

методики осреднения применительно к различным законам распределения единичных значений проводимости.

Необходимость выполнения специальных исследований (решения ряда тестовых задач) для обоснования возможности осреднения параметров в каждом конкретном случае ставит под сомнение целесообразность схематизации неоднородности, однако отказ от последней становится в общем случае реальным опять-таки при возможности использования для прогноза математического моделирования. Лишь в частном случае — в условиях стационарного режима фильтрации — возможен аналитический учет фильтрационной неоднородности при фрагментировании планового потока (выделении лент тока) с последующим приведением фрагментов к однородным методом виртуальных длин [21].

Особые трудности в определении эффективного параметра возникают при рассмотрении нестационарных процессов. В этом варианте осреднение проводимости приводит к ощутимым погрешностям для задач с условиями первого рода [45], а для закрытых пластов максимальные погрешности связаны с осреднением водоотдачи [3].

Проведенные нами на аналоговых моделях исследования неоднородных одномерных потоков позволяют сделать некоторые частные выводы в отношении возможности осреднения параметров при нестационарном режиме фильтрации. На рис. 3.8 представлен график изменения расчетной эффективной проводимости (вычисляемой исходя из фактических фильтрационных расходов и уровней), характеризующей пласт, представленный тремя равновеликими зонами со слабо изменяющейся проводимостью (от $T_{\max}=40$ м²/сут до $T_{\min}=12$ м²/сут) и постоянной водоотдачей; на границе дренажа напор снижается «мгно-

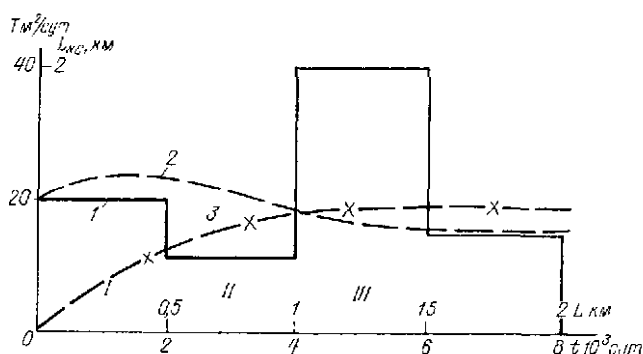


Рис 3.8. Интерпретация результатов моделирования нестационарной фильтрации в неоднородном пласте с водоотдачей $\mu=10^{-2}$.

1 — эпюра распределения проводимости T ; 2 — изменение расчетной проводимости T_p (для различных моментов времени); 3 — изменение во времени размеров $L_{кв}$ зоны квазистационарного режима (снижение напоров более 40 % от первоначальных).

венно». Результаты моделирования свидетельствуют о том, что при снижении напора в I и II зонах более чем на 40 % расчетное значение проводимости оказывается близким к среднеарифметическому значению проводимостей двух зон. Следовательно, в области квазистационарного режима при лимитированном соотношении проводимостей отдельных зон (не более 1:2) возможно получение эффективного параметра.

Для более резко выраженной неоднородности или закономерном (направленном) изменении параметров полученные статистически расчетные параметры могут приводить к существенным погрешностям в напорах и в особенности в расходах. Анализ результатов моделирования задачи с линейным изменением проводимости от T_{\max} до $T_{\min}=0,1T_{\max}$ между двумя границами дренажа с условиями первого рода свидетельствует о том, что среднее значение проводимости $T_{\text{ср}} = (T_{\max} + T_{\min})/2$ дает удовлетворительные результаты лишь при определении напоров в среднем сечении пласта. Для других сечений погрешности напоров достигают 200—400 %, поэтому погрешности определения расходов выходят за приемлемые пределы. Несмотря на определенную «жесткость» условий рассмотренных выше одномерных задач, результаты их решения могут служить иллюстрацией ограниченных возможностей статистических методов в выборе эффективных параметров пластов для нестационарного режима фильтрации.

Схематизация неоднородных в разрезе толщ разработана применительно к частному случаю слоистого их строения. Возможность схематизации слоистых толщ также определяется масштабом рассмотрения процесса фильтрации: при решении региональных задач для удаленных от границ участков может быть принята плано-однородная математическая модель с проводимостью, отвечающей суммарной проводимости отдельных слоев, при условии, что отношение этих проводимостей не превышает 1:10. В этом случае предполагается, что перетекание между отдельными слоями практически отсутствует, т. е. напоры в них близки. Проверка этого допущения может быть осуществлена предварительным расчетом по каждому из слоев исходя из коэффициентов пьезопроводности последних. При соотношении коэффициентов фильтрации отдельных слоев более 1:10 движение в слабопроницаемых слоях может рассматриваться как перетекание, нормальное к напластованию (предпосылка Мятнева — Гириного). Исследования, выполненные И. Б. Петровой для профилно-неоднородных моделей осесимметричной фильтрации, свидетельствуют о том, что в условиях нестационарного режима предпосылка Мятнева — Гириного о структуре потока в водоупорах существенно нарушается вблизи источника возмущения, однако эта предпосылка дает хорошие результаты при оценке напоров взаимодействующих водоносных пластов (рис. 3.9).

Применительно к условиям безнапорной фильтрации в сло-

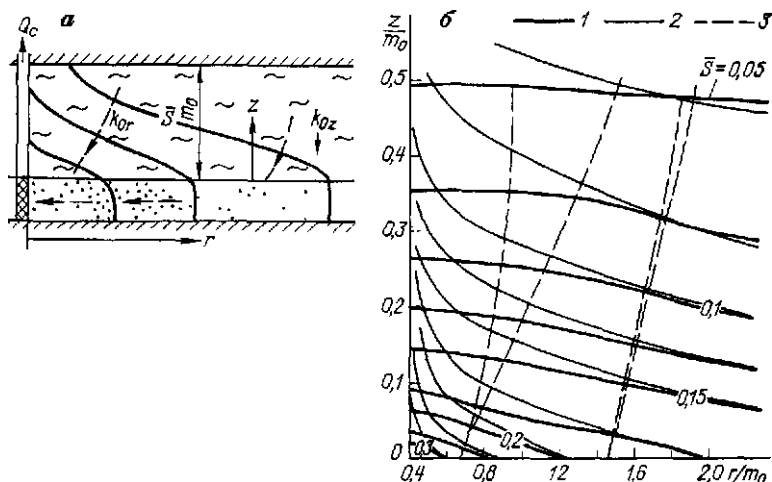


Рис. 3.9. Результаты моделирования на ЭВМ откачки из водоносного пласта, перекрытого относительным водоупором.

а — моделируемая схема осесимметричного потока к скважине с постоянным дебитом Q_c ; б — гидродинамическая сетка в водоупоре в окрестностях скважины — относительные понижения напора $\bar{S} = S/m_0$ зафиксированы для варианта изотропного ($k_{0r} = k_{0z}$) (1) и анизотропного ($k_{0r}/k_{0z} = 10$) водоупора (2) с соответствующими линиями тока (3)

истых толщах схематизация возможна за счет введения потенциала Н. К. Гиринского [21, 46] при условии, что соотношение проницаемостей отдельных слоев не превышает 1:4. Дополнительно следует отметить, что схематизация профильной неоднородности производится различно в зависимости от постановки задачи. В этой связи полезно вспомнить рекомендацию В. И. Аравина о замене криволинейного водоупора прямолинейным: прямолинейный водоупор проводится по минимальным отметкам для получения уровней потока и по средней линии (объемы выше и ниже фиктивного водоупора равны) для получения расходов. Схематизация неоднородной в разрезе толщи вблизи границ питания и дренажа требует, как правило, одновременного учета структуры потока и сводится к определению дополнительного фильтрационного сопротивления, отражающего, по сути дела, эффективный параметр этой зоны.

В целом основные критерии и методические приемы схематизации профильной неоднородности разработаны применительно к стационарным фильтрационным процессам. В связи с этим схематизация неоднородности в плане и в разрезе в условиях нестационарной фильтрации должна проводиться последовательно и итеративно.

Примером может служить оценка условий дренирования поля Ирша-Бородинского угольного карьера. Анализ условий осушения слоистого угленос-

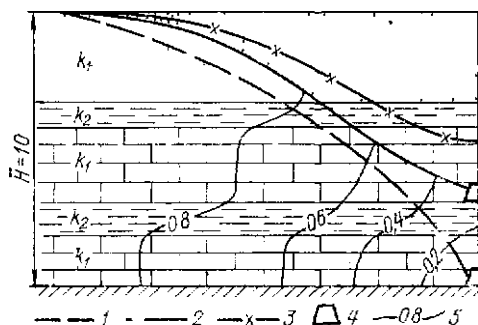


Рис 3 10 Положение депрессионных поверхностей в слоистой толще ($k_1=1$ м/сут, $k_2=0,05$ м/сут), осушаемой штреками

1 и 2 — напоры нижнего (1) и верхнего (2) горизонтов при осушении двумя штреками, 3 — напоры верхнего горизонта при осушении нижним штреком, 4 — положение штреков, 5 — линии равных относительных напоров H .

ного комплекса проводился с использованием электрических моделей с целью оценки возможности решения прогнозной задачи в рамках плано-однородной модели, а также для определения рационального расположения дренажных устройств (штреков) в разрезе. В рассматриваемых условиях водоносными пластами являются угольные пласты «Бородинский I» и «Бородинский II», разделенные относительным водоупором (аргиллитами).

Возможность моделирования профильной задачи в квазистационарной постановке проверялась решением тестовой задачи по схеме Либманна на двух параллельных цепочках сопротивлений, соединенных в узловых точках сопротивлениями, отвечающими характеристике относительного водоупора (k_0/m_0). По результатам моделирования осушение угольного пласта «Бородинский I» вблизи трассы дренажного штрека осуществляется через 100—150 сут после проходки последнего по пласту «Бородинский II». Этот период пренебрежимо мал по сравнению с периодом эксплуатации дренажных штреков, что позволяет оценить их эффективность в рамках квазистационарной профильной модели из электропроводной бумаги.

Результаты моделирования показали (рис 3 10), что верхний пласт («Бородинский I») может быть осушен за счет перетекания через относительно «водоупорное» междупластие при расположении дренажного штрека в почве нижнего пласта «Бородинский II». Расположение штрека в пределах пласта «Бородинский I» не дает необходимого дренажного эффекта по отношению к пласту «Бородинский II», а двухъярусное расположение штреков не имеет существенных преимуществ перед первой схемой. На отдельных моделях была обоснована возможность схематизации слоистой толщи однородным водоносным пластом. В дальнейшем по результатам режимных наблюдений на плано-однородной модели определены проводимость и пьезопроводность угленосного комплекса ($T=40$ м²/сут, $a=10^3$ м²/сут). Прогноз водопритоков к штрекам при решении плановой задачи по лентам тока проведен на основе принципа их недеформируемости (см раздел 4 4).

3.5. Прогноз водопритоков к горным выработкам и уровней дренируемых водоносных горизонтов аналитическими методами

Гидрогеологическая схематизация находит практическое применение прежде всего при прогнозных оценках изменений режима подземных вод за счет строительства и эксплуатации горнодобывающих предприятий. Без претензии на полное изложение методики расчета водопритоков к горным выработкам и к дренажным сооружениям, а также уровней дренируемых водоносных горизонтов ниже рассмотрены основные методические приемы, позволяющие предварительно аналитически оценить эти характеристики техногенного режима подземных вод.

Расчет водопритока к одиночной выработке за счет дренируемого ею водоносного пласта, имеющего границу обеспеченного питания, рекомендуется проводить по схеме «большого колодца», т. е. по формуле

$$Q = \frac{2\pi T S_0}{\ln(R/r_0)}, \quad (3.26)$$

где T — проводимость пласта; S_0 — понижение напора на контуре выработки (отсчитывается от «естественного» уровня); R — расчетный радиус области фильтрации (см. табл. 3.6); r_0 — радиус выработки.

Отметим, что расчет по формуле (3.26) учитывает и наличие инфильтрационного питания пласта по площади (при отсчете понижений от уровней естественного потока).

В условиях неустановившегося режима фильтрации в неограниченном пласте водоприток к выработке на расчетный момент времени t определяется по формуле (3.26) при радиусе R , рассчитанном по зависимости

$$R(t) = \sqrt{\alpha a t}, \quad (3.27)$$

где $\alpha = \pi$ — при мгновенном снижении напора на контуре дренажа; $\alpha = (\pi + 4b)/(1 + 2b)^2$ — при снижении напора на контуре дренажа по закону $S_0 = At^b$ [41].

Расчет водопритоков к отдельным участкам дренажных контуров целесообразно проводить по лентам тока, построенным графически [21] или на модели из электропроводной бумаги [46]. Водоприток к дренажному контуру по каждой из расчетных лент определяется по формуле

$$Q_n = \frac{TS_0 B}{L}, \quad (3.28)$$

где B и L — средняя ширина и длина ленты.

Уточненный расчет расхода в пределах лент тока может быть проведен на основе результатов моделирования; при необходимости можно определить и расходы в период неустановившейся фильтрации, пользуясь принципом недеформируемости линий тока (см. раздел 4.4).

Притоки к взаимодействующим выработкам определяются решением системы уравнений

$$\begin{cases} Q_1 \ln R_1 + Q_2 \ln \frac{R_2}{\rho_{1-2}} + \dots + Q_n \ln \frac{R_n}{\rho_{1-n}} = 2\pi T S_1 + \\ + Q_1 \ln r_{0,1}; \\ \dots \dots \dots \\ Q_1 \ln \frac{R_1}{\rho_{n-1}} + Q_2 \ln \frac{R_2}{\rho_{n-2}} + \dots + Q_n \ln R_n = 2\pi T S_n + \\ + Q_n \ln r_{0,n}, \end{cases} \quad (3.29)$$

где R_n — расчетный радиус области фильтрации (см. табл. 3.6); ρ_{n-k} — расстояние между выработками n и k .

Оценка водопритокков к отдельным участкам взаимодействующих выработок может быть выполнена после построения лент тока.

Представленные выше расчетные зависимости предусматривают, что реальные условия соответствуют схеме напорного пласта. Для учета особенностей безнапорных потоков необходим дополнительный анализ нелинейного фильтрационного процесса, и в случае целесообразности его линеаризации следует применять соответствующие потенциальные функции U_i . В частности, переход от формул напорной фильтрации к формулам, учитывающим безнапорность, осуществляется путем замены mS на U (см. раздел 3.2).

Можно отметить, что расчет расходов к дренажным контурам позволяет оценить водопритокки как к открытым, так и к подземным горным выработкам. В последнем варианте оценивается лишь «боковой» приток к зоне водопроводящих трещин над выработанным пространством как сумма притоков из всех водоносных пластов, пересекаемых этой зоной на разных отметках. Напоры на контурах дренажа соответствуют высотному положению почвы каждого пласта. Особенностью формирования водопритокков к подземным выработкам при ведении очистных работ является возможность поступления существенных водопритокков по площади горных работ за счет водоносного горизонта, залегающего над верхней границей ЗВТ. Вертикальную фильтрацию через «потолочину» можно рассматривать как установившийся процесс и определять водопритокки по формуле

$$Q_F = \frac{k_0 \Delta H}{m_0} F, \quad (3.30)$$

где k_0 и m_0 — коэффициент фильтрации и мощность относительного водоупора («потолочины»); ΔH — напор водоносного горизонта, отсчитываемый от верхней границы ЗВТ; F — площадь очистных работ.

Расход перетекания, рассчитанный по формуле (3.30), должен соответствовать расходу дренируемого водоносного горизонта. Для проверки этого условия требуется определение расхода по формуле (3.26) при заданном снижении напоров не вскрытого водоносного пласта на контуре очистных работ. Если напоры не вскрытого зоной водопроводящих трещин водоносного горизонта остаются практически неизменными, можно (при необходимости) рассчитать «боковой» приток из верхнего вскрытого этой зоной водоносного горизонта по формуле (3.26), в которой параметр R определяется по зависимости

$$R = 1,12 \sqrt{\frac{m_0}{k_0} T_b}, \quad (3.31)$$

где T_b — проводимость верхнего (из дренируемых) водоносного горизонта.

Расчет водопритокров к подготовительным горизонтальным выработкам в общем случае можно проводить по лентам тока; несовершенство этих дренажных контуров учитывается тем, что на них принимается расчетное (фиктивное) значение напора, определяемое по зависимости (3.15). В общем случае дополнительные фильтрационные сопротивления следует определять на электрических профильных моделях [46].

При прогнозе водопритокров к дренажным сооружениям целесообразно различать две группы расчетных схем:

— схемы, не требующие учета взаимодействия защищаемой горной выработки и дренажной системы;

— схемы, для которых такой учет является необходимым.

Первая группа схем включает прежде всего отдельные дренажные скважины или группы скважин, применяемые для опережающего снижения напоров в целях обеспечения проходки шахтных стволов, разрезных траншей и других выработок ограниченных размеров в плане. Опережающее снижение напоров S_b скважинами с заданными постоянными расходами Q_i определяется по зависимости

$$S_b = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i E_i [-\rho_{i,b}^2 / (4at)]}{4\pi T}, \quad (3.32)$$

где $\rho_{i,b}$ — расстояние от скважины номер i до расчетной точки b ; $E_i(-x)$ — экспоненциальная функция.

При одинаковом дебите скважин Q_c , расположенных в виде кругового контура радиусом r_0 , понижение напоров S_0 в центре круговой установки оценивается по формуле

$$S_0 = \frac{nQ_c E_i [-r_0^2 / (4at)]}{4\pi T}. \quad (3.33)$$

Расчет водопритокров к линейным контурам скважин с заданным дебитом в общем случае целесообразно проводить по лентам тока в рамках стационарной или нестационарной схемы, задавая на дренажном контуре понижения напора, равные

$$S_k - S_c = \frac{Q_c}{2\pi T} \ln \frac{\sigma}{\pi d_c}, \quad (3.34)$$

где S_c — понижение напора в дренажной скважине; σ — расстояние между скважинами диаметром d_c ; T — проводимость дренируемого пласта.

Расчет контурных систем скважин ведется по лентам тока в такой последовательности:

а) определяется требуемое снижение напора на контуре скважин из соотношения

$$\frac{S_k - S_b}{x} = \frac{S_k}{L_1}, \quad (3.35)$$

где L_1 — расчетное расстояние от дренажного контура до границы питания (или до условного контура питания $L_1 = \sqrt{\pi a t}$ при квазистационарном режиме); x — расчетное расстояние от дренажного контура до сечения с требуемым понижением S_b ;

б) определяется дебит каждой из скважин и расстояния между ними по зависимости

$$Q_c = \sigma T \left(\frac{S_k}{L_1} + \frac{S_k}{L_2} \right), \quad (3.36)$$

где L_2 — расчетное расстояние от контура до второй границы питания (до условного контура питания при неустановившемся режиме);

в) из соотношения (3.34) определяется понижение напора в скважине; если это понижение окажется выше предельно возможного, то необходимо скорректировать расчет дебита Q_c и расстояния σ .

Расчет прямолинейных контурных систем разгрузочных скважин с заданным понижением (предназначенных для снижения напоров в изолированном от горной выработки пласте, залегающем в подошве карьера или в кровле подготовительной выработки) может проводиться по следующей приближенной зависимости:

$$Q_c = \frac{2\pi\sigma T S_c}{\left\{ \sigma \ln(\sigma/2\pi r_c) + 2\pi \sqrt{a t} \right\}}, \quad (3.37)$$

где Q_c — искомый дебит каждой из разгрузочных скважин с радиусом r_c ; T и a — проводимость и коэффициент пьезопроводности пласта; S_c — известное понижение напора в скважине; σ — расстояние между скважинами в ряду; t — расчетный момент времени.

Понижения напоров S_x в точках с координатами x (отсчитываются от контура) можно определять по формуле

$$S_x = \frac{S_c (2\sqrt{a t} - x)}{2\sqrt{a t} + (\sigma/\pi) \ln(\sigma/2\pi r_c)}. \quad (3.38)$$

Параметры контурных систем, взаимодействующих с горной выработкой, следует определять исходя из допустимого водопритока к последней. В частном случае параметры ряда скважин, расположенных между контуром питания и контуром горной выработки в пределах плоской одномерной ленты тока, можно определить, решая систему уравнений

$$\begin{cases} Q_c = \frac{T S_c}{0,367 \lg(\sigma/\pi d_c) + l_1 l_2 / (\sigma L)}; \\ q_0 = \frac{T S_k^0}{L} - \frac{Q_c l_1}{\sigma L}, \end{cases} \quad (3.39)$$

где S_k^0 — понижение напора на линии ряда (на расстоянии l_1 от выработки и l_2 от контура питания), которое сформирова-

лось бы под влиянием горной выработки (без скважин); L — расстояние между основным контуром дренажа (выработкой) и контуром питания; S_c — понижение напора в скважинах с постоянным дебитом Q_c ; q_0 — допустимый приток к выработке.

Приближенный расчет дренажных контуров, работающих в условиях неустановившейся фильтрации, возможен по лентам тока с использованием принципа их недеформируемости. Расчет производится в такой последовательности:

- строятся ленты тока от контура горной выработки к внешним границам области фильтрации;

- намечается положение дренажного контура (по горно-геологическим условиям);

- определяется понижение напора на контуре S_k исходя из допустимого притока к выработке;

- определяются притоки к дренажному контуру на несколько расчетных моментов времени;

- на расчетные моменты определяются число и дебит скважин по зависимостям (3.35) и (3.36);

- назначается режим эксплуатации дренажной системы, предусматривающий постепенное отключение водопонижающих скважин или изменение их дебитов (дебитов сквозных фильтров).

Более сложные по структуре дренажные системы должны рассматриваться на математических моделях. Математическое моделирование особенно эффективно в тех случаях, когда скважины вводятся в действие в разное время, а также при взаимодействии скважин с подвижными дренажными контурами (горными выработками), при необходимости учета таких факторов, как нелинейность нестационарной фильтрации, взаимосвязь дренируемых пластов, инфильтрация, переменная во времени.

Возможность определения понижения уровней подземных вод аналитическими методами ограничивается локальными оценками применительно к частным схемам. В условиях установившегося режима расчет понижений уровней (напоров) водоносных горизонтов, дренируемых горной выработкой, приведенной к круговому контуру дренажа радиусом r_0 , можно производить по формуле

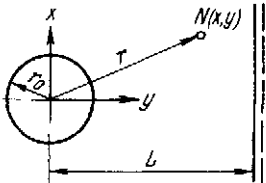
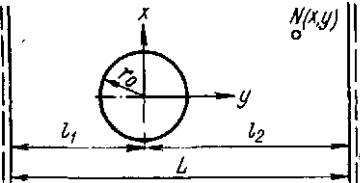
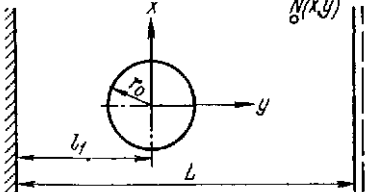
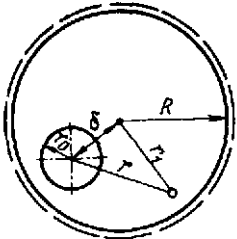
$$S_r = S_0 f_r, \quad (3.40)$$

где S_0 — понижение на дренажном контуре (на выработке); $f_r = f_r/f_{r0}$ — функция, определяемая по табл. 3.7.

В этих же условиях для определения понижений в расчетной точке от действия нескольких взаимодействующих горных выработок можно использовать зависимость

$$S_r = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{i=n} Q_i f_{r,i}, \quad (3.41)$$

где Q_i — водоприток к выработке номер i , определенный реше-

| Условия питания и дренажа водоносного горизонта | Схема |
|--|---|
| <p>Выработка в полуограниченном пласте (вблизи линейной границы с постоянным напором)</p> |  |
| <p>Выработка между параллельными границами с постоянным напором</p> |  |
| <p>Выработка между параллельными границами с постоянным напором и непроницаемым контуром</p> |  |
| <p>Выработка в круговом пласте с постоянным напором на внешней границе</p> |  |

нием системы (3.29); $f_{p,i}$ — функция понижения от действия выработки номер i , определяемая по табл. 3.7.

В условиях неустановившейся фильтрации к одиночной выработке при мгновенном снижении напора на ее контуре на S_0 понижение в любой расчетной точке пласта на момент времени t определяется зависимостью

с различными условиями их питания и дренажа

| f_{κ}^0 | f_p (для расчетной точки r) |
|---|--|
| $0,367 \lg \frac{2L}{r_0}$ | $0,367 \lg \frac{\sqrt{4L^2 - 4Ly + r^2}}{r}$ |
| $0,367 \lg \left[\frac{2L}{\pi r_0} \cos \frac{\pi(l_1 - l_2)}{2L} \right]$ | $\Theta(\bar{x}; 2\bar{l}_1 + \bar{y}) - \Theta(x; y);$ $\bar{l}_1 = \frac{l_1}{L}; \quad \bar{x} = \frac{x}{L}; \quad \bar{y} = \frac{y}{L}$ (рис. 3.11) |
| $0,367 \lg \left[\frac{4L}{\pi r_0} \operatorname{ctg} \frac{\pi l_1}{2L} \right]$ | $\Theta_1[\bar{x}; (\bar{l}_1 + \bar{y})] + \Theta_1[\bar{x}; (\bar{l}_1 - \bar{y})];$ $\bar{l}_1 = \frac{l_1}{L}; \quad \bar{x} = \frac{x}{L}; \quad \bar{y} = \frac{y}{L}$ (рис. 3.11) |
| $0,367 \lg \frac{R^2 - \delta^2}{Rr_0}$ | $0,367 \lg \frac{\sqrt{R^2 + \frac{r_1^2 \delta^2}{R^2} - \delta^2 + r^2 - r_1^2}}{r}$ |

$$S_r(t) = S_0 [1 - R(\gamma, \bar{r})], \quad (3.42)$$

где $R(\gamma, \bar{r})$ — табулированная функция (табл. 3.8); $\gamma = at/r_0^2$; $\bar{r} = r/r_0$; a — коэффициент пьезопроводности; r — координата расчетной точки, отсчитываемая от центра выработки радиуса r_0 .

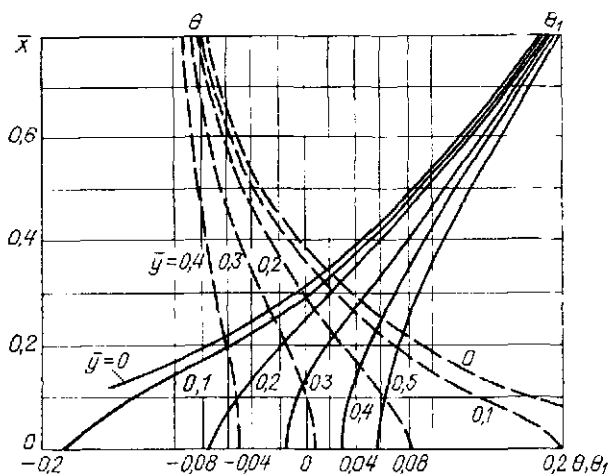


Рис. 3.11. Графики функций Θ и Θ_1 .

Отметим, что зависимости (3.40)—(3.42) предусматривают возможность расчета понижений напоров в изолированных водоносных пластах или в пластах со стабильным инфильтрационным питанием; в последнем случае отсчет понижений осуществляется от «естественных» уровней. Предпосылка о стабильности инфильтрационного питания может быть принята сравнительно редко, преимущественно для долгосрочных прогнозов.

Таблица 3.8

К определению функции $R(\gamma, \bar{r})$

| γ $R(\gamma, \bar{r})/\ln \bar{r}$ | 10^2 | 10^3 | 10^4 | 10^6 | 10^8 | 10^{10} | 10^{12} |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|-----------|
| | 0,33 | 0,24 | 0,18 | 0,13 | 0,10 | 0,07 | 0,06 |

Этими случаями в основном исчерпываются типовые расчетные схемы; в остальных вариантах для прогноза понижений в условиях установившейся и неуставившейся фильтрации требуется использование математического моделирования. Следует подчеркнуть, что в отличие от прогноза водопритока к горным выработкам при оценке прогнозируемого уровня режима подземных вод применение моделирования оказывается обязательным практически во всех вариантах, так как аналитические оценки даже в типовых условиях ограничиваются расчетом понижений напора лишь в отдельных контрольных точках поля фильтрации.

4. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СХЕМАТИЗАЦИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

4.1. Структура основных математических моделей водоносных горизонтов

Структура математических моделей, рассматриваемых при изучении и прогнозе гидродинамического режима подземных вод, отражает характер основных связей между условиями питания и разгрузки водоносных горизонтов, а также их фильтрационными параметрами; эта структура конкретизируется в виде определенных дифференциальных уравнений, которые выводятся на основе схематизации процесса фильтрации. При переходе от реального фильтрационного процесса к дифференциальному уравнению прежде всего принимается предпосылка о выполнении закона Дарси во всех точках области фильтрации; процесс рассматривается с позиций механики сплошной среды (включая варианты фильтрации в трещиноватых породах).

При анализе качества математических моделей необходимо проводить оценку их функциональных возможностей в тесной увязке последних с физическими представлениями об объекте исследований. Как уже отмечалось, подобный анализ должен проводиться при схематизации реальных фильтрационных процессов, определенным этапом которой является вычислительная схематизация. Вычислительная схематизация заключается в выборе и обосновании метода, способа или приема решения дифференциального уравнения фильтрации, которое в этом случае рассматривается как первичная модель изучаемого процесса.

С этих позиций целесообразно проанализировать основные дифференциальные уравнения фильтрации и соответствующую структуру их конечно-разностных аналогов; последние можно рассматривать как основу дискретных математических моделей, реализуемых на ЭВМ или АВМ. При оценке закономерностей техногенного режима подземных вод в качестве основной расчетной гидродинамической схемы выступает схема планового (двумерного) потока; дифференциальное уравнение, являющееся формулировкой двумерного потока (его математической моделью), записывается в следующем общем виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial H}{\partial y} \right) + w = \mu \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (4.1)$$

где T , μ , w и H — соответственно проводимость, водоотдача,

интенсивность инфильтрационного питания и значение функции напоров в точке поля фильтрации с координатами x, y ; t — временная координата.

Уравнение (4.1) приобретает определенность при задании на внешних и внутренних границах поля фильтрации различных комбинаций следующих условий:

первого рода — $H_r = f(x, y, t)$;

второго рода — $q_r = -T \frac{\partial H}{\partial n} = f(x, y, t)$;

третьего рода — $q_r = \alpha(x, y, t)(H - H_0)$;

четвертого рода (условия сопряжения) — $H_1 = H_2$; $-T_1 \frac{\partial H_1}{\partial n} = -T_2 \frac{\partial H_2}{\partial n}$.

Для нестационарных задач математическая модель должна характеризоваться начальными условиями, отражающими распределение функции напора по полю фильтрации на заданный момент нестационарного режима. Коэффициенты уравнения (4.1) могут быть переменными, зависящими от значений функции напора, и в этом варианте уравнение (4.1) является нелинейным. В частности, для безнапорного однородного потока уравнение (4.1) записывается в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x h \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y h \frac{\partial H}{\partial y} \right) + w = \mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (4.2)$$

где $h(x, y, t)$ — глубина (мощность) потока в точке с координатами x, y ; $H(x, y, t) = h(x, y, t) + z(x, y)$; $z(x, y)$ — отметка водоупора (отсчитываемая, так же как напор, от условной горизонтальной плоскости).

При $T = \text{const}$ и $\mu = \text{const}$ уравнение (4.1) может быть записано в линейном виде:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{w}{T} = \frac{1}{a} \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (4.3)$$

где $a = T/\mu$ — коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности).

Линеаризация уравнения (4.2), являющаяся элементом его схематизации, осуществляется несколькими способами. Согласно способу Ж. Буссинеска, принимается $kh_{cp} = T = \text{const}$ и уравнение (4.2) может быть записано в форме (4.3). Для однородного в разрезе потока с горизонтальным водоупором возможна линеаризация способом Багрова — Веригина [21, 46], что позволяет представить уравнение (4.2) в квазилинейной форме:

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} + \frac{w}{k} = \frac{\mu}{kh_{cp}} \frac{\partial h^2}{\partial t}. \quad (4.4)$$

Частным случаем линеаризации является использование функции Н. К. Гиринского Φ_r , которая позволяет свести урав-

нение (4.3) для горизонтально-слоистого потока к уравнению вида

$$\frac{\partial^2 \Phi_{\Gamma}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_{\Gamma}}{\partial y^2} + w = \frac{1}{a} \frac{\partial \Phi_{\Gamma}}{\partial t}, \quad (4.5)$$

где

$$\Phi_{\Gamma} = \sum_{i=1}^{i=n} k_i m_i (h - z_i).$$

Уравнение (4.5) в принципе остается нелинейным относительно коэффициента уровня проводности a , зависящего от положения депрессионной поверхности в различные моменты. Решение уравнения (4.5) требует соответствующего изменения начальных и граничных условий, которые становятся нелинейными, что осложняет математическую модель и поэтому ограничивает возможности рассмотрения процесса в рамках формально линеаризованной модели.

Линеаризация уравнения (4.2) применительно к схеме безнапорного однородного потока на наклонном водоупоре (с уклоном i) позволяет представить это уравнение в следующей форме (для одномерного варианта):

$$kh \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) + ki \frac{\partial h}{\partial x} = \mu \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.6)$$

или

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{i}{h} \frac{\partial h^2}{\partial x} = \frac{\mu}{kh} \frac{\partial h^2}{\partial t}. \quad (4.6a)$$

Приведенные выше параболические уравнения сложны для интегрирования при получении конкретных решений, поэтому при определенных условиях целесообразна замена линейных их модификаций эллиптическими уравнениями, не содержащими производной по времени; такая замена осуществляется с помощью преобразований Лапласа или Лапласа — Карсона [21, 22, 46], которые применимы к уравнению (4.1), представленному эквивалентным уравнением вида

$$T \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + T \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + w = \mu_0 \frac{\partial S}{\partial t}, \quad (4.7)$$

где S — понижение напора в точке с координатами x, y .

Уравнение (4.7) после применения интегрального преобразования записывается в следующем виде:

$$T \frac{\partial^2 \bar{S}}{\partial x^2} + T \frac{\partial^2 \bar{S}}{\partial y^2} = A_p \bar{S}, \quad (4.8)$$

где \bar{S} — функция изображения, равная

$$\bar{S} = \frac{1}{t_p} \int_0^{\infty} S(x, y, \tau) e^{-\frac{\tau}{t_p}} d\tau; \quad (4.8a)$$

t_p — параметр преобразования [21].

Переменные во времени граничные условия задаются в виде функций изображения типа (4.8а); при $S_r = \text{const}$ $S_r = S_r$; при $\omega = \text{const}$ $\omega = \omega$.

В зависимости от вида схемы-модели (характера питания водоносного горизонта) коэффициент A_p в уравнении (4.8) имеет соответствующие выражения (табл. 4.1).

Таблица 4.1

К определению коэффициента A_p для разных условий питания водоносных горизонтов

| Условия питания водоносного горизонта | Выражение для коэффициента A_p |
|--|----------------------------------|
| Без осложняющих факторов (питание по площади отсутствует) | μ/t_p |
| Питание по площади за счет инфильтрации | $\mu/t_p - \omega/\bar{S}$ |
| Питание за счет перетекания из горизонта с постоянным напором через разделяющий слабопроницаемый слой мощностью m_0 с коэффициентом фильтрации k_0 | $\mu/t_p + k_0/m_0$ |
| Питание или испарение по площади, зависящие от глубины залегания уровня подземных вод $z: \omega(t)/z = f(S)$ | $\mu/t_p - \omega(t)/z$ |

Для простых условий фильтрации (однородный по фильтрационным параметрам пласт, простейшая конфигурация его границ, простые граничные условия, линейность процесса фильтрации) получены частные решения дифференциальных уравнений, которые характеризуют так называемые типовые гидродинамические схемы [21]. Для анализа сложных расчетных схем приходится прибегать к использованию математических моделей.

Отметим, что уравнения фильтрации содержат так называемые потенциальные функции (значения гидростатических напоров, понижений напоров, функции Н. К. Гириного и т. д.), которые определяют интенсивность фильтрационных потоков при заданных граничных условиях и фильтрационных характеристиках водоносных горизонтов.

4.2. Конечно-разностные уравнения фильтрации

Моделирование фильтрационных процессов на ЭВМ и АВМ основано на решении уравнений, представленных в конечно-разностной форме. В этом проявляется принципиальная общность численных и аналоговых моделей фильтрации. Именно с этих позиций ниже рассматриваются некоторые методические моменты вычислительной схематизации, относящиеся в равной мере к численному и к электрическому моделированию.

Как известно, конечно-разностная аппроксимация дифференциальных уравнений физических процессов основана на дискретном представлении пространства и времени. Непрерывное фильтрационное поле заменяется фиктивной сеточной областью, характеризующейся значениями потенциальных функций в узловых точках (сеточными значениями моделируемой функции), которые фиксируются на ряд моментов времени с шагом Δt . Значения сеточных функций в узловых точках дискретной математической модели определяются граничными и начальными условиями, а также фильтрационными сопротивлениями между отдельными узлами, зависящими от геометрии и фильтрационных параметров соответствующего элементарного участка поля. В соответствии с принятой системой разбивки поля фильтрации различают прямоугольные (в частности квадратные), треугольные и многоугольные элементы, образующие либо регулярную, либо асимметричную сетку. Использование асимметричных сеток приводит к сокращению числа узлов сеточной области, а в ряде случаев способствует повышению точности получаемого решения за счет лучшей аппроксимации пространственной производной.

Частным случаем асимметричной разбивки поля фильтрации является дискретизация его в соответствии с гидродинамической сеткой двумерного поля (представленной взаимно перпендикулярными линиями тока и эквипотенциалами). В зависимости от принципа аппроксимации пространственных производных исходного дифференциального уравнения конечно-разностные аналоги последнего могут быть записаны в явной, неявной и явно-неявной форме [40].

Дифференциальное уравнение (4.1) может быть аппроксимировано неявным конечно-разностным уравнением

$$T_{x,i} \left(\frac{H_{i-1,t} - 2H_{0,t} + H_{i+1,t}}{\Delta x^2} \right) + T_{y,i} \left(\frac{H_{i,t+2} - 2H_{0,t} + H_{i,t+1}}{\Delta y^2} \right) + \omega_0 \Delta x \Delta y = \frac{\mu_0 (H_{0,t} - H_{0,t-\Delta t})}{\Delta t}, \quad (4.9)$$

где $H_{0,t}$, $H_{i,t}$ и $H_{0,t-\Delta t}$ — напоры в расчетной точке и соседней с ней точке номер i соответственно на моменты времени t и $t-\Delta t$.

Уравнение (4.9) может быть преобразовано к виду

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{i=2} T_{x,i} \frac{(H_{i,t} - H_{0,t}) \Delta y}{\Delta x} + \\ & + \sum_{i=3}^{i=4} T_{y,i} \frac{(H_{i,t} - H_{0,t}) \Delta x}{\Delta y} + \omega_0 \Delta x \Delta y = \\ & = \frac{\mu_0 \Delta x \Delta y (H_{0,t} - H_{0,t-\Delta t})}{\Delta t}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

где $\Delta x / (T_{x,i} \Delta y) = \Phi_x$ и $\Delta y / (T_{y,i} \Delta x) = \Phi_y$ — фильтрационные со-

противления элементарных участков по взаимно перпендикулярным направлениям.

Уравнение (4.10) соответствует балансу расходов в пределах каждого из элементарных блоков, тяготеющих к узловым точкам. Балансовая, или интегроинтерполяционная [40] форма (4.10) конечно-разностного уравнения характеризуется коэффициентами, которые соответствуют средним значениям проводимости между узловыми точками, что позволяет решать задачи с переменными и разрывными параметрами. Водоотдача водонесного горизонта и интенсивность инфильтрационного питания трактуются как средние значения этих параметров в окрестностях каждой узловой точки (в пределах расчетного блока).

Уравнение вида (4.10) в математической литературе носит название интегробалансовой неявной схемы Лаасенена [40], которая может быть использована в численном и аналоговом моделировании. Техническая реализация решения этого уравнения на сеточной электрической модели предложена Либманном [13, 46]. Баланс токов в каждой узловой точке электрической модели согласно схеме Либманна может быть записан в виде

$$\sum_{i=1}^{i=2} \frac{U_i - U_0}{R_{x,i}} + \sum_{i=3}^{i=4} \frac{U_i - U_0}{R_{y,i}} = \frac{U_0 - U'_0}{R_t} - I_w, \quad (4.11)$$

где U_0 — электрический потенциал в узловой точке, соответствующий искомой моделируемой функции на момент времени t ; U'_0 — электрический потенциал, подаваемый на вершину соответствующего временного сопротивления и отвечающий моделируемой функции на момент времени $t - \Delta t$;

$$\begin{aligned} R_{x,i} &= \frac{\Delta x}{T_{x,i} \Delta y m_\phi}; \\ R_{y,i} &= \frac{\Delta y}{T_{y,i} \Delta x m_\phi}; \\ R_t &= \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x \Delta y m_\phi}; \end{aligned} \quad (4.11a)$$

m_ϕ — произвольно выбранный (независимый) масштаб флльтрационных сопротивлений; $I_w = \omega_0 \Delta x \Delta y V_{\max} / m_q$; ω_0 — интенсивность инфильтрации; m_q — масштаб расходов, зависящий от выбранного масштаба сопротивлений и масштаба потенциальной функции m_n ($m_q = m_n / m_\phi$); $m_n = (H_{\max} - H_{\min}) / (U_{\max} - U_{\min})$; V_{\max} — напряжение на модели, соответствующее потенциалу $U_{\max} = 1,0$.

Технические особенности моделирования по схеме Либманна достаточно подробно освещены в литературе [6, 13, 46]. Следует отметить, что для решения гидрогеологических задач эта схема была применена и популяризована В. М. Шестаковым

и И. Е. Жерновым [13]. Несомненным достоинством схемы Либманна является ее простота, наглядность, гибкость, выражающаяся в возможности учета в процессе моделирования изменений параметров фильтрационного поля, положения его границ и условий на них. Благодаря этим качествам схема с успехом может применяться для решения сложных нелинейных задач, что позволяет считать ее основной при изучении нарушенного режима подземных вод. Можно также отметить, что моделирование по этой схеме не требует сложной аппаратуры и кроме серийно выпускаемых электроинтеграторов типа БУСЭ-70 или ЭГДА 9/60 позволяет применять изготавливаемые в единичных экземплярах простые установки.

Недостатком схемы Либманна является трудоемкость ее реализации на АВМ с ручным управлением, что стимулирует поиски технических приемов, облегчающих моделирование [13], а также развитие гибридных машин, работающих в алгоритме схемы Либманна [17]. В настоящее время имеется определенный опыт решения гидрогеологических задач с помощью гибридного комплекса «Сатурн», на котором целесообразно решать прежде всего нелинейные задачи. Однако уникальность гибридных машин, их высокая стоимость, сложность организации их технического обслуживания ограничивают область использования подобных установок гидрогеологическими исследованиями фундаментального научно-методического плана.

Стремление к минимизации числа операций при моделировании на ЭВМ и АВМ приводит к рассмотрению конечно-разностных схем, которые при ограниченном числе временных шагов обеспечивали бы удовлетворительную точность получаемого решения. Такими качествами в принципе обладают явно- неявные схемы, одной из разновидностей которых является так называемая схема с весами [40], аппроксимирующая уравнение (4.1) в виде

$$\begin{aligned} & \sigma \left[\sum_{i=1}^{i=2} T_{x,i} \frac{(H_{t,t} - H_{0,t}) \Delta y}{\Delta x} + \right. \\ & \quad \left. + \sum_{i=3}^{i=4} T_{y,i} \frac{(H_{t,t} - H_{0,t}) \Delta x}{\Delta y} \right] + \\ & + (1 - \sigma) \left[\sum_{i=1}^{i=2} T_{x,i} \frac{(H_{t,t-\Delta t} - H_{0,t-\Delta t}) \Delta y}{\Delta x} + \right. \\ & \quad \left. + \sum_{i=3}^{i=4} T_{y,i} \frac{(H_{t,t-\Delta t} - H_{0,t-\Delta t}) \Delta x}{\Delta y} \right] = \\ & = \frac{\mu \Delta x \Delta y (H_{0,t} - H_{0,t-\Delta t})}{\Delta t}, \end{aligned} \quad (4.12)$$

где σ — весовой коэффициент, определенный в пределах

$0 \leq \sigma \leq 1$; при $\sigma=1$ уравнение (4.12) переходит в неявное уравнение (4.10), а при $\sigma=0$ становится уравнением в явной форме.

При $\sigma=0,5$ явно-неявная схема (4.12) носит название схемы Кранка — Николсона [40]. Схема (4.12) чаще всего используется при численном моделировании.

Непосредственная реализация явно-неявных схем на сетках сопротивлений требует организации итерационного процесса [13], что существенно ограничивает возможности моделирования уравнения (4.12) на АВМ с ручным управлением.

Явную часть уравнения (4.12) можно записать в виде

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{i=2} T_{x,i} \frac{(H_{i,t-\Delta t} - H_{0,t-\Delta t}) \Delta y}{\Delta x} + \\ & + \sum_{i=3}^{i=4} T_{y,i} \frac{(H_{i,t-\Delta t} - H_{0,t-\Delta t}) \Delta x}{\Delta y} = \\ & = \frac{\mu \Delta x \Delta y (H_{0,t-\Delta t} - H_{0,t-2\Delta t})}{\Delta t}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Такая запись явной части позволяет представить уравнение (4.12) в следующей формально неявной модификации:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{i=2} T_{x,i} \frac{(H_{i,t} - H_{0,t}) \Delta y}{\Delta x} + \\ & + \sum_{i=3}^{i=4} T_{y,i} \frac{(H_{i,t} - H_{0,t}) \Delta x}{\Delta y} = \\ & = \frac{\mu \Delta x \Delta y \{H_{0,t} - [H_{0,t-\Delta t} + (1-\sigma)(H_{0,t-\Delta t} - H_{0,t-2\Delta t})]\}}{\sigma \Delta t}. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Уравнение (4.14) моделируется по алгоритму схемы Либманна на сетке с временными сопротивлениями, которые определяются зависимостью

$$R_t = \frac{\sigma \Delta t}{\mu \Delta x \Delta y m_\Phi} \quad (4.14a)$$

На вершины временных сопротивлений подаются потенциалы U_0' , которые пропорциональны рассчитанному значению моделируемой функции

$$H_{0,t-\Delta t} = H_{0,t-\Delta t} + (1-\sigma)(H_{0,t-\Delta t} - H_{0,t-2\Delta t}). \quad (4.14b)$$

Для получения значений функции на момент времени $t=\Delta t$ может быть использовано моделирование уравнения (4.10) по схеме Либманна [при $R_t = \Delta t / (\mu \Delta x \Delta y m_\Phi)$], после чего временное сопротивление изменяется согласно зависимости (4.14a). Дифференциальное уравнение (4.1) может быть аппроксимировано

конечно-разностным аналогом в следующей явно- неявной форме:

$$\sum_{i=1}^{i=2} T_{x,i} \frac{(H_{i,t} - H_{0,t}) \Delta y}{\Delta x} + \sum_{i=3}^{i=4} T_{y,i} \frac{(H_{i,t} - H_{0,t}) \Delta x}{\Delta y} =$$

$$= \mu \Delta x \Delta y \left[(1 + \sigma_0) \frac{H_{0,t} - H_{0,t-\Delta t}}{\Delta t} - \sigma_0 \frac{H_{0,t-\Delta t} - H_{0,t-2\Delta t}}{\Delta t} \right], \quad (4.15)$$

где $\sigma_0 = 0,5 + \Delta x^2 / (12a\Delta t)$ (a — коэффициент пьезопроводности).

Уравнение 4.15 решается на ЭВМ или на АВМ при временных сопротивлениях, определяемых формулой

$$R_t = \frac{\Delta t}{(1 + \sigma_0) \mu \Delta x \Delta y m_\Phi}. \quad (4.15a)$$

Из вершины временных сопротивлений подается потенциал, пропорциональный значению функции

$$H'_{0,t-\Delta t} = H_{0,t-\Delta t} + \frac{\sigma_0}{1 + \sigma_0} \times$$

$$\times (H_{0,t-\Delta t} - H_{0,t-2\Delta t}). \quad (4.15b)$$

Явные конечно-разностные уравнения (при $\sigma=0$) решаются на АВМ методом итераций по всем узловым точкам модели или путем последовательного нахождения значений функций в обособленных узлах сетки; во втором случае АВМ выполняет роль счетного устройства, примером которого может служить статический интегратор типа СЭИ. Ограничения, накладываемые на разбивку по пространству и времени для обеспечения устойчивости явной схемы [40], требуют зачастую существенного увеличения числа временных шагов при моделировании, которое становится чрезмерно трудоемким. Выбор вида конечно-разностного аналога существенно зависит от характера решаемой задачи: при решении прогнозных задач принципиально можно использовать как неявные, так и явные методы, однако при рассмотрении обратных задач неявные методы оказываются вне конкуренции, так как они не требуют параллельных оценок устойчивости решения.

Дифференциальные уравнения могут быть не полностью аппроксимированы конечно-разностными формами; в частности, уравнение (4.1) может быть заменено следующим конечно-разностным аналогом:

$$\sum_{i=1}^{i=2} T_{x,i} \frac{(H_{i,t} - H_{0,t}) \Delta y}{\Delta x} + \sum_{i=3}^{i=4} T_{y,i} \frac{(H_{i,t} - H_{0,t}) \Delta x}{\Delta y} +$$

$$+ w \Delta x \Delta y = \mu \Delta x \Delta y \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (4.16)$$

Электрической моделью уравнения (4.16) является сетка сопротивлений с конденсаторами, подключенными к каждой узловой точке; электрический процесс на такой модели характеризуется уравнением

$$\sum_{i=1}^{i=2} \frac{U_i - U_0}{R_{x,i}} + \sum_{i=3}^{i=4} \frac{U_i - U_0}{R_{y,i}} + I_w = C \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (4.17)$$

где C — емкость конденсатора, которая при выбранном масштабе сопротивлений сетки определяет масштаб времени

$$m_t = \frac{\mu \Delta x^2}{T_{x,i} R_{x,i} C} = \frac{\mu \Delta y^2}{T_{y,i} R_{y,i} C}; \quad (4.17a)$$

$R_{x,i}$ и $R_{y,i}$ — сопротивления сетки модели, определяемые зависимостями (4.11a); I_w — сила тока, подаваемого в узловые точки модели, отвечающая интенсивности инфильтрационного питания.

Частичная замена производных (только по пространству) в исходном дифференциальном уравнении обеспечивает высокую точность решения при одновременном снижении трудоемкости электрического моделирования. При решении линейных задач фильтрации емкостные сеточные модели обладают явными преимуществами перед моделями с временными сопротивлениями. Некоторым ограничением применения емкостных моделей в практике геофильтрационных расчетов является необходимость эксплуатации сложной аппаратуры (аналоговых машин УСМ-1, МСМ-1, интегратора ЭИМП 3/66). Попутно можно отметить целесообразность комплексирования интеграторов БУСЭ-70 и ЭИМП 3/66, которое позволяет решать разнообразные задачи, учитывая возможности емкостных и чисто резисторных моделей.

Конкурирующими с емкостными моделями по точности получаемого на ЭВМ и АВМ решения являются модели, которые реализуют конечно-разностный аналог уравнения (4.7), записанный в виде

$$\sum_{i=1}^{i=2} T_{x,i} \frac{(\bar{S}_i - \bar{S}_0) \Delta y}{\Delta x} + \sum_{i=3}^{i=4} T_{y,i} \frac{(\bar{S}_i - \bar{S}_0) \Delta x}{\Delta y} = A_p \bar{S}_0 \Delta x \Delta y. \quad (4.1)$$

Левая часть уравнения (4.7) реализуется на сетке сопротивлений $R_{x,i}$ и $R_{y,i}$, рассчитанной согласно зависимостям (4.11a), правая часть уравнения реализуется с помощью так называемых «операторных» сопротивлений R_p , расчет которых производится по формуле

$$R_p = \frac{1}{A_p \Delta x \Delta y m_\phi}. \quad (4.18a)$$

В частном случае при отсутствии инфильтрации и перетекания

$$R_p = \frac{t_p}{\mu \Delta x \Delta y m_\Phi}, \quad (4.186)$$

где t_p — параметр преобразования.

Моделирование на сеточных моделях уравнения (4.18) аналогично реализации одним временным шагом по схеме Либманна; кроме того, можно существенно сократить объем операций на моделях за счет определения напоров лишь в отдельных (расчетных) точках. На модели определяются потенциалы, соответствующие функциям изображений, а дальнейший переход к оригиналу (понижениям) осуществляется с помощью численных методов обращения. Определение понижений возможно также по трем значениям функции изображения, полученным при различных значениях параметра преобразования [22] — при трех значениях «операторных» сопротивлений. Простота и дешевизна аппаратуры, применяемой для реализации операционного метода на АВМ, являются благоприятным фактором при сравнении этого метода с емкостными моделями.

Неполная аппроксимация дифференциального уравнения (4.1) осуществляется также при моделировании на комбинированных моделях, представленных электропроводной бумагой с дискретными временными сопротивлениями (операторными сопротивлениями или емкостями). Технические погрешности, определяемые неоднородностью электропроводной бумаги (при сравнительно небольших погрешностях за счет дискретности по пространству при сеточной его аппроксимации), ограничивают практическое использование таких моделей, несмотря на детально разработанное их научно-методическое обоснование.

4.3. Оценка погрешностей математического моделирования гидродинамических процессов

Выявление возможных погрешностей моделирования необходимо как при оценке качества гидрогеологического прогноза, так и при анализе результатов решения обратных задач по определению фильтрационных параметров. Следует подчеркнуть, что некорректность обратных задач проявляется в возникновении грубых ошибок в параметрах за счет сравнительно небольших погрешностей потенциальных функций; это предопределяет особую значимость оценок точности модельного решения.

Наиболее явными представляются технические погрешности электрического моделирования, которые связаны с разрешающей способностью измерительной аппаратуры и с неизбежными случайными отклонениями фактических параметров моделей от расчетных. Параллельное решение на ЭВМ и АВМ разнообразных фильтрационных задач показывает, что технические

погрешности моделирования на электроинтеграторах БУСЭ-70 и ЭГДА 9/60 лимитируются 1—2 % (при эксплуатации стандартной измерительной аппаратуры).

Основные погрешности математического моделирования фильтрационных процессов связаны прежде всего с конечно-разностной аппроксимацией исходных дифференциальных уравнений. В частности, погрешности модельного решения стационарных задач определяются аппроксимацией пространственной производной [13, 40], а моделирование нестационарных задач сопровождается максимальными погрешностями за счет конечно-разностного представления производных по времени и в меньшей степени зависят от дискретности поля фильтрации. Погрешности конечно-разностных аппроксимаций дифференциальных уравнений пропорциональны скорости изменения моделируемой функции, т. е. зависят от стадии развития нестационарного процесса, от граничных условий и параметров водоносных пластов.

Следовательно, погрешность решения конечно-разностных уравнений на ЭВМ или на сетках электрических сопротивлений является комплексной величиной, отражающей как органические погрешности самого численного метода, так и технические погрешности моделирования. Предел целесообразного ограничения комплексной погрешности электрического моделирования (на сеточных моделях) определяется его техническими погрешностями. С этих позиций точность моделирования различных конечно-разностных схем целесообразно оценивать по двум видам погрешностей: по абсолютной приведенной и по относительной погрешности моделируемой функции.

Абсолютная приведенная погрешность понимается как отношение $\Delta\varphi_{i,t}/\varphi_{\max}$, где $\Delta\varphi_{i,t}$ — разность между модельным (сеточным) и точным значениями моделируемой потенциальной функции в расчетной точке i на момент времени t , φ_{\max} — максимальное значение потенциальной функции в пределах моделируемого поля. Абсолютная приведенная погрешность позволяет определить точность вычисления функции и оценить соответствие ее техническим возможностям моделирования для выявления возможности и целесообразности снижения погрешности решения. Абсолютная приведенная погрешность необходима также для анализа решения обратных задач по определению фильтрационных параметров; в этом варианте возможно значение абсолютной приведенной погрешности сопоставляется с чувствительностью модели (по соответствующим расчетным точкам), а также с точностью исходных данных. Если чувствительность модели оказывается высокой, то необходимо снизить погрешность моделирования за счет пересмотра дискретности процесса по времени.

Относительная погрешность понимается как отношение $\Delta\varphi_{i,t}/\varphi_{i,t}$, где $\varphi_{i,t}$ — точное значение потенциальной функции в расчетной точке i на расчетный момент t . Относительная по-

грешность позволяет оценить точность получаемого решения, однако при малых значениях функций, соизмеримых с технической погрешностью моделирования, при этом создается превратное представление о точности последнего.

Оценка оптимальности конечно-разностной схемы производится в разных нормах [40], т. е. оценивается либо максимальной, либо усредненной по рассматриваемой области погрешностью (что для гидрогеологических задач представляется неадекватным).

Анализу погрешностей различных конечно-разностных схем посвящены фундаментальные математические исследования. В частности, анализ, основанный на разложении функции в виде ряда Тейлора [40], позволяет выявить порядок возможной погрешности, а применение спектрального анализа [40] дает возможность оценить максимальные погрешности различных конечно-разностных схем.

Погрешности тех или иных конечно-разностных уравнений должны оцениваться в пределах их устойчивых решений. Согласно Р. Рихтмайеру [40], под устойчивостью конечно-разностной схемы следует понимать такое ее свойство, которое выражается в том, что погрешность решения имеет тенденцию к убыванию или не превышает определенное заранее значение при увеличении числа временных шагов. Неустойчивость схемы может проявляться в существенном изменении решения при малых изменениях граничных или начальных условий [40]. В некоторых случаях неустойчивость может быть связана с накоплением технических погрешностей (или погрешностей округления).

Устойчивость определяется главным образом соотношением выбранной разбивки поля Δx и временной координаты Δt . Применительно к конечно-разностным уравнениям типа (4.9), (4.12) условия устойчивости при $0 \leq \sigma \leq 0,5$ формулируются в следующем общем виде:

$$\frac{2a\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{1-2\sigma}. \quad (4.19)$$

При $0,5 \leq \sigma \leq 1,0$ схемы устойчивы. Устойчивость конечно-разностных схем неразрывно связана с их сходимостью; последняя проявляется в сокращении погрешности сеточного решения при дроблении временной координаты. Связь устойчивости и сходимости трактуется как их эквивалентность [40], которая позволяет считать, что устойчивость необходима и достаточна для сходимости.

Таким образом, исходя из теоретических оценок устойчивости и погрешностей конечно-разностных схем, а также принимая во внимание технические возможности их реализации, при электромоделировании предпочтение следует отдать неявной и явно-неявной схемам, которые позволяют лимитировать число

временных шагов независимо от дискретности поля фильтрации. При моделировании фильтрационных задач на ЭВМ целесообразнее использовать явные и явно- неявные схемы, что в целом позволяет снизить количество счетных операций (по сравнению с неявной схемой) при обеспечении одинаковой точности получаемого решения.

Теоретический анализ [40] дает возможность оценить лишь порядок погрешностей различных конечно-разностных схем; такие оценки представлены в табл. 4.2. Количественная оценка погрешностей конечно-разностной схемы, зависящих (кроме принятой дискретности) от граничных условий, требует специальных исследований. С этой целью нами проводился анализ типовых гидродинамических схем одномерных плоскопараллельных потоков (ограниченных внешним непроницаемым контуром и полуограниченных) с различными условиями на границе дренажа («мгновенное» снижение напора, линейное его изменение, стабильный фильтрационный расход).

Таблица 4.2

Оценка погрешностей конечно-разностных схем

| Вид конечно-разностной схемы | Порядок погрешностей схемы |
|--|-----------------------------------|
| Неявная ($\sigma = 1$) | $K_1 \Delta t + K_2 \Delta x^2$ |
| Явная ($\sigma = 0$) | $K_1 \Delta t^2 + K_2 \Delta x^2$ |
| Явно-неявная ($\sigma = 0,5$) | $K_1 \Delta t + K_2 \Delta x^2$ |
| Явно-неявная [$\sigma = 0,5 + \Delta x^2/(12a\Delta t)$] | $K_1 \Delta t^2 + K_2 \Delta x^4$ |

Результаты исследований [33] неявной схемы свидетельствуют о том, что ее погрешности существенно зависят от количества временных шагов, вида граничных условий, продолжительности расчетного периода (стадии процесса). Максимальные погрешности характерны для схем с «мгновенным» изменением напора на границе дренажа, поэтому такие схемы следует считать наиболее «жесткими».

На рис. 4.1 представлены результаты оценки погрешностей схемы полуограниченного пласта ($\tau < 0,3$) и схемы пласта с непроницаемым внешним контуром ($\tau > 0,3$), где $\tau = at/L^2$ — безразмерное время, a — коэффициент пьезопроводности пласта длиной L , t — продолжительность расчетного периода. В частности, для схемы полуограниченного пласта при «мгновенном» снижении напора на границе дренажа максимальные относительные (всегда положительные) погрешности характерны для точек, ближайших к границе дренажа; для удаленных точек возможны отрицательные погрешности. Относительные погрешности этой схемы проявляют четкую зависимость от числа

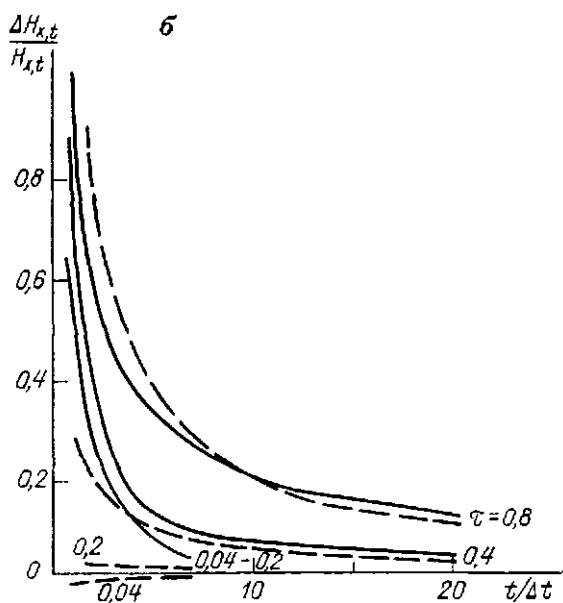
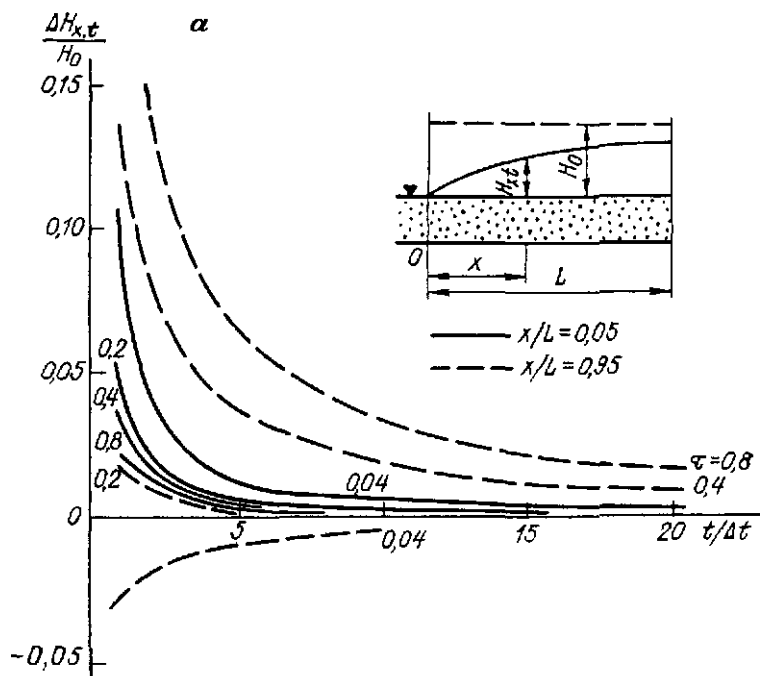


Рис. 4.1. Графики абсолютных приведенных (а) и относительных (б) погрешностей схемы Либманна при моделировании одномерного пласта с «мгновенным» снижением напора на границе.

временных шагов; эта зависимость (при $t/\Delta t > 3$) может быть записана в виде

$$\frac{\Delta H_{t,x}}{H_{t,x}} = \frac{0,5\Delta t}{t}, \quad (4.20)$$

где t — продолжительность расчетного периода; Δt — шаг по времени.

Интересно отметить, что относительные погрешности для схемы закрытого пласта с непроницаемым внешним контуром проявляют весьма четкую гиперболическую зависимость от числа временных шагов (рис. 4.1, б), которая может быть выражена формулой

$$\frac{\Delta H_{t,x}}{H_{t,x}} = \frac{2,8\tau\Delta t}{t}. \quad (4.21)$$

Анализ схемы пласта, ограниченного непроницаемым контуром, при линейном изменении напоров на контуре дренажа показывает, что абсолютные погрешности этой схемы существенно зависят от числа временных шагов и характеризуются отрицательными знаками по всей области фильтрации (рис. 4.2). Относительные погрешности в удаленных от границы дренажа точках практически не зависят от продолжительности расчетного периода (в диапазоне $0,4 < \tau < 2,0$) и составляют 25—30 %, что существенно отличает данную схему от ранее рассмотренной схемы с «мгновенным» снижением напора на контуре дренажа. Следовательно, при линейном снижении напора неявная схема обеспечивает предельную по техническим возможностям точность решения для точек вблизи дренажа даже при 2—3 шагах по времени, однако погрешность характеризуется отрицательным знаком. В целом схема с постепенным снижением напора на границе дренажа оказывается не столь

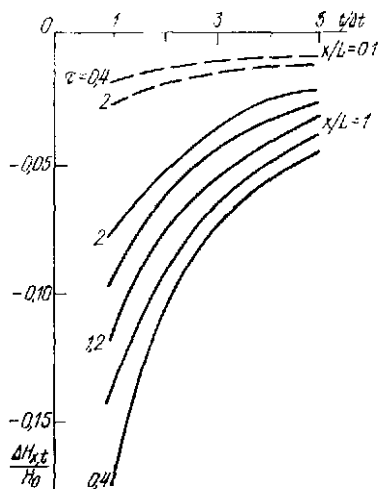


Рис. 4.2. Графики абсолютных приведенных погрешностей схемы Либманна при моделировании одномерного пласта с линейным изменением напора на границе дренажа.

благоприятной, как это представляется на первый взгляд (принимая во внимание монотонность изменения функции на границе). Этот вывод подтверждает тезис о недостаточной эффективности неявных схем для расчета полей с переменными граничными условиями, для которых явные схемы, позволяющие провести лучшим образом аппроксимацию условий на границе, оказываются более точными.

Как показали проведенные исследования схем с условиями второго рода на границе дренажа (постоянный расход), погрешности неявной схемы оказываются пропорциональными расходу, максимальным на непроницаемой внешней границе и существенно зависят от дискретности по времени.

Анализ погрешностей моделирования по неявной схеме свидетельствует о том, что параметры вида $a\Delta t/x^2$ или $a\Delta t/L^2$ не могут служить критериальными характеристиками этой схемы, однозначно определяющими погрешности моделируемой функции в различных точках пласта при различной дискретности процесса по времени.

Повышению точности получаемых по неявной схеме решений способствует неравномерная разбивка по времени. Согласно рекомендациям К. Раштона [49], эта разбивка может строиться на принципе логарифмического шага. Возможны и другие варианты прогрессирующего временного шага. Качественный анализ рассмотренных нами типовых схем показывает, что для схемы с «мгновенным» изменением напора на границе дренажа введение прогрессирующего шага позволяет существенно снизить погрешность; более сложные (немонотонные) граничные условия могут быть причиной возрастания погрешностей при переменном шаге по времени.

Специальные исследования были проведены [33] с целью оценки влияния на погрешности неявной схемы различной дискретности по пространству. Для схемы пласта, ограниченного непроницаемым контуром, абсолютные погрешности различны для вариантов деления области фильтрации на 10 элементов и 3 элемента, однако при делении области на 5 и 10 элементов разница в решениях не превышает технической погрешности моделирования (2 %) для различных расчетных моментов при любом числе шагов по времени (рис. 4.3). Отсюда следует важный практический вывод о том, что деление однородной области между границами более чем на 3 элемента с целью повышения точности решения нецелесообразно.

Неравномерность разбивки области фильтрации несущественно сказывается на погрешности, однако необходимо подчеркнуть, что этот вывод относится лишь к одномерным схемам, так как для двумерных неравномерность разбивки поля фильтрации существенно влияет на точность решения, причем максимальные погрешности фиксируются в области крупной разбивки и на границе перехода от крупной разбивки к мелкой.

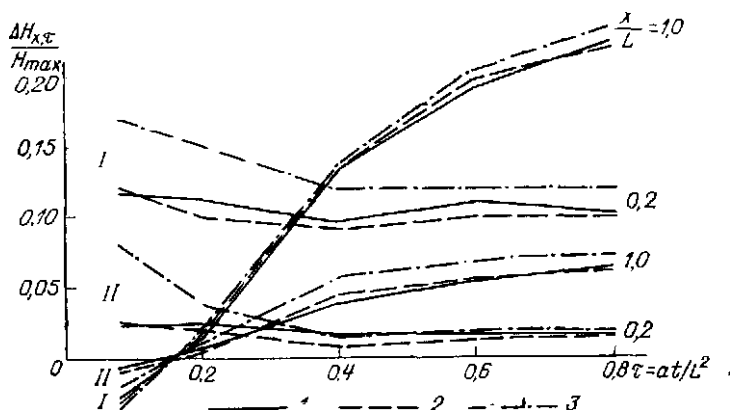


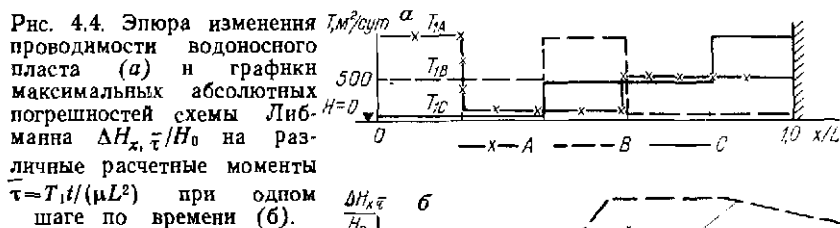
Рис. 4.3. Погрешности схемы Либманна при делении потока на 10 (1), 5 (2) и 3 элемента (3).

I — погрешности при одном шаге по времени; II — при трех шагах по времени.

Остановимся на вопросе о влиянии фильтрационной неоднородности на погрешности неявной схемы. Интегробалансовая форма конечно-разностных уравнений, реализуемая на математических моделях, должна положительно сказываться на точности решения, получаемого в условиях неоднородного поля.

Оценка влияния неоднородности на характер и значения погрешности моделирования проводилась на результатах решения тестовых задач, получаемых параллельно по схеме Либманна, на ЭВМ и на емкостных моделях. Тестовые задачи решались применительно к наиболее «жесткой» гидродинамической схеме одномерного пласта с непроницаемым внешним контуром и «мгновенным» снижением напора на границе дренажа. Варианты тестовых задач отличались различным соотношением проводимостей выделенных кусочно-однородных элементов; на рис. 4.4 представлены некоторые наиболее характерные варианты А, В и С сочетаний проводимостей T пласта с одинаковым значением водоотдачи μ по всей его длине.

Анализ результатов решения тестовых задач [33] свидетельствует о том, что погрешности неявной схемы зависят прежде всего от числа временных шагов и продолжительности расчетного периода (стадии процесса). Заметное изменение значений погрешностей наблюдается при переходе от одного элемента неоднородности к другому (см. рис. 4.4). Максимальные значения абсолютных приведенных погрешностей фиксируются в узловых точках, лежащих на непроницаемом контуре (внешней границе пласта) для любых сочетаний элементов неоднородности. Погрешности для различных вариантов неоднородности не имеют резкого различия, хотя для случая закономерно увеличивающейся проводимости имеется явная тенденция к воз-



растанию погрешности с увеличением продолжительности расчетного периода. В целом погрешности определяются числом шагов по времени, однако в отличие от условий однородного пласта погрешности для некоторых элементов неоднородного пласта снижаются значительно медленнее с увеличением числа шагов по времени (т. е. сходимость решения проявляется слабее).

Наиболее интересным представляется вывод о практической независимости погрешности сеточного решения от дискретности неоднородного пласта по пространству. Весьма близкие значения погрешностей фиксируются при делении области на 10—15 интервалов (до четырех интервалов на каждый элемент неоднородности) и на 3 интервала (по одному интервалу на однородный элемент). Моделирование пластов с резко выраженной неоднородностью (соотношение проводимостей 1:5 и 1:10), выполненное с равномерной разбивкой по пространству (при резком различии в фильтрационных сопротивлениях) и с неравномерной разбивкой по пространству (при равенстве всех фильтрационных сопротивлений), характеризуется при прочих равных условиях одинаковыми значениями погрешностей. Влияние границ резкой смены проводимости на погрешность конечно-разностной схемы аналогично влиянию внешних границ однородного пласта.

Таким образом, при использовании интегробалансовой схемы фильтрационная неоднородность не является фактором, который требует особого подхода к дискретности по пространству, однако узловые точки целесообразно располагать на границах зон неоднородностей. Наличие неоднородности предъявляет особые требования лишь к разбивке по времени, причем

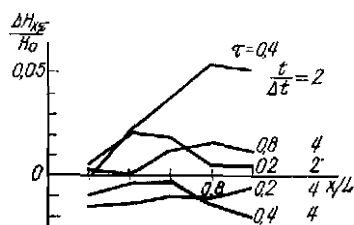
сложность анализа погрешностей в зависимости от дискретности по времени приводит к тому, что для рассматриваемого класса задач целесообразнее использовать методы моделирования, исключая влияние этого фактора, например моделирование на емкостных моделях или моделирование с использованием операционного метода.

Сопоставительный анализ неявных и явно-неявных конечно-разностных схем требует выявления конкретных погрешностей последних. Анализ погрешностей явно-неявных аппроксимаций показал, что явно-неявная схема (4.12) с различными значениями весового коэффициента σ для одномерного однородного напорного пласта, ограниченного непроницаемым контуром, при «мгновенном» снижении уровня на контуре дренажа характеризуется существенно меньшими погрешностями по сравнению с чисто неявной схемой. Проведенные на моделях исследования схемы (4.12) при различных значениях весового коэффициента показали, что погрешности явно-неявной схемы при прочих равных условиях оказываются пропорциональными отклонению σ от значения $\sigma=0,5$; приведенная абсолютная погрешность при пяти временных шагах изменяется от -5% при $\sigma=0,33$ до $+6\%$ при $\sigma=1$. Следовательно, оптимальным значением весового коэффициента при моделировании явно-неявных схем (4.12) следует считать $\sigma=0,5$ (схема Кранка — Николсона).

Для схемы с линейным изменением напора на границе дренажа явно-неявная аппроксимация (4.12) при $\sigma=0,5$ дает оптимальные результаты, причем погрешности оказываются существенно меньшими по сравнению с неявной схемой. Анализ погрешностей схемы (4.15) при $\sigma=0,5+\Delta x^2/(12a\Delta t)$ для условий ограниченного непроницаемым контуром пласта при «мгновенном» снижении напора на границе дренажа свидетельствует о том, что данная схема является наиболее рациональной. Абсолютные погрешности этой схемы не превышают 5% даже при двух шагах по времени и в основном лимитируются 2% для любой продолжительности расчетного периода τ и любых точек области фильтрации (рис. 4.5); эти погрешности оказываются в 2—3 раза ниже погрешностей неявной схемы. Относительные погрешности для рассматриваемой тестовой задачи не превышают $10\text{--}12\%$, поэтому схема (4.15) среди явно-неявных схем является наиболее выигрышной при моделировании линейных задач.

Среди явно-неявных схем известна схема, предложенная В. М. Шестаковым, основанная на чередовании явного и неявного шагов (приращение функции на явном шаге принимается равным приращению функции, полученному моделированием на неявном шаге). Исследования этой схемы для условий закрытого пласта позволяют считать, что схема с чередованием вполне приемлема для практического использования и оказывается выгодней схемы Либманна как по точности, так и по

Рис. 4.5. Графики погрешностей явно- неявной схемы со сложной структурой весового коэффициента.



трудоемкости. Однако ограничением применимости схемы с чередованием является требование монотонности изменения функции в пределах расчетного периода, что может быть обеспечено лишь при постоянстве условий на границах.

Проведенный анализ показывает, что при ограниченном числе шагов по времени явно-неявные схемы в целом по сравнению с неявной схемой характеризуются меньшими погрешностями. Вместе с тем практическое использование этих схем для моделирования фильтрационных задач на АВМ (в отличие от ЭВМ) осложняется необходимостью проведения дополнительных вычислительных операций и невозможностью проведения моделирования с неравномерным шагом по времени. Сопоставление недостатков явно-неявных схем и их положительных свойств приводит к выводу, что эти схемы применительно к электрическому моделированию не имеют исключительных преимуществ перед схемой Либманна.

Исследования погрешностей конечно-разностных схем позволяют предложить некоторые практические рекомендации. В частности, при оценке погрешностей моделирования двумерных полей фильтрации целесообразно предварительно выделить расчетные фрагменты (ленты тока), по которым можно провести анализ погрешностей, ориентируясь на результаты, полученные для типовых расчетных схем. Этот прием позволяет выбрать оптимальную по условиям решения задачи дискретность по времени. При наличии фильтрационной неоднородности при этом можно рекомендовать рассматривать однородную зону, примыкающую к контуру дренажа, в качестве пласта с непроницаемой внешней границей, если расчетная зона характеризуется большей проводимостью, чем смежная с ней. При обратном соотношении проводимостей для оценки погрешностей в пределах расчетной зоны можно использовать схему полуограниченного пласта. Разбивка двумерного поля фильтрации может проводиться исходя из требуемой детальности отражения на модели конфигурации его границ, элементов неоднородности, внутренних источников-стоков. Особого обоснования требует лишь неравномерная разбивка по пространству. Для снижения погрешностей неявной схемы целесообразна неравномерная разбивка по времени, однако эта рекомендация не распространяется на схемы с изменяющимися условиями на границах дренажа.

Как уже отмечалось, неполные конечно-разностные аналоги (не содержащие аппроксимации производных по времени) реализуются на емкостных и чисто резисторных моделях. Погрешности моделирования таких аналогов должны существенно отличаться от погрешностей моделирования конечно-разностных схем с аппроксимацией производной по времени.

Погрешности неполных конечно-разностных аналогов не имеют теоретической оценки, поэтому их анализ базируется на эмпирическом подходе.

Анализ специальных линейных тестовых задач, решенных на емкостных сеточных моделях с применением серийно выпускаемого интегратора ЭИМП 3/66, позволил выявить погрешности, связанные с технологическими особенностями моделирования конечно-разностной схемы (4.16). С этой целью рассмотрена типовая схема пласта, ограниченного непроницаемым контуром при «мгновенном» снижении напоров на границе дренажа. Варианты моделей отличались числом элементарных участков, на которые была разделена область фильтрации, и различным «разбросом» номиналов емкостей в пределах до $\pm 10\%$ от расчетного значения. Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

- при работе на моделях с конденсаторами широкого применения (разброс номиналов $\pm 10\%$ от паспортного значения) абсолютные погрешности не превышают $\pm 2\%$;

- погрешность конечно-разностной схемы соизмерима с технической погрешностью при минимальной дискретности области (3—5 элементов);

- моделирование на емкостных моделях обеспечивает максимальную точность решения линейных задач; эти решения могут рассматриваться как эталонные при оценке погрешностей электромоделирования других конечно-разностных схем.

Погрешности решения задач на интеграторе ЭИМП 3/66 с условиями второго рода на границе дренажа оказываются довольно высокими. Эти погрешности определяются в основном конструктивными особенностями блока условий второго рода этого интегратора, который обеспечивает необходимую точность лишь при лимитированной скорости временной развертки. В частности, абсолютные погрешности при моделировании осесимметричного потока не превышает 1% при времени моделирования более $0,002$ с. При скорости развертки $0,001$ с абсолютные погрешности при тех же условиях (область разбивалась на 6 элементов) достигают $7-8\%$ и резко увеличиваются при большой скорости.

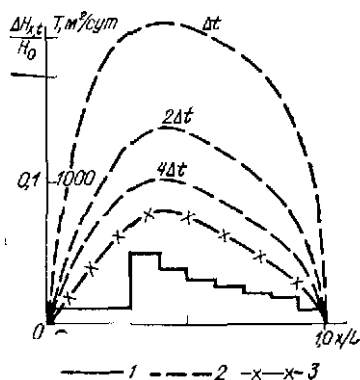
Для оценки погрешностей моделирования по емкостной схеме двумерных кусочно-однородных полей проведено сопоставление результатов электромоделирования и решения на ЭВМ при одинаковой разбивке поля (на ЭВМ реализовалась явно-неявная схема методом продольно-поперечной прогонки [40] при нескольких сотнях временных шагов)*. Поле фильтрации представлено двумя зонами с проводимостями $T_1=500$ м²/сут и $T_2=50$ м²/сут и водоотдачей $\mu_1=0,05$ и $\mu_2=0,001$; внешние границы представлены непроницаемым контуром, внутренние границы дренажа — скважинами. Результаты сопоставления решений, полученных на емкостной модели и ЭВМ, свидетельствуют о том, что максимальное их различие составляет 5% при заданном напоре в скважинах и $10-15\%$ при заданном расходе.

Исследования точности реализованного на электрических моделях операционного метода проведены применительно к анализу погрешностей метода «трех t_p », предложенного В. А. Ми-

* Моделирование на ЭВМ проведено Ф. П. Стрельским.

Рис. 4.6. Графики абсолютных приведенных погрешностей $\Delta H_{x,t}/H_0$ моделирования неоднородного пласта.

1 — эпюра распределения проводимости пласта T ; 2 — погрешности при моделировании по схеме Либманна (при одном, двух и четырех шагах по времени); 3 — погрешности моделирования с использованием операционного метода.



роненко [8, 22]. Решение основной тестовой задачи (однородный пласт, ограниченный непроницаемым контуром, мгновенное снижение напора на контуре дренажа) показало, что абсолютные приведенные погрешности в наиболее неблагоприятных для моделирования условиях не превышают 4 % по всей области фильтрации, разделенной на 5 и 10 элементов, и в малой степени зависят от продолжительности расчетного периода. Заметим, что моделирование по схеме Либманна для этих же условий при трех шагах по времени характеризуется абсолютными погрешностями, достигающими 10 %.

Неблагоприятными условиями для реализации операционного метода на электрической модели являются малые значения понижений, сопоставимые с технической погрешностью, что существенно снижает точность последующего расчета искомой функции [22]. Фильтрационная неоднородность сравнительно слабо влияет на погрешность для неоднородного пласта при соотношениях проводимостей отдельных зон, достигающих 1 : 5; абсолютные погрешности соответствуют погрешностям при пяти шагах по схеме Либманна и ограничиваются 10—15 %. При менее выраженной неоднородности операционный метод дает лучшие результаты (рис. 4.6). Проведенные исследования метода «трех t_p » с учетом перетекания через слабопроницаемый слой свидетельствуют о том, что абсолютные приведенные погрешности и в этом случае соизмеримы с техническими погрешностями моделирования (1—2 %) и лишь при малых понижениях в начальные периоды процесса достигают 3—5 % [8].

Таким образом, операционный метод имеет существенное преимущество перед схемой Либманна по точности получаемого на сеточной модели результата. Очевидно, что при переменных граничных условиях операционный метод имеет весомые преимущества как перед емкостными схемами, так и перед схемой Либманна. Тем не менее нужно отметить, что использование операционного метода для решения на ЭВМ и АВМ практических прогнозных задач в ряде случаев может приводить к погрешностям, обусловленным нарушением некоторых ограниче-

ний его применимости. В частности, погрешности могут возникать из-за нестационарности процесса фильтрации в начальный расчетный момент времени, что является довольно характерной ситуацией при прогнозировании техногенного режима подземных вод (исходя из неполной, как правило, информации о начальных стадиях развития последнего).

Необходимость выполнения требования о монотонном изменении функции напора во времени (т. е. об одновременности ввода источников возбуждения пласта) в совокупности с ограничением круга рассматриваемых задач линейными уравнениями ощутимо сокращают область применения операционного метода при решении практических задач, связанных с прогнозом режима подземных вод, нарушаемого при эксплуатации шахт и карьеров.

4.4. Особенности вычислительной схематизации при прогнозировании на электрических моделях сложных гидродинамических процессов

Несмотря на интенсивное развитие и практическое внедрение методов численного моделирования процессов фильтрации, электромоделирование остается пока эффективным инструментом и методом гидрогеологических исследований. Поэтому полезно рассмотреть некоторые приемы электромоделирования сложных гидродинамических схем, которые не нашли должного отражения в специальной литературе. В целом развитие вычислительной схематизации, на которой базируется электромоделирование фильтрации, целесообразно ориентировать по двум основным направлениям:

- разработка и обоснование упрощенных приемов анализа потоков сложной структуры;
- совершенствование методики моделирования нелинейных нестационарных процессов.

Опыт изучения и прогноза техногенного режима позволяет предложить ряд рекомендаций, направленных на совершенствование методики моделирования в этих направлениях. Дальнейшее внедрение методов аналогового моделирования в практику гидрогеологических прогнозов заметно сдерживается дефицитом серийно выпускаемых сеточных электронинтеграторов и их высокой стоимостью. Между тем анализ двумерных полей фильтрации при прогнозных оценках техногенного режима подземных вод может быть с успехом выполнен на основе комбинирования моделирования в простейших постановках с аналитическими методами расчета.

Простейшие электронинтеграторы (типа ЭГДА 9/60) могут быть использованы для построения гидродинамической сетки; дальнейший анализ двумерных полей возможен при их фрагментировании — выделении расчетных лент тока. При этом рассмотрение фильтрационной задачи сводится к моделированию

потока по выделенным лентам либо к аналитическому расчету, методика которого применительно к стационарной фильтрации достаточно детально разработана [21, 46].

Расчет расхода по ленте тока может быть эффективно выполнен (после предварительного определения сопротивления модели этой ленты из электропроводной бумаги) по зависимости

$$Q_{\text{л}} = \frac{\Delta\varphi}{R_{\text{л}} m_{\Phi}}, \quad (4.22)$$

где $\Delta\varphi$ — разность потенциальных функций на контурах питания и дренажа ленты; $R_{\text{л}}$ — электрическое сопротивление ленты; $m_{\Phi} = 1/(T\rho)$ — масштаб сопротивлений; ρ — сопротивление квадрата бумаги; T — проводимость водоносного горизонта в пределах ленты.

Расчет плановой нестационарной фильтрации по лентам тока может быть произведен в соответствии с принципом их недеформируемости [21]. Согласно этому принципу, сформулированному С. Н. Нумеровым, линии тока планового нестационарного потока сравнительно мало меняют свою конфигурацию в течение расчетного периода, так как структура потока определяется взаимным расположением и конфигурацией внешних границ пласта. Проведенные оценки погрешностей, вносимых предпосылкой о недеформируемости линий тока, свидетельствуют о том, что для довольно неблагоприятных случаев абсолютные погрешности в напорах не превышают 4—8 % [8].

Точность расчета можно в принципе повысить, если построение лент производить для нескольких моментов времени. Правомерность предпосылки о недеформируемости лент тока позволяет свести задачу плановой неустановившейся фильтрации к расчету потока в пределах каждой из выделенных лент тока. Такой расчет может быть осуществлен аналитически на основе идеи о расчетном радиусе влияния при неустановившейся фильтрации $R_{\text{н}}$, не имеющем физического смысла и являющемся фиктивным параметром, который, будучи подставленным в расчетные зависимости для установившегося режима, дает возможность получить значение расхода. Радиус $R_{\text{н}}$ для полуограниченного пласта вычисляется по формуле (3.27). Для ограниченных пластов с мгновенным снижением напора на контуре дренажа $R_{\text{н}}$ определяется по следующим зависимостям:

а) для пласта, ограниченного внешним контуром питания с постоянным напором,

$$R_{\text{н}} = \frac{R^*}{1 + S_q(\tau)}, \quad (4.23)$$

где R^* — расстояние до внешнего контура; $S_q(\tau)$ — табулированная функция [46];

б) для пласта, ограниченного внешним непроницаемым контуром,

$$R_n = \frac{R^*}{T_q(\tau)}, \quad (4.24)$$

где $T_q(\tau)$ — табулированная функция (см. рис. 5.4).

Несмотря на то что расчет расходов с использованием идеи о недеформируемости лент тока и о радиусе влияния при неустановившейся фильтрации является приближенным приемом, последний дает вполне удовлетворительные результаты при решении прогнозных задач.

Для расчета напоров в пределах ленты тока приходится прибегать к моделированию. Расчетная лента тока делится предварительно по изопьезам на ряд фрагментов (с одинаковыми фильтрационными сопротивлениями) и моделируется цепочкой сопротивлений R_x с временными сопротивлениями R_t , соотношение которых определяется по зависимости

$$\frac{R_t}{R_x} = \frac{a \Delta t}{(l_{i-1} + l_{i+1})^2}, \quad (4.25)$$

где l_{i-1} и l_{i+1} — расстояния между изопьезами по ленте тока; a — коэффициент пьезопроводности; Δt — шаг по времени.

Моделирование необходимо использовать также для учета фильтрационной неоднородности в пределах ленты и нелинейности процесса; в последнем случае модель ленты должна быть представлена переменными резисторами.

Моделирование по ленте тока можно проводить на одномерных RC-цепочках, однако в этом случае технология моделирования усложняется за счет необходимости применения различных по номиналам конденсаторов (емкости пропорциональны площади каждого из разновеликих фрагментов ленты). Эта трудность может быть преодолена, если лента будет разбита на равновеликие фрагменты.

После определения напоров по каждой из лент тока необходимо провести «сшивание» всех лент для получения плановой картины на расчетный момент. В этом случае практически всегда фиксируется несоответствие в напорах по смежным фрагментам соседних лент тока. Ситуация может быть существенно улучшена за счет периодической «прогонки» решения по направлениям, перпендикулярным к линиям тока, аналогично тому, как это предусматривается методом переменных направлений [40]. В отличие от последнего прогонка поперек линий тока может производиться не на каждом временном шаге, а через несколько шагов, что снижает трудоемкость моделирования. Прогонка поперек линий тока осуществляется на цепочках сопротивлений, отвечающих фильтрационным сопротивлениям между смежными узловыми точками соседних лент тока; временные сопротивления соответствуют продолжительности расчетного периода между двумя последующими прогонками поперек линий тока.

Сочетание аналитического расчета притоков по лентам тока с аналоговым моделированием позволяет в некоторых случаях существенно повысить эффективность решения прогнозных задач. Например, при рассмотрении напорно-безнапорного режима фильтрации на модели может воспроизводиться лишь безнапорная зона (с дренажными сооружениями), а расходы, поступающие из напорной зоны, могут определяться расчетом на каждый временной шаг и учитываться при моделировании.

Рассмотрим особенности применения метода переменных направлений с учетом возможности его реализации на электрических моделях. Решение задачи по определению функции напора на расчетный момент времени в пределах двумерного поля фильтрации согласно этому методу сводится к решению серии одномерных задач. Предварительно двумерное поле фрагментируется ортогональной прямолинейной или криволинейной сеткой, в результате чего фрагменты образуют систему строк (по оси Ox) и столбцов (по оси Oy). Искомые значения сеточной функции в расчетной точке поля получаются путем сложения решений, полученных на пересечении соответствующей строки и столбца. Исходными данными (начальными условиями) для получения решения по столбцам служат результаты предыдущей прогонки по строкам. Реализация метода переменных направлений на ЭВМ обычно основана на чередовании применения явной и неявной схем при прогонке по столбцам и строкам, что обеспечивает устойчивость вычислений наряду с равномерной сходимостью решения. На ЭВМ возможно использование и неявной схемы в рамках ADI-метода [49]. Принцип декомпозиционного решения задачи может реализовываться на основе схемы Либманна на цепочках электрических сопротивлений, соответствующих расчетным столбцам и строкам. В этом случае цепочки сопротивлений рассчитываются как обычно исходя из фильтрационных сопротивлений отдельных фрагментов по столбцам и строкам, а временные сопротивления соответствуют принятому шагу по времени.

Реализация внутренних источников-стоков на каждой из цепочек, соответствующих направлениям по строкам и столбцам, исходит из интенсивности расхода $Q/2$ (при равномерной разбивке по ортогональным направлениям и однородности участка фильтрационного поля вблизи источника с интенсивностью Q). Соответственно дополнительные сопротивления R_0 , учитывающие осесимметричный характер потока вблизи скважин или их несовершенство, назначаются равными $2R_0$ для получения решения по каждому из направлений. Применение неявной схемы Либманна обеспечивает устойчивость счета, что исключает необходимость лимитирования шага по времени.

Проведенное электромоделирование тестовых задач методом переменных направлений свидетельствует о том, что результаты трехкратной прогонки по строкам и столбцам практически

эквивалентны результатам, полученным тривиальным моделированием всего двумерного поля по схеме Либманна тремя шагами по времени: расхождения в решениях не превышают технической погрешности моделирования. В качестве примера на рис. 4.7 приведены результаты решения задачи с условиями первого рода на границах прямоугольного участка при «мгновенном» подъеме напоров на всех границах (начальное распределение напоров $H=0$). Соотношение параметров выбрано таким образом, что $R_l/R_x = a\Delta t/\Delta x^2 = 1$.

Использование нерегулярной ортогональной криволинейной разбивки, которой является гидродинамическая сетка, позволяет существенно повысить точность решения, получаемого методом переменных направлений, за счет рациональной разбивки области вблизи границ сложной конфигурации, в частности вблизи внутренних границ, представленных горными и дренажными выработками. Криволинейная разбивка в принципе может быть произвольным образом ориентирована по отношению к основному направлению линий тока, так как для обеспечения удовлетворительной точности решения, получаемого методом переменных направлений, необходима лишь ортогональность этой разбивки. Электромоделирование при решении плановых задач по этой методике выполняет две функции: используется для построения сетки движения на электропроводной бумаге, а затем для решения плановой задачи по лентам тока или методом переменных направлений на цепочках сопротивлений.

Совершенствование методики моделирования нелинейных задач связано прежде всего со снижением трудоемкости модельных операций. Нелинейность первого рода (по проводимости) учитывается обычно при моделировании по схеме Либ-

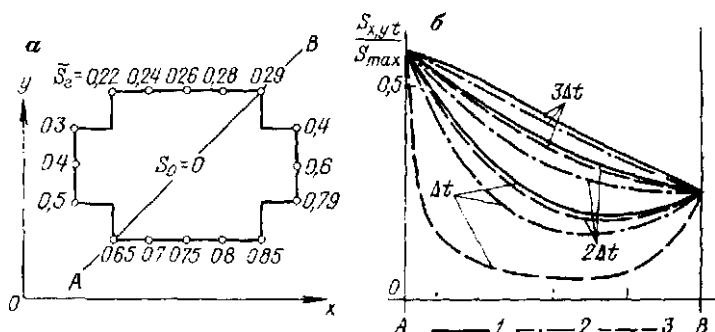


Рис. 4.7 Результаты электрического моделирования двумерного поля фильтрации методом переменных направлений.

a — поле фильтрации с граничными \bar{S}_r и начальными S_0 условиями; *б* — профиль по линии *AB*.

1 и *2* — решения, полученные методом переменных направлений при прогонке по осям *Ox* и *Oy*, *3* — решение, полученное по схеме Либманна на двумерной модели (одним, двумя и тремя шагами по времени).

манна изменением от шага к шагу сопротивлений сетки модели. В частном случае, при анализе однородного безнапорного потока на горизонтальном водоупоре, нелинейность можно учитывать изменением временных сопротивлений согласно зависимости [41]

$$R_t = \frac{\Delta t h_t}{\Delta x \Delta y \mu m_\phi}, \quad (5.26)$$

где h_t — глубина потока на расчетный момент; Δt — шаг по времени; μ — водоотдача в пределах блока с размерами Δx , Δy ; m_ϕ — масштаб сопротивлений.

В этом варианте моделирование производится с потенциальной функцией $0,5h^2$.

В общем случае изменение сопротивлений сетки модели обеспечивает учет любой неоднородности осушаемой толщи. Изменение параметров модели можно производить исходя из характеристик потока на предыдущем шаге по времени или осуществлять подбор (итерацию) сопротивлений на каждом шаге по времени. Итерации позволяют существенно сократить количество временных шагов при обеспечении удовлетворительной точности искомого решения. Наиболее целесообразно проведение итераций при электромоделировании в отличие от моделирования на ЭВМ, при котором итерации могут быть заменены более дробным делением расчетного периода без усложнения алгоритма программы.

Целью итераций является обеспечение на расчетный момент времени соответствия между напорами и проводимостью потока. Оптимальная итерация должна быть рекуррентным процессом, т. е. каждое последующее приближение должно дать более точный результат, чем предыдущее. Между тем итеративный процесс может быть организован по-разному, и в зависимости от этого точность получаемого решения оказывается различной. Исследования эффективности итераций проводились ранее для частных фильтрационных, теплофизических и электрофизических задач. В частности, известны интересные результаты решения нелинейной задачи с применением метода Беггстина, который обеспечивает быструю сходимость итерационного процесса.

При одинаковом числе временных шагов погрешности моделирования нелинейных задач оказываются заметно выше погрешностей решения линейных задач, поэтому в общем случае моделирование нелинейных задач с итерациями связано с повышенной трудоемкостью. Трудоемкость итераций при решении нелинейных задач по схеме Либманна может быть снижена за счет некоторых технических усовершенствований. На рис. 4.8 изображена принципиальная схема устройства, разработанного автором и апробированного при решении ряда тестовых и практических прогнозных задач, связанных с рассмотрением профильно-однородных безнапорных потоков. Устройство служит

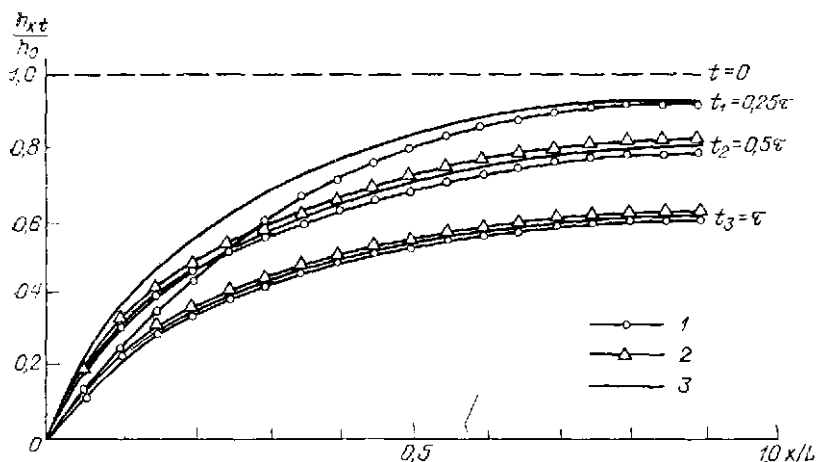


Рис. 4.9. Результаты моделирования процесса осушения безнапорного водоносного пласта на горизонтальном водоупоре (в нелинейной постановке). 1 — на емкостной электрической модели ($\Delta t = 0.25 \tau$); 2 — по схеме Либманна ($\Delta t = -0.1 \tau$); 3 — на ЭВМ (200 шагов).

Решение нелинейных задач на емкостных моделях представляется более эффективным по сравнению с моделированием по схеме Либманна, так как число операций на модели сокращается в 3—4 раза при практически одинаковой точности решения. При учете нескольких видов нелинейности схема Либманна представляется все же более предпочтительной.

Нелинейность первого рода, связанная с изменением водоотдачи напорно-безнапорного водоносного горизонта, не привносит принципиальных сложностей в моделирование по схеме Либманна, однако трудоемкость последней повышается за счет итеративного определения положения границы раздела напорной и безнапорной зон. Решение таких задач на емкостных моделях позволяет исключить итеративные операции за счет применения полупроводниковой схемы, реализующей подключение конденсаторов к узловым точкам емкостной модели в момент достижения в этих точках соответствующего потенциала. Для задач напорно-безнапорной фильтрации удовлетворительные результаты дает схема, основанная на применении стабилизаторов.

Относительная дефицитность диодов и стабилизаторов определяет технические особенности методики моделирования: эти элементы целесообразно подключать к узловым точкам, тянущим к границе раздела напорной и безнапорной зон, и разбивать прогнозируемый период на несколько интервалов для перебора модели по мере движения границы раздела напорной и безнапорной зон.

Совместное проявление нелинейности первого и второго рода, характерное для схемы «истощения» безнапорного потока на наклонном водоупоре [31], существенно осложняет мо-

делирование и является причиной повышенных погрешностей. Как показали результаты специальных тестов, погрешности решения таких нелинейных задач по неявной схеме могут быть снижены за счет проведения 3—4 итераций на каждом шаге по времени. Удовлетворительные результаты дает решение этих задач в нелинейной постановке на емкостных моделях [31].

Моделирование безнапорных однородных горизонтов на наклонном водоупоре целесообразно проводить в потенциальных функциях глубины (мощности) потока. В этом варианте может быть реализована [31] эффективная схема решения уравнений (4.6) или (4.6а), которые заменяются следующей системой конечно-разностных аналогов:

$$\left\{ \begin{aligned} kh_{0,t} \sum_{i=1}^{i=2} \frac{\varphi_{i,t} - \varphi_{0,t}}{\Delta x} &= \mu \Delta x \frac{\varphi_{0,t} - \varphi_{0,t-\Delta t}}{\Delta t}; \\ \varphi'_{i,t} &= \varphi_{i,t} + \frac{ki\Delta t}{\mu \Delta x} (\varphi_{i+1,t} - \varphi_{i,t}), \end{aligned} \right. \quad (4.27)$$

где $\varphi = h$ для уравнения (4.6) и $\varphi = 0,5 h^2$ для уравнения (4.6а).

Решение системы (4.27) осуществляется по схеме «расщепления» [31]: по схеме Либманна решается первое уравнение, а затем по явной схеме — второе (исходя из результатов первого решения). На каждом временном шаге эти операции чередуются. Погрешности такой схемы соизмеримы с техническими погрешностями моделирования.

При наличии инфильтрационного питания безнапорных потоков на наклонном водоупоре моделирование целесообразно проводить согласно уравнению [17]

$$T_t \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \Delta T_t \frac{\partial^2 H^0}{\partial x^2} = \mu \frac{\partial S}{\partial t}, \quad (4.28)$$

где T_t — проводимость на расчетный момент времени; $\Delta T_t = T^0 - T_t$ (T^0 — проводимость естественного потока с напорами H^0).

Уравнение (4.28), представленное в конечно-разностной форме, может быть решено по схеме Либманна с подачей в каждую узловую точку сеточной модели силы тока, соответствующей $\Delta T_t \frac{\partial^2 H^0}{\partial x^2}$.

Конечно-разностный аналог уравнения (4.28) может быть представлен в виде системы

$$\left\{ \begin{aligned} T_t \sum_{i=1}^{i=2} \frac{S_{i,t} - S_{0,t}}{\Delta x} &= \mu \frac{S'_{0,t} - S_{0,t-\Delta t}}{\Delta t} \Delta x; \\ \Delta T_t \sum_{i=1}^{i=2} \frac{H^0_0 - H^0_i}{\Delta x} &= \mu \frac{S''_{0,t} - S_{0,t-\Delta t}}{\Delta t} \Delta x. \end{aligned} \right. \quad (4.29)$$

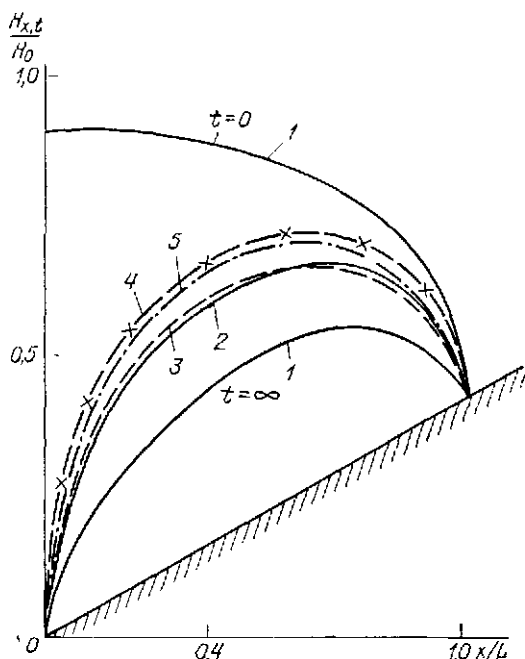


Рис 4.10 Результаты моделирования процесса осушения безнапорного потока на наклонном водоупоре с учетом инфильтрационного питания.

1 — стационарное положение уровней на начальный ($t=0$) и конечный ($t=\infty$) момент времени, 2 — эталонное решение с непосредственным учетом инфильтрации и нелинейности процесса, 3 — моделирование по схеме (4.28), 4 — моделирование в понижениях с учетом изменения проводимости потока; 5 — решение по схеме с «расщеплением» (4.29)

На модели по схеме Либманна решается первое из уравнений системы (4.29) с подбором проводимости T_t , затем аналитически решается второе уравнение и вычисляется понижение на расчетном шаге $S_{0,t} = S'_{0,t} + S''_{0,t}$. Эффективность моделирования по этой схеме иллюстрируется рис. 4.10.

Уравнение (4.6) можно реализовать на емкостных моделях по методу, применяемому в задачах теплопереноса для учета подвижной границы. Путем подстановки $h(x, t) = v(x) \omega(x, t)$ (где $v(x) = e^{-\frac{k_1 x}{\mu}}$) уравнение (4.6) приводится к виду

$$a \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - \left(\frac{k_1}{\mu} \right)^2 \frac{\omega}{4a} = \frac{\partial \omega}{\partial t}, \quad (4.30)$$

Уравнение (4.30) моделируется емкостной моделью, содержащей кроме конденсаторов C (соответствующих емкостным свойствам горизонта) конденсаторы C_0 , последовательно вклю-

ченные в цепь сетки модели. Уравнение переходного процесса на модели записывается в виде

$$\sum_{i=1}^{i=2} \frac{U_i - U_0}{R_x} - \frac{CU_0}{C_0} = C \frac{\partial U}{\partial t}. \quad (4.31)$$

Масштабные соотношения для (4.31) равны

$$m_t = \frac{\Delta x^2}{2R_x C}; \quad \frac{C}{C_0} = \frac{i\Delta x^2}{4h^2}. \quad (4.32)$$

Можно отметить, что эта схема дает удовлетворительные результаты при моделировании региональных потоков.

В целом выбор схемы при анализе каждой нелинейной задачи зависит от специфики последней и определяется требованиями к точности прогноза.

5. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ТЕХНОГЕННЫМ РЕЖИМОМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Анализ режимных наблюдений начинают обычно с оценки структуры потока по измеренным напорам, с определения направления потоков подземных вод, соотношения напоров отдельных водоносных пластов. Анализ уровневого режима позволяет в значительной степени уточнить гидрогеологическую структуру водоносных комплексов, выделить водоносные пласты и относительные водоупоры, оценить на качественном уровне фильтрационную неоднородность в плане. Кроме того, анализ распределения напоров в плане и в разрезе в увязке с геологической и гидрологической информацией дает возможность детализировать представление о границах питания и разгрузки подземных вод.

Оценка изменений напоров водоносных горизонтов в годовом и многолетнем цикле дает возможность оценить роль атмосферных осадков в инфильтрационном питании подземных вод, дает представление о степени нестационарности их режима.

Первый этап интерпретации режимных наблюдений заканчивается формулировкой расчетной гидродинамической схемы, дальнейшая конкретизация которой заключается в определении фильтрационных параметров, характеристик питания и взаимосвязи водоносных горизонтов по результатам измерений их напоров и расходов на фиксированных границах разгрузки.

С максимальной достоверностью гидрогеологические параметры могут быть определены по результатам наблюдений за режимом подземных вод в период строительства и эксплуатации горнодобывающих предприятий. Методические приемы определения тех или иных гидрогеологических параметров зависят от того, в рамках какой гидродинамической схемы производится анализ исходных данных. Поэтому методику определения параметров целесообразно рассматривать, ориентируясь на выделенные ранее основные расчетные схемы, отражающие особенности техногенного режима. Методические вопросы оценки гидрогеологических параметров целесообразно рассматривать в рамках каждой расчетной схемы в порядке постепенного усложнения методических приемов, что, как правило, отвечает соответствующему увеличению объема информации о нарушенном режиме. При ограниченном объеме информации методи-

ческие приемы должны быть направлены на оценку осредненных или ориентировочных гидрогеологических параметров, отражающих общие закономерности анализируемых фильтрационных процессов. Применение сложных методических приемов интерпретации результатов натурных наблюдений (в частности, использование математического моделирования) может быть оправданно лишь при детальном освещении объекта. Предлагаемые ниже рекомендации по оценке гидрогеологических параметров изложены с учетом этих моментов.

5.1. Определение проводимости изолированных водоносных пластов при установившемся режиме фильтрации

Проводимость водоносных пластов оценивается в рамках стационарных (квазистационарных) расчетных схем при известных расходах и градиентах напора подземных потоков. В общем случае параметры проводимости следует определять по выделенным лентам тока с фиксированными (измеренными в натуре) расходами и напорами после проверки квазистационарности расчетной схемы по соответствующим критериям.

Расчетная зависимость для определения проводимости по ленте тока (рис. 5.1) имеет вид

$$T_i = \frac{Q_n L_i}{\Delta H_i B_i}, \quad (5.1)$$

где T_i — проводимость расчетного фрагмента ленты (или всей ленты, рассматриваемой как единый однородный фрагмент); Q_n — расход в пределах ленты (зафиксированный на контуре ее дренажа); L_i и B_i — длина и ширина фрагмента (либо всей ленты); ΔH_i — разность напоров на границах фрагмента (либо на внешней и внутренней границах ленты).

Границы фрагментов следует устанавливать по положению пьезометров для ограничения погрешностей, связанных с интерполяцией измеренных значений напоров. Таким образом, при известных напорах, зафиксированных в нескольких точках по оси ленты, зависимость (5.1) дает возможность определить проводимость отдельных ее фрагментов, т. е. оценить изменчивость проводимости пласта в пределах ленты. Принимая во внимание возможные погрешности рассчитанных параметров

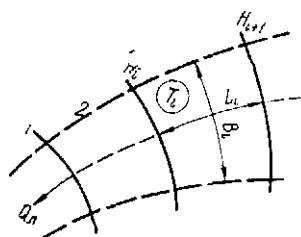


Рис. 5.1. Схема ленты тока.

1 — линии равных напоров H_i (пьезоизогипсы); 2 — линии тока.

(связанные, в частности, с построением лент тока), целесообразно проводить осреднение параметров по ленте (либо по ряду смежных лент) при близких их значениях.

Вместе с тем фильтрационная неоднородность, выявленная в результате расчета проводимости по лентам тока, должна в любом варианте анализироваться с привлечением геологической, геофизической и другой информации. Следует отметить, что закономерное увеличение рассчитанных значений параметра проводимости вдоль ленты от контура дренажа к внешней ее границе может служить признаком несоответствия принятой расчетной схемы реальным условиям. Если подобная закономерность не увязывается с геологическими особенностями участка, то причиной ее может быть либо наличие питания по площади дренируемого горизонта (за счет инфильтрации или перетекания из смежного пласта), либо нестационарность режима фильтрации.

Применение электрического моделирования при определении проводимости целесообразно в связи с оценкой этого параметра по лентам сложной конфигурации, для которых трудно определить их средние геометрические характеристики.

После измерения электрического сопротивления вырезанной из электропроводной бумаги ленты расчет проводимости производится по зависимости

$$T_{\pi} = \frac{Q_{\pi} R}{\Delta H_{\pi} \rho}, \quad (5.2)$$

где R — электрическое сопротивление ленты; ρ — сопротивление квадрата электропроводной бумаги.

Моделирование оказывается целесообразным также для оценки средней проводимости водоносного пласта, дренируемого группой скважин или горных выработок. В этом случае можно рекомендовать следующий порядок моделирования:

- на внешней границе модели произвольно задается напряжение V_0 , соответствующее известному напору H_0 на контуре питания пласта;

- на внутренних границах (скважинах, выработках) задаются токи I_i , пропорциональные известным расходам Q_i ;

- в точках модели, соответствующих положению пьезометров с известными напорами H_n , фиксируются напряжения V_n .

Средняя проводимость пласта определяется по зависимости

$$T = \frac{Q_i}{I_i R n} \sum_1^n \frac{V_0 - V_n}{H_0 - H_n}, \quad (5.3)$$

где R — сопротивление сеточной модели, соответствующее квадратному элементарному участку, или сопротивление квадрата электропроводной бумаги ($R = \rho$).

Величины H_n и Q_i целесообразно представить с весовыми коэффициентами (от 1 до 0), отражающими достоверность этой информации.

При анализе стационарного режима нередко приходится определять условия взаимосвязи подземных вод с поверхностными водоемами и водотоками. В частности, фильтрационные характеристики ложа водотоков (водоемов) могут определяться при расчете проводимости граничного фрагмента соответствующей ленты тока (групп лент). При отсутствии данных о распределении расхода потока по лентам сопротивление ложа водоема или водотока можно охарактеризовать обобщенным параметром ΔL , т. е. эквивалентным расстоянием, на которое нужно фиктивно отодвинуть линию действительного уреза воды от контура дренажа или питания при прогнозных оценках. Согласно известным рекомендациям [21, 46], для определения этого параметра необходимо иметь два пьезометра в створе, перпендикулярном к урезу воды в реке или водоеме; первый из них на расстоянии l_1 от уреза (оно должно быть не меньше мощности водоносного горизонта), а второй на расстоянии l_2 от уреза. Сопротивление ложа реки или водоема определяется по зависимости

$$\Delta L = \frac{H_1 - H_0}{H_2 - H_1} (l_2 - l_1) - l_1, \quad (5.4)$$

где H_0 , H_1 и H_2 — напоры, соответствующие уровню в реке и в пьезометрах.

Сопротивление ложа реки целесообразно определять для периода межени. Квазистационарность расчетной схемы при этом может контролироваться критерием

$$\frac{T \Delta t}{\mu (\Delta L + l_2)^2} > 0,3, \quad (5.5)$$

где T — независимое определение проводимости водоносного горизонта; Δt — продолжительность периода между расчетным моментом и моментом подъема уровня в реке; μ — расчетная водоотдача пород (максимальное значение в пределах рассматриваемого створа).

При сложной конфигурации контура реки обработка результатов наблюдений по пьезометрам требует привлечения моделирования.

5.2. Оценка фильтрационных параметров, определяющих закономерности нестационарного режима подземных вод

Интерпретацию результатов режимных наблюдений полезно начинать с оценки осредненной водоотдачи изучаемого горизонта, которая рассчитывается по зависимости

$$\mu_{ср} = W_{в}/W_{д}, \quad (5.6)$$

где $W_{в}$ — суммарный объем воды, отобранный за расчетный период из водоносного горизонта, не имеющего внешних источ-

ников питания (т. е. сработавшая часть естественных запасов); W_d — объем пород, сдвинутых за расчетный период (в случае дренирования напорного пласта этот объем соответствует разности напоров на начало и конец периода).

Средняя водоотдача в дальнейшем может быть использована для контроля результатов, полученных более сложными приемами при дифференцированной оценке параметра водоотдачи и проводимости по площади дренируемого горизонта.

При наличии данных о темпах снижения напоров (уровней) дренируемого водоносного горизонта возможно определение его коэффициента пьезопроводности (уровнепроводности). Расчет коэффициентов пьезопроводности целесообразно проводить по лентам тока, построенным на расчетный период, в течение которого конфигурация лент в плане мало изменяется. При наличии в пределах расчетной ленты единичных пьезометров расчет коэффициентов пьезопроводности целесообразно вести по аналитическим зависимостям, учитывающим структуру потока (конфигурацию ленты) и граничные условия.

В частности, простейшим граничным условием можно считать «мгновенное» снижение напоров на контуре дренажа (на контуре горных выработок, контурах водопонижающих скважин). В этом случае по лентам тока, конфигурация которых близка к сектору, коэффициент пьезопроводности a может быть определен по зависимости (3.42).

По лентам тока, близким по форме к одномерным плоским, расчет коэффициента пьезопроводности может быть произведен по формуле

$$a = \left(\frac{x}{1 - S_{x,t}/S_k} \right)^2 / (4t), \quad (5.7)$$

где $S_{x,t}$ — понижение напора на момент t в пьезометре, расположенном на расстоянии x от контура дренажа; t — продолжительность расчетного периода (от момента «мгновенного» снижения напора на контуре дренажа на S_k).

Формула (5.7) справедлива при выполнении условия $x/(2\sqrt{at}) = \lambda < 0,8$. Более строго коэффициент пьезопроводности для этой расчетной схемы можно определить по зависимости

$$S_{x,t}/S_k = 1 - \Phi(\lambda), \quad (5.8)$$

где $\Phi(\lambda)$ — интеграл вероятности (рис. 5.2).

При наличии в пределах расчетной ленты не менее трех точек наблюдений за изменениями напоров (пьезометров) определение коэффициента пьезопроводности может быть проведено на основе

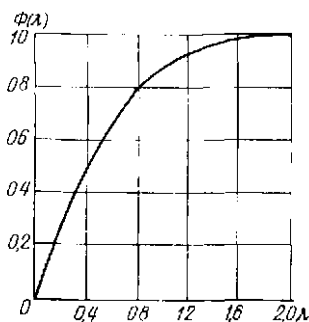


Рис. 5.2. График функции $\Phi(\lambda)$.

конечно-разностного принципа, согласно которому можно записать следующее балансовое уравнение для расчетного периода времени:

$$T_{1-2} \frac{(H_2 - H_1) B_{1-2}}{L_{1-2}} - T_{2-3} \frac{(H_3 - H_2) B_{2-3}}{L_{2-3}} = \\ = \mu \frac{\Delta H_2}{4 \Delta t} (L_{1-2} + L_{2-3}) (B_{1-2} + B_{2-3}), \quad (5.9)$$

где H_1 , H_2 и H_3 — напоры в сечениях ленты, совпадающих с положением пьезометров, на конец расчетного периода времени Δt (что соответствует неявной конечно-разностной аппроксимации); L_{1-2} и L_{2-3} — расстояния по оси ленты между расчетными сечениями (рис. 5.3); B_{1-2} и B_{2-3} — средняя ширина ленты между сечениями; T_{1-2} и T_{2-3} — проводимости фрагментов пласта между сечениями; μ — водоотдача пласта (осредненная по двум смежным фрагментам ленты); ΔH_2 — изменение напора в среднем из трех расчетных сечений в течение расчетного периода времени Δt .

Выражение (5.9) можно представить в виде [47]

$$\varphi_1 - \bar{T} \varphi_2 = \frac{(L_{1-2} + L_{2-3}) (B_{1-2} + B_{2-3})}{4 a_{1-2}}, \quad (5.10)$$

где

$$\varphi_1 = \frac{(H_2 - H_1) B_{1-2}}{\Delta H_2 L_{1-2}}; \quad \varphi_2 = \frac{(H_3 - H_2) B_{2-3}}{\Delta H_2 L_{2-3}}; \\ \bar{T} = \frac{T_{2-3}}{T_{1-2}}; \quad a_{1-2} = \frac{T_{1-2}}{\mu}.$$

Выражение (5.10) является уравнением прямой линии в координатах φ_1 — φ_2 , которая может быть построена с использованием нескольких значений напоров, зафиксированных на ряд последовательных моментов времени. Важно отметить, что пря-

молинейность графика служит критерием достоверности принятой расчетной схемы [47]. Коэффициент пьезопроводности определяется по отрезку φ_1^0 , отсекаемому на оси φ_1 (при $\varphi_2 = 0$):

$$a_{1-2} = \\ = \frac{0,25 (L_{1-2} + L_{2-3}) (B_{1-2} + B_{2-3})}{\varphi_1^0}. \quad (5.11)$$

Тангенс угла наклона графика равен соотношению проводимостей рассматриваемых фрагментов \bar{T} ; угол на-

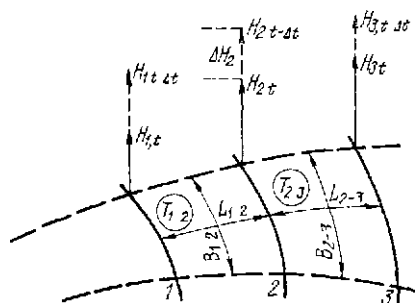


Рис. 5.3. Схема неоднородной ленты тока (к расчету емкостных характеристик пласта)
1—3 — расчетные сечения.

клона, близкий к 45° , свидетельствует о фильтрационной однородности рассматриваемой ленты тока.

Для оценки влияния погрешностей конечно-разностной аппроксимации на точность определения параметров полезно провести параллельный их расчет по уравнениям (5.9) и (5.10), в которых величины H_1 , H_2 , H_3 отвечают напорам на начальные моменты расчетных периодов времени (что соответствует явной конечно-разностной аппроксимации).

Проводимость водоносных пластов надежнее всего определяется в рамках квазистационарных расчетных схем. В тех случаях, когда рассматриваемые стадии нарушенного режима не отвечают условиям квазистационарности, проводимость водоносных пластов целесообразно оценивать по лентам тока, не подверженным существенной деформации в течение расчетного периода. При известном изменении напора на контуре дренажа и наличии данных об изменении расходов по расчетной ленте осредненная проводимость может быть оценена по зависимости:

$$T_{\text{ср}} \approx \frac{Q_{\text{л}}(t) \sqrt{\alpha a t}}{S_{\text{к}} B_{\text{ср}}(t)}, \quad (5.12)$$

где $Q_{\text{л}}(t)$ — расход в пределах ленты на расчетный момент времени t (время отсчитывается от начала снижения напора на контуре дренажа); a — коэффициент пьезопроводности пласта; α — коэффициент, зависящий от закона снижения напора на контуре дренажа ($\alpha = \pi$ — при мгновенном снижении напора до $S_{\text{к}}$; $\alpha = (\pi + 4b)/(1 + 2b)^2$ — при снижении напора по закону $S_{\text{к}}(t) = At^b$ [41]); $B_{\text{ср}}(t)$ — средняя ширина участка ленты длиной $L(t) = \sqrt{\alpha a t}$.

Проводимость по формуле (5.12) целесообразно рассчитывать на несколько моментов времени; стабильность рассчитанных значений является свидетельством достоверности принятой расчетной схемы.

Если при «мгновенном» снижении напора на контуре дренажа внешняя граница расчетной ленты представлена непроницаемым контуром, то проводимость может оцениваться по формуле

$$T \approx \frac{Q_{\text{л}}(t) L_{\text{ср}}}{S_{\text{к}} B_{\text{ср}} T_q(\tau)}, \quad (5.13)$$

где $Q_{\text{л}}(t)$ — расход на расчетный момент времени t ; $L_{\text{ср}}$ и $B_{\text{ср}}$ — средняя длина и ширина ленты; $T_q(\tau)$ — функция, определяемая по графику (рис. 5.4); $\tau = at/L^2_{\text{ср}}$.

Формулой (5.13) следует пользоваться при $\tau > 0,3$; при $\tau < 0,3$ справедлива формула (5.12).

Предлагаемые приемы не являются строго обоснованными, однако в условиях лимитированной информации о нарушении режима они позволяют ориентировочно оценить параметры поля фильтрации, которые при наличии более представительных данных могут быть уточнены.

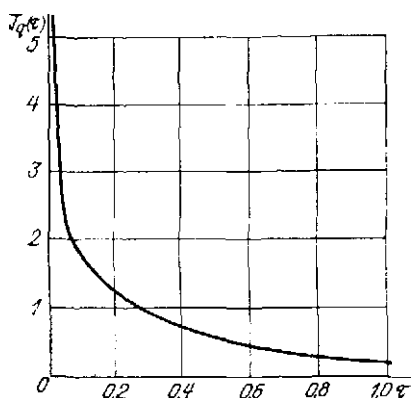


Рис. 5.4. График функции $T_q(\tau)$.

имитируется цепочкой сопротивлений R_x , соответствующих геометрической форме и проводимости выделенных фрагментов ленты; в узловые точки цепочки подключаются временные сопротивления R_t , каждое из которых соответствует емкостным и геометрическим характеристикам двух смежных фрагментов (см. рис. 5.3).

Определение проводимости и водоотдачи отдельных фрагментов фильтрационно-неоднородной ленты сводится к подбору электрических сопротивлений модели, значения которых связаны соотношениями (4.11а).

Сопротивления модели подбираются на каждом шаге по времени при заданных на вершинах временных сопротивлений электрических потенциалов, соответствующих известным напорам на начальный момент времени, и при заданных потенциалах на границах модели, соответствующих напорам на последующий момент времени (конец шага). При выполнении подбора сопротивлений первоначально составляется электрическая модель, отвечающая однородному по проводимости и водоотдаче водоносному горизонту. Значения сопротивлений назначаются по соотношениям (4.11а) исходя из ориентировочных представлений о фильтрационных параметрах анализируемого горизонта (по разведочным данным). В частности, проводимость горизонта может отвечать разведочным данным, а водоотдача соответствовать среднему значению.

Определение параметра пьезопроводности в пределах потенциально однородной ленты тока целесообразно осуществлять на модели при фиксированном соотношении сопротивлений R_t/R_x (заданном исходя из экспертной оценки параметра или по результатам разведки). При этом следует выполнить некоторое количество n временных шагов до получения близкого соответствия модельных и натурных значений напора на мо-

Определение параметров проводимости и водоотдачи в пределах выделенных фильтрационно-неоднородных лент тока целесообразно выполнять на электрических моделях. Наиболее доступными и универсальными являются резисторные модели, на которых реализуется конечно-разностная схема Либманна (4.11). Эта схема позволяет рассматривать нестационарный процесс с любого момента времени и может учитывать любой закон изменений условий на границах водоносных пластов. Расчетная лента тока

мент $t_{\text{нат}}$, после чего коэффициент пьезопроводности можно рассчитать по формуле [28]

$$a \approx \frac{R_t \Delta x^2 n}{R_x t_{\text{нат}}}. \quad (5.14)$$

Естественно, что эти операции возможны при стабильных условиях первого рода на границе дренажа в течение расчетного периода $t_{\text{нат}}$.

При изменении граничных условий во времени трудоемкость решения обратной задачи увеличивается за счет необходимости многократного изменения параметров модели. Вместе с тем применение схемы Либманна позволяет рассматривать обособленно любой участок кусочно-однородного поля фильтрации при известном законе изменения напоров в пределах этого участка. Для облегчения подбора параметров может быть использована специализированная многослойная модель, реализующая несколько шагов по времени [28].

Определение коэффициентов пьезопроводности дренируемых пластов можно вести на электрических моделях (одномерных и плановых) с использованием в качестве потенциальных функций изображений понижений [8, 21].

Операционный принцип позволяет наиболее полно использовать всю имеющуюся информацию об изменениях напоров в течение анализируемого периода наблюдений t_{max} .

Расчет функций изображений понижений напора за расчетный период времени $\bar{S}(x, y, t_p)$ можно производить по формуле [8]

$$\bar{S}(x, y, t_p) = A_0 S(x, y, 0) + \sum_1^n A_k S(x, y, t_k), \quad (5.15)$$

где расчетные моменты t_k и коэффициенты A_k определяются по табл. 5.1 [8] в зависимости от параметра преобразования t_p , который выбирается из условия $t_p < (0,15 \div 0,2) t_{\text{max}}$.

Сопротивления поля модели R_x соответствуют проводимости пласта, а операторные сопротивления R_p , подключенные к узловым точкам сетки (или цепочки) модели, определяются соотношением (4.18а).

Определение коэффициентов пьезопроводности сводится к подбору такого соотношения сопротивлений сетки и операторных сопротивлений, при котором в узловых точках модели фиксируются потенциалы, соответствующие рассчитанным по формуле (5.15) значениям функций изображения понижений на расчетный момент времени. На вершины операторных сопротивлений при подборе должны быть заданы нулевые потенциалы, а на границах модели — потенциалы, отвечающие функциям изображения соответствующих понижений на границах пласта. Таким образом, подбор параметров модели в этом случае аналогичен подбору сопротивлений при моделировании по схеме Либманна на каждом шаге по времени.

После подбора параметров модели коэффициенты пьезопроводности отдельных зон определяются по зависимости

$$a_i = \frac{R_{p,i} \Delta x^2}{R_x t_p} = \frac{R_{p,i} \Delta y^2}{R_y t_p}, \quad (5.16)$$

где Δx и Δy — размеры элементарного участка, тяготеющего к расчетной точке поля.

Принципиальные сложности возникают при наличии фильтрационной неоднородности в окрестностях узловой точки. Та-

К расчету функций изображения

| h t_k/t_p A_k | 0 | 0,1 | 2 | 3 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 0,335 | 1,128 | 2,396 |
| | 0,091 | 0,403 | 0,332 | 0,138 |

кая неоднородность не гарантирует однозначности подбора сопротивлений модели (при неравенстве сопротивлений R_x и R_y плановой модели или сопротивлений $R_{x,i}$ и $R_{x,i+1}$ цепочки), поэтому сопротивления R_p следует подбирать либо с предпосылкой об однородности поля фильтрации по проводимости, либо при известном распределении этого параметра по площади.

Наличие границ с известными расходами позволяет масштабировать электрическую модель и перейти к параметрам проводимости и водоотдачи.

Следует отметить, что применение операционного метода возможно при линейности фильтрационного процесса — постоянстве параметров ($T = \text{const}$ и $\mu = \text{const}$) и стабильности положения границ поля фильтрации.

Для определения коэффициента пьезопроводности наиболее целесообразно использовать емкостные модели, на которых при произвольном значении параметра RC определяется продолжительность имитируемого периода эпигноза на модели $t_{\text{мод}}$ с последующим расчетом параметра по формуле [39]

$$a = \frac{\Delta x^2 t_{\text{мод}}}{R_x C t_{\text{нат}}} = \frac{\Delta y^2 t_{\text{мод}}}{R_y C t_{\text{нат}}}, \quad (5.17)$$

где $t_{\text{нат}}$ — продолжительность моделируемого периода в натуре.

Интегратор ЭИМП 3/66, работающий в режиме графика, открывает возможности для определения коэффициента пьезопроводности с использованием всей информации по изменению напоров во времени в любой расчетной точке поля фильтрации, если применять методику, аналогичную подбору параметров методом эталонных кривых [21, 46].

Если при оценке параметров расчетной ленты тока, охарактеризованной значениями напоров в нескольких точках, выявляется неполное соответствие натуральных и расчетных (модель-

ных) значений этих функций, то следует усомниться в однородности анализируемой ленты и провести ее моделирование с целью выявления элементов неоднородности. Корректировку сопротивлений модели, первоначально отвечающих параметрам однородного пласта, целесообразно начинать с границы дренажа в направлении к внешней границе ленты. Изменение сопротивлений цепочки R_x осуществляется исходя из соотношения фактических (известных) градиентов напора в каждом моделируемом фрагменте и полученных на модели (на конец рас-

Таблица 5.1

понижений напора

| 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 4,167 | 6,487 | 9,428 | 13,102 | 17,696 |
| $3,16 \cdot 10^{-2}$ | $3,98 \cdot 10^{-3}$ | $2,64 \cdot 10^{-4}$ | $3,36 \cdot 10^{-6}$ | $1,06 \cdot 10^{-7}$ |

сматриваемого временного шага). Корректировку временных сопротивлений R_t целесообразно производить с учетом соотношений фактических и полученных на модели значений снижения напора в течение моделируемого интервала времени (шага по времени). Для окончательного подбора сопротивлений на каждом шаге по времени требуется обычно осуществить 3—4 корректировки всей модели. Подбор сопротивлений заканчивается после получения полного соответствия потенциалов во всех узловых точках модели известным напорам на конец рассматриваемого шага по времени.

При анализе на модели потенциально неоднородной по проводимости или водоотдаче ленты тока шаг по времени следует назначать таким образом, чтобы рассматриваемый период был представлен как минимум двумя шагами (интервалами) по времени, причем каждый шаг должен характеризоваться достоверными (не интерполированными во времени) значениями напоров на границах расчетных фрагментов. Это требование диктуется необходимостью однозначного подбора параметров модели, который обеспечивается за счет изменения баланса расходов в каждой узловой точке на разных шагах по времени. При двух подбираемых параметрах (водоотдача и проводимость) необходимо выполнить не менее двух шагов по времени; признаком однозначности подбора служит стабильность параметров модели на всех временных шагах. Следует заметить, что для фильтрационно однородного (по проводимости и водоотдаче) горизонта для однозначности решения достаточно выполнить подбор параметров для периода, представленного единственным шагом по времени, однако при этом возможны погрешности параметра, связанные с грубой дискретностью нестационарного процесса.

После окончания подбора сопротивлений модели следует измерить их абсолютные значения. Коэффициент пьезопровод-

ности каждого фрагмента может быть определен по зависимости

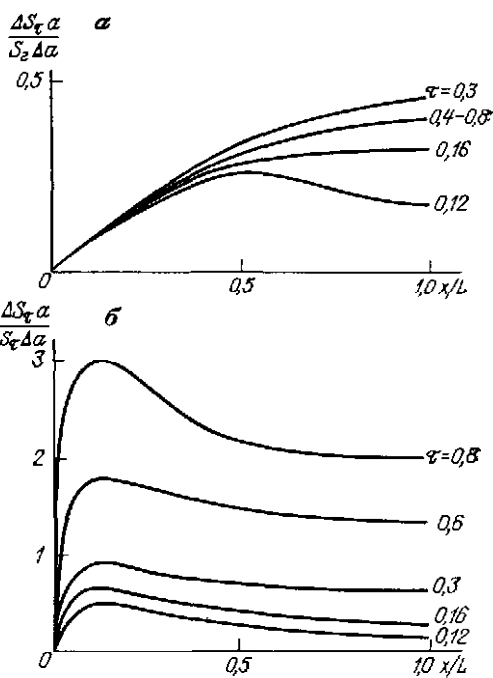
$$a_i = \frac{R_i (L_i + L_{i+1}) (B_i + B_{i+1})}{4R_{x,i} B_i \Delta t} \quad (5.18)$$

Для перехода к значениям параметров проводимости и водоотдачи необходимо, чтобы хотя бы один фрагмент моделируемой системы был охарактеризован независимо полученным значением параметра. Таким «эталонным», наиболее достоверным, значением параметра следует считать проводимость фрагмента, примыкающего к границе дренажа с известным фильтрационным расходом. Проводимость этого фрагмента может быть определена в рамках квазистационарной расчетной схемы — по формуле (5.1). Параметр проводимости первого фрагмента и соответствующее значение электрического сопротивления, подобранное на модели, позволяют определить масштаб сопротивлений m_ϕ (единый для всей модели). Последующий расчет фильтрационных параметров всех фрагментов производится по соотношениям (4.11а).

Электрические модели целесообразно применять также для оценки фильтрационных параметров отдельных двумерных участков, наиболее полно охарактеризованных данными об изменениях напора (по группе пьезометров). Такие участки (или все поле фильтрации) можно воспроизводить на двумерных сеточных моделях, параметры которых подбираются по методике, аналогичной вышележающей. При этом следует на внешних границах зон, в которых идет подбор сопротивлений, задавать потенциалы, соответствующие известным напорам на расчетные моменты времени. При отсутствии в пределах рассматриваемого участка стоков с известным расходом (горных выработок, дренажных скважин) можно определить только коэффициенты пьезопроводности горизонта; наличие данных о расходах позволяет определить параметры проводимости и емкостные характеристики дренируемого горизонта.

Возможность независимого определения коэффициентов пьезопроводности по участкам позволяет выделить однородные по этому параметру зоны двумерного поля фильтрации. Целесообразно подбирать параметры зон последовательно, начиная от границ дренажа в направлении к периферийным частям модели. Определение проводимости и водоотдачи зон можно выполнить затем на плановой модели всего поля фильтрации. Подбор абсолютных значений сопротивлений должен производиться при сохранении тех соотношений между сопротивлениями, которые были получены при независимом определении коэффициентов пьезопроводности по локальным зонам. В отличие от подбора коэффициентов пьезопроводности последующий подбор проводимости и водоотдачи в рамках единой модели может осуществляться на одном шаге по времени.

Рис. 5.5. Хронологические графики абсолютных (а) и относительных (б) коэффициентов чувствительности по параметру пьезопроводности пласта с внешним непроницаемым контуром при «мгновенном» снижении напора на границе дренажа S_T .



Результаты решения обратной гидрогеологической задачи по определению фильтрационных параметров должны быть проанализированы с позиций оценки возможных погрешностей, возникающих за счет метрологических и вычислительных погрешностей. Указанное требование обусловлено некорректностью задачи, т. е. особым ее свойством, которое проявляется в том, что при сравнительно малых погрешностях в значениях напоров (понижений) погрешности определения коэффициента пьезопроводности оказываются высокими.

Мерой некорректности обратных задач могут служить коэффициенты чувствительности расчетных схем, которые существенно зависят от граничных условий (рис. 5.5). Для ряда типовых расчетных схем по коэффициентам их чувствительности можно оценить конкретные погрешности определяемого параметра пьезопроводности в зависимости от погрешностей в напорах (понижениях) (рис. 5.6 и 5.7).

Комментируя рис. 5.6, следует отметить, что для надежной оценки параметра в условиях пласта с «мгновенным» снижением напора на границе дренажа необходимо рассматривать явно нестационарный период фильтрационного процесса. Для этой схемы максимальные погрешности определения параметров характерны для начальной и конечной стадий нестационарного процесса. С той же точки зрения наиболее неблагоприятной для оценки параметра пьезопроводности является схема пласта с фиксированным напором на внешней границе питания.

При использовании для определения параметров моделирования по методу Либманна можно оценить погрешности параметров в зависимости от числа временных шагов для типовых расчетных схем (рис. 5.8). Отметим, что такие оценки целесообразно выполнять, ориентируясь непосредственно на известное

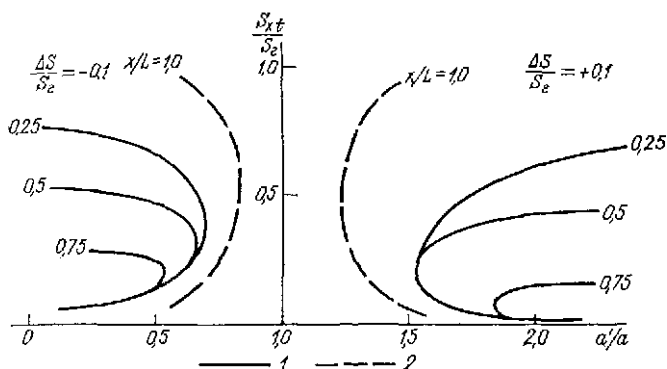


Рис. 5.6. Графики относительных погрешностей коэффициента пьезопроводности a'/a пласта длиной L с «мгновенным» снижением напора на контуре дренажа S_r при фиксированных погрешностях понижений напора $\Delta S/S_r = \pm 0,1$ в точках с координатой x для пласта с постоянным напором на внешнем контуре (1) и для пласта с непроницаемым внешним контуром (2).

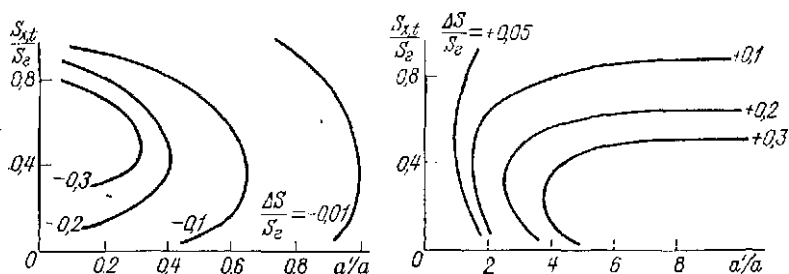


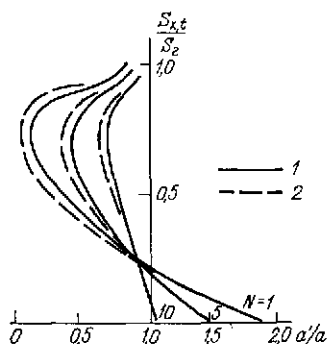
Рис. 5.7. Графики относительных погрешностей коэффициента пьезопроводности a'/a полуограниченного пласта с «мгновенным» снижением напора на контуре дренажа S_r в зависимости от погрешности $\Delta S/S_r$ в значениях понижения напора, зафиксированных в расчетных точках на расчетный момент времени $S_{x,t}$.

значение понижений напора в расчетный момент времени, что позволяет оптимизировать число временных шагов, задаваясь допустимой погрешностью в параметрах.

Для сложных расчетных схем погрешность определения параметра пьезопроводности можно ориентировочно оценивать путем фрагментарного рассмотрения фильтрационных полей, представляя последние однородными лентами тока.

Необходимость контроля погрешностей определения коэффициентов пьезопроводности не исчерпывает все сложности решения обратных задач. В частности, при последующем расчете проводимости и водоотдачи водоносных пластов дополнительные погрешности могут возникать за счет дальнейшей схематизации процесса фильтрации. Определение параметров проводимости предполагает анализ квазистационарных моделей,

Рис. 5.8. Графики относительных погрешностей коэффициента пьезопроводности a'/a , определяемого по схеме Либманна, в зависимости от понижений напора в расчетных точках на расчетный момент $S_{x,t}$ и различного числа временных шагов $N=t/\Delta t$ при «мгновенном» снижении напора на границе S_T для схемы полуграниченного пласта (1) и для схемы пласта длиной L с внешним непроницаемым контуром (2).



которые характеризуют, как правило, лишь часть поля фильтрации, в то время как определение емкостных параметров требует рассмотрения существенно большей площади. Разномасштабность моделей, используемых для определения проводимости и коэффициента водоотдачи, создает определенные трудности при схематизации и является источником дополнительных погрешностей решения обратной задачи в целом.

Особые сложности возникают при оценке гидрогеологических параметров фильтрационно-неоднородных пластов.

Оценка параметра проводимости при анализе нестационарной фильтрации в неоднородном пласте по зафиксированным градиентам напора (т. е. в рамках квазистационарной расчетной схемы) обычно приводит к существенным погрешностям.

В качестве примера можно рассмотреть результаты определения параметров пласта, представленного двумя зонами с различными коэффициентами пьезопроводности, в условиях одномерного потока с «мгновенным» снижением напора на границе дренажа при непроницаемой верхней границе. Рассмотрено два варианта распределения параметров; решение прямых задач проводилось на RC-моделях. Анализ исходных данных (т. е. уровней потока, полученных при решении прямых задач) показывает, что для первого варианта распределения параметров не представляется реальным даже качественно оценить разницу в проводимости зон на любой момент в течение всего периода осушения пласта в рамках квазистационарной схемы (рис. 5.9). Второй вариант отличается от первого тем, что зоны неоднородности меняются местами. Для этого варианта можно оценить характер неоднородности, однако определение истинного соотношения проводимостей оказывается невозможным ни на один из рассмотренных моментов времени.

Следовательно, в общем случае для нестационарного режима надежное выявление неоднородности пласта по проводимости не может быть проведено исходя из предпосылок квазистационарности. Однако определение абсолютного значения проводимости зоны, прилегающей к границе дренажа, оказывается реальным как по первому, так и по второму варианту, начиная с момента времени, когда выполняется условие квазистационарности $S_x > 0,6 S_T$ (где S_T и S_x — понижения на границе дренажа и в пределах первой зоны).

Неопределенность условий квазистационарности, при которых возможно установление проводимости зон, удаленных от границы дренажа, стимулирует поиски иных методических приемов. В частности, принципиально можно ориентироваться на подбор параметров удаленной зоны в рамках единой

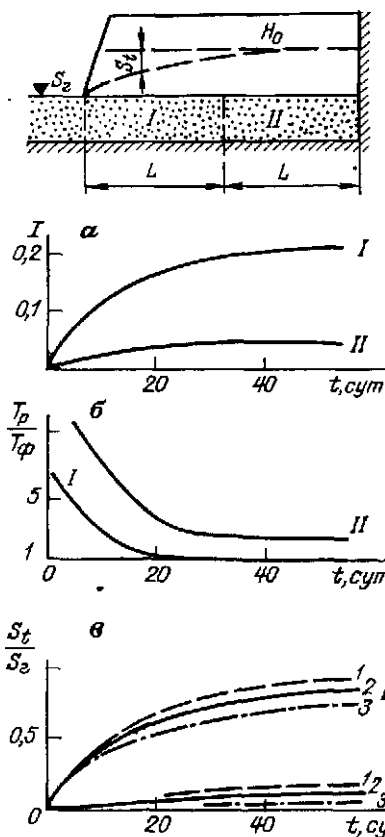


Рис. 5.9. Оценка параметра проводимости T неоднородного пласта, представленного двумя равновеликими зонами ($L=500$ м), с «мгновенным» снижением напора на границе дренажа S_r при внешнем непроницаемом контуре. I — зона с проводимостью $T_1 = 50$ м²/сут, водоотдачей $\mu_1 = 10^{-2}$; II — зона с проводимостью $T_2 = 100$ м²/сут, водоотдачей $\mu_2 = 5 \cdot 10^{-2}$.

Хронологические графики: а — средних градиентов напора в зонах; б — проводимостей, рассчитанных исходя из напоров в средних точках зон по квазистационарной схеме; в — относительных понижений напора в этих точках при подборе проводимости в зоне II в нестационарном режиме ($1-T_2=20$ м²/сут, $2-T_2=100$ м²/сут, $3-T_2=500$ м²/сут).

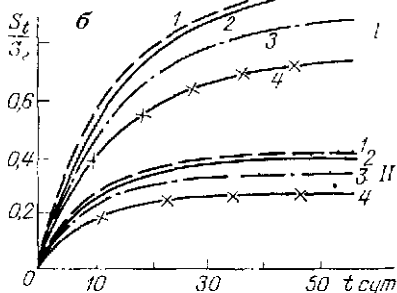
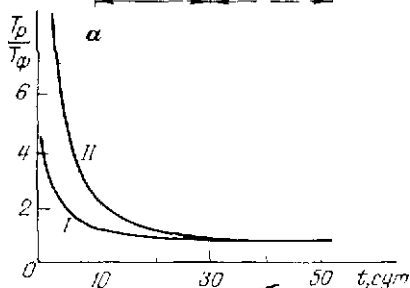
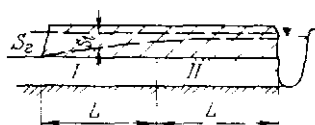
нестационарной модели путем эквивалентного изменения проводимости и коэффициента водоотдачи удаленной зоны при фиксированных параметрах первой зоны и фиксированном коэффициенте пьезопроводности второй (установленном ранее независимо по зонам). Практическая проверка подобной методики на тестовых примерах сводится к оценке чувствительности модели в отношении изменения проводимости удаленной зоны (с компенсацией эквивалентным изменением водоотдачи). Анализ соответствующих модельных решений (применительно к первому варианту) показывает, что при варьировании проводимости в пределах от 5 до 500 м²/сут различия напоров как в первой, так и во второй зонах не превышают 0,1 S_r , а для начальных и конечных стадий нестационарного процесса различия напоров соизмеримы с техническими погрешностями моделирования (2—3 %). Для второго варианта распределения параметров пласта изменение проводимости зоны, тяготеющей к внешней границе, в пределах от 20 до 500 м²/сут сопровождается изменением напоров, также не превышающим 0,1 S_r . Некорректность обратных задач при граничных условиях первого рода (на внешней границе задан постоянный напор) проявляется в меньшей степени. Для этих схем представляется возможной оценка проводимости отдельных зон в рамках квазистационарной расчетной схемы (рис. 5.10); однако подбор проводимости при нестационарном режиме сопровождается существенными погрешностями.

Следовательно, низкая чувствительность фильтрационно-неоднородных полей по отношению к параметрам пьезопроводности, проводимости и водоотдачи зон, расположенных вдали от границ дренажа, не гарантирует надежного установления параметров таких зон. Этот объективно неблагоприятный фактор не может быть компенсирован ни исчерпывающей информацией о развитии нестационарного процесса во времени, ни применением совершенных методов интерпретации этой инфор-

Рис. 5.10 Оценка параметра проводимости T_p неоднородного пласта, представленного двумя равновеликими зонами ($L=500$ м), с «мгновенным» снижением напора на границе дренажа при внешней границе обеспеченного питания.

I — зона с проводимостью $T_1=500$ м²/сут, водоотдачей $\mu_1=5 \cdot 10^{-2}$; II — зона с проводимостью $T_2=50$ м²/сут, водоотдачей $\mu_2=10^{-2}$

Хронологические графики α — проводимостей, рассчитанных по квазистационарной схеме; β — относительных понижений напора в средних точках зон при подборе проводимости зоны II в нестационарном режиме (1 — $T_2=20$ м²/сут, 2 — $T_2=50$ м²/сут, 3 — $T_2=200$ м²/сут, 4 — $T_2=500$ м²/сут)



мации (например, использованием емкостных моделей или моделей, реализующих интегральный принцип операционного метода).

Таким образом, анализ специфики обратных нестационарных задач не приводит к оптимистическим выводам

в отношении надежности определения фильтрационных параметров. Решение обратных гидрогеологических задач на математических моделях не всегда обеспечивает преодоление ряда принципиальных трудностей (в первую очередь некорректности). Тем не менее математические модели являются наиболее надежным инструментом гидрогеологических исследований, который позволяет провести анализ изучаемого процесса, оценить погрешности получаемого параметра в каждом конкретном случае, обоснованно наметить дополнительные изыскания и наблюдения для их снижения.

5.3. Оценка параметров питания и взаимосвязи дренируемых водоносных горизонтов

Интенсивность инфильтрационного питания водоносных горизонтов, как правило, не может быть установлена в период разведки месторождений из-за ограниченных масштабов возмущений, создаваемых при опытно-фильтрационных опробованиях. Достоверное определение этого параметра возможно по результатам режимных наблюдений в период эксплуатации шахт и разрезов.

Инфильтрационное питание как элемент расчетной гидродинамической схемы существенно усложняет условия идентификации последней за счет как увеличения числа определяемых

параметров, так и повышения уровня некорректности обратных задач этого класса. Для обеспечения однозначности и надежности оценки параметров при решении таких обратных задач в общем случае целесообразно определять характеристики питания и фильтрационные параметры по независимым расчетным схемам. При этом характеристики питания следует оценивать по возможности в рамках квазистационарных моделей, используя имеющуюся информацию о распределении напоров по площади изучаемого водоносного горизонта. При определении проводимости и пьезопроводности горизонта целесообразно по возможности исключить характеристику инфильтрации, вести расчет по лентам тока, максимально освещенным информацией об изменении расходов и напоров потока. Следовательно, независимые расчетные схемы при этом различаются как масштабом рассмотрения фильтрационного процесса, так и соответствием их различным его стадиям. Полученные таким образом параметры должны затем контролироваться и уточняться в рамках единой схемы-модели, учитывающей взаимное влияние определяемых параметров и изменения граничных условий поля фильтрации в целом в течение всего периода прогноза.

В общем случае интенсивность инфильтрационного питания можно определить лишь при известном распределении проводимости водоносного горизонта, охарактеризованного значениями напоров в различных его точках. В противном случае интенсивность инфильтрационного питания может быть оценена лишь для схем закрытого пласта с известным расходом на контуре дренажа. В частности, средняя интенсивность инфильтрационного питания водоносного горизонта, дренируемого горной выработкой или группой выработок (не имеющего иных источников питания кроме инфильтрации), в условиях квазистационарного режима может быть определена по зависимости

$$\omega_{\text{ср}} = \sum_1^n Q_n / \sum_1^n F_n, \quad (5.19)$$

где Q_n — среднегодовой водоприток в выработку со стороны воронки депрессии; F_n — площадь воронки депрессии вокруг выработки; n — номер выработки.

Аналогичный подход может быть предложен и для определения средней интенсивности инфильтрационного питания водоносного горизонта в пределах выделенной ленты тока, ограниченной внешним непроницаемым контуром.

При невозможности выделения притока со стороны воронки депрессии по общему водопритоку в шахту $Q_{\text{в}}$ можно определить среднюю интенсивность инфильтрации по шахтному полю

$$\omega_{\text{ср}} = Q_{\text{в}} / (F_{\text{в}} + F_{\text{д}}). \quad (5.20)$$

Как уже отмечалось, интенсивность инфильтрационного питания существенно изменяется по сравнению с «естественной» при эксплуатации шахт, которая сопровождается деформациями толщи пород и земной поверхности по площади очистных работ. Для дифференцированной оценки интенсивности инфильтрации по площади очистных горных работ ω_b и за ее пределами, т. е. по площади воронки депрессии ω_d , можно воспользоваться решением системы уравнений

$$\begin{cases} F'_b \omega_b + F'_d \omega_d = Q'_b; \\ F''_b \omega_b + F''_d \omega_d = Q''_b, \end{cases} \quad (5.21)$$

где F'_b и F''_b — площади горных выработок на два различных момента времени (года) при водопитоках в выработки соответственно Q' и Q'' ; F'_d и F''_d — площади воронок депрессии на те же моменты времени.

При выборе расчетных моментов следует ориентироваться на годы с примерно одинаковым среднегодовым количеством атмосферных осадков. Такая методика с успехом применялась для оценки интенсивности инфильтрации по площади Эстонского сланцевого месторождения (см. рис. 6.8), которая существенно превышает интенсивность «естественной» инфильтрации (около 150 мм/год).

При известном распределении напоров по полю фильтрации на момент квазистационарного режима (соответствующего либо паводковому, либо межениному периоду) можно определить подбором сопротивлений плановой электрической модели обобщенный параметр ω/T . Постоянство этой характеристики для всех участков поля может служить признаком однородности расчетной ленты по проводимости и интенсивности инфильтрационного питания. Однако при этом не исключается вариант пропорционального искажения обоих фильтрационных параметров. Следовательно, данные о распределении напоров не обеспечивают однозначность оценки параметров схемы-модели.

При установленной интенсивности инфильтрационного питания водоносных горизонтов (определенной по известному фильтрационному расходу) рассчитывать проводимость целесообразно по лентам тока. В пределах лент, отражающих структуру плоскопараллельных потоков, расчет проводимости можно производить по формуле

$$T = \omega L^2 / (2\Delta H), \quad (5.22)$$

где L — длина потока, т. е. расстояние между границей дренажа и непроницаемым внешним контуром (водоразделом); ΔH — разность напоров на этих границах.

При осесимметричной структуре потока по известным (измеренным в натуре) напорам на контуре горных выработок и на границе депрессионной воронки средняя проводимость

пласта по всей площади (или в пределах отдельного сектора — ленты тока) определяется зависимостью

$$T = \frac{\omega R^2}{2\Delta H} \left(\ln \frac{R}{r_0} - 0,5 \right). \quad (5.23)$$

Для более общего случая двумерной ленты тока оценка проводимости возможна лишь при наличии данных о распределении напоров вдоль ленты; расчет можно произвести по формуле

$$T = \frac{\omega F}{(H_3 - H_2) B_{2-3} / L_{2-3} - (H_2 - H_1) B_{1-2} / L_{1-2}}, \quad (5.24)$$

где H_1 , H_2 и H_3 — напоры на границах смежных фрагментов ленты, характеризующихся длиной L_{1-2} , L_{2-3} и шириной B_{1-2} , B_{2-3} ; F — площадь смежных фрагментов.

При известном расходе на контуре дренажа расчетной ленты и напорах вдоль нее изменчивость проводимости и интенсивности инфильтрационного питания можно оценить подбором соответствующих параметров электрической модели. Однако однозначность такого подбора не может гарантироваться. Поэтому в общем случае полезно рассмотреть крайние варианты, для которых один из неизвестных параметров подбирается при постоянном (закрепленном) другом. При высокой степени геологической изученности месторождения возможно задание одного из параметров исходя из определенного закона его изменчивости вдоль расчетной ленты.

В условиях неустановившегося режима фильтрации оценка интенсивности инфильтрационного питания существенно осложняется. Как правило, при определении параметров питания здесь следует ориентироваться на модели, однородные по одному из фильтрационных параметров (по проводимости или по водоотдаче). В частности, инфильтрационное питание может быть определено параллельно с оценкой водоотдачи на электрических моделях при заданной проводимости поля фильтрации (или ленты тока). В этом случае для обеспечения однозначности подбора параметров модели при использовании схемы Либманна необходимо выполнить не менее двух шагов по времени. Проводимость в этом случае должна быть определена независимо — принята по разведочным данным или оценена по участкам, примыкающим к границам дренажа (по зонам квазистационарного режима).

Для оценки дополнительного (по сравнению с «естественным») инфильтрационного питания $\Delta\omega$ целесообразно воспользоваться возможностями операционного метода. При этом необходимо определить для расчетного периода по всем пьезометрам функции изображений \bar{S}' и S'' , соответствующие двум принятым значениям параметров преобразования t_p' и t_p'' . Затем на плацовой сеточной модели производится подбор соот-

ветствующих операторных сопротивлений R_p' и R_p'' . Дополнительная инфильтрация Δw и водоотдача μ определяются решением системы

$$\begin{aligned} R_p' &= \frac{1}{(\mu/t_p' - \Delta w/\bar{S}') \Delta x \Delta y m_\phi}; \\ R_p'' &= \frac{1}{(\mu/t_p'' - \Delta w/\bar{S}'') \Delta x \Delta y m_\phi}. \end{aligned} \quad (5.25)$$

Этот прием позволяет также установить факт сохранения «естественной» интенсивности инфильтрационного питания при развяти техногенного режима (при $\Delta w = 0$).

Для схем с постоянной «естественной» инфильтрацией проводимость горизонта можно определять с использованием методических приемов, применяемых для оценки этого параметра в условиях отсутствия питания водоносного горизонта (для стационарной и нестационарной фильтрации). В качестве потенциальных функций при этом должны выступать понижения, отсчитываемые от среднегодового положения уровней.

Характеристики относительных водоупоров слоистых водоносных комплексов [k_0/m_0 или $\xi = k_0/(Tm_0)$], где k_0 и m_0 — коэффициент фильтрации и мощность водоупора, T — проводимость дренируемого водоносного пласта] целесообразно оценивать по выделенным лентам тока. При рассмотрении техногенного режима подземных вод в пределах карьерных и шахтных полей расчетные ленты тока чаще всего имеют форму сектора, что позволяет использовать для расчета фильтрационных параметров решения, отражающие структуру радиальных потоков. В частности, при оценке параметра перетекания в пределах таких лент можно использовать формулу, учитывающую питание дренируемого водоносного пласта за счет водообильного водоносного горизонта:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{K_0(r_1 \sqrt{\xi})}{K_0(r_2 \sqrt{\xi})}, \quad (5.26)$$

где S_1 и S_2 — понижения напора в двух точках дренируемого водоносного пласта, расположенных на расстояниях r_1 и r_2 от центра симметрии радиального потока (по расчетной ленте тока); K_0 — функция Бесселя [8, 21].

Параметр ξ по формуле (5.26) определяется подбором или с помощью специальной номограммы [8].

При известной проводимости водоносного пласта T и расходе радиального потока Q_π в пределах ленты параметр перетекания для этой расчетной схемы можно определить и при наличии одного пьезометра по формуле

$$\rho T S_r / Q_\pi = K_0(r \sqrt{\xi}), \quad (5.27)$$

где ρ — угловая характеристика секторной ленты (в радианах).

В общем случае в условиях квазистационарного режима фильтрации характеристику разделяющего питаемый и питающий пласты водоупора k_0/m_0 можно определить в пределах расчетной ленты тока любой формы по зависимости

$$\frac{k_0}{m_0} = \frac{Q_d}{\sum_{i=1}^{i=n} F_i \Delta H_i}, \quad (5.28)$$

где Q_d — водоприток к контуру дренажа (к горной выработке), формирующийся в пределах ленты по площади воронки депрессии за счет перетекания через относительный водоупор; F_i — площадь расчетного участка воронки депрессии, в пределах которого фиксируется разность напоров взаимодействующих горизонтов ΔH_i ; n — число расчетных участков.

Аналогично можно определить параметр перетекания на электрических моделях. На вершины дополнительных сопротивлений, присоединенных к узловым точкам плановой сеточной модели, подаются потенциалы, отвечающие напорам питающего пласта. Изменением дополнительных сопротивлений R_z добиваются соответствия потенциалов в узловых точках напорам питаемого пласта. Параметр перетекания определяется зависимостью

$$\xi_i = R_x / (R_z \cdot F_i), \quad (5.29)$$

где R_x — сопротивление сетки модели; F_i — площадь элементарного участка, тяготеющего к расчетной точке номер i .

Моделирование позволяет выявить фильтрационную неоднородность разделяющего водоупора. По результатам наблюдений за уровнями подземных вод и водопритоками в шахту при подработке трехслойного водоносного комплекса (два водоносных пласта, разделенных водоупором) может быть выполнена оценка характеристик водоупора k_0/m_0 решением системы уравнений

$$\begin{cases} \left(\frac{k_0}{m_0} \right)_в F'_в \Delta H'_в + \left(\frac{k_0}{m_0} \right)_д \sum_{i=1}^{i=n} F'_{д,i} \Delta H'_{д,i} = Q'; \\ \left(\frac{k_0}{m_0} \right)_в F''_в \Delta H''_в + \left(\frac{k_0}{m_0} \right)_д \sum_{i=1}^{i=n} F''_{д,i} \Delta H''_{д,i} = Q''; \end{cases} \quad (5.30)$$

где $(k_0/m_0)_в$ — характеристика водоупора над выработанным пространством (по площади очистных работ $F_в$); $(k_0/m_0)_д$ — характеристика водоупора естественной структуры по площади воронки депрессии; $F_{д,i}$ — площадь элементарного участка воронки депрессии, в пределах которого разница напоров взаимодействующих пластов равна $\Delta H_{д,i}$; n — число элементарных участков; $\Delta H_в$ — разность напоров водоносных пластов в преде-

лах площади очистных работ; Q — общий суммарный водоприток в горную выработку; индексы ' и '' при F_d , F_b , ΔH_b , ΔH_d , Q соответствуют значениям этих величин на два расчетных периода развития горных работ.

При оценке фильтрационных параметров трехпластовых водоносных систем (два водоносных пласта, разделенных водоупором) в условиях нестационарного режима целесообразно использовать возможности электрического моделирования. Интерпретация результатов наблюдений за изменением напоров в водоносных пластах при проведении опытного или эксплуатационного водопонижения может быть выполнена по следующей методике. На первом этапе анализа расчетной схемы-модели определяется только соотношение сопротивлений электрической модели трехпластовой системы, отвечающих проводимости пластов (R_x), их емкостным параметрам (R_t) и характеристикам относительных водоупоров (R_z) (рис. 5.11). Определение соотношений сопротивлений модели взаимодействующих пластов рекомендуется выполнять в определенной последовательности, начиная с пласта, характеризующегося максимальными понижениями напора.

На отдельной модели этого пласта выполняется подбор сопротивлений R_x' , R_t' , R_z , который контролируется соответствием потенциалов U_1 в узловых точках модели известным понижениям напоров моделируемого пласта на расчетный момент времени t . При подборе параметров модели на вершины сопротивлений R_t подаются потенциалы U_2 , соответствующие понижениям напоров пласта на момент времени $t - \Delta t$, а на вершины сопротивлений R_z — потенциалы U_3 , отвечающие понижениям напоров взаимодействующего с моделируемым пласта на расчетный момент времени t (см. рис. 5.11). Для обеспечения однозначности определения соотношений сопротивлений модели пласта со смежным водоупором необходимо выполнить этот подбор как минимум на два расчетных момента времени (на двух шагах по времени); на каждом шаге должно быть зафиксировано одинаковое соотношение сопротивлений. При неоднородности водоносного пласта по проводимости подбор соотношения сопротивлений необходимо произвести на три расчетных момента.

Далее на отдельной модели второго из взаимодействующих пластов аналогично подбираются сопротивления R_x'' , R_t'' , R_z , которые контролируются потенциалами U_3 в узловых точках при заданных на вершины сопротивлений R_t потенциалах U_4 , соответствующих понижениям напоров пласта на момент времени $t - \Delta t$. На вершинах сопротивлений R_z при этом подаются потенциалы U_1 , соответствующие понижениям напоров первого из двух рассматриваемых пластов на расчетный момент времени t . Однозначность подбора сопротивлений второго пласта обеспечивается анализом модели на 2—3 расчетных момента времени.

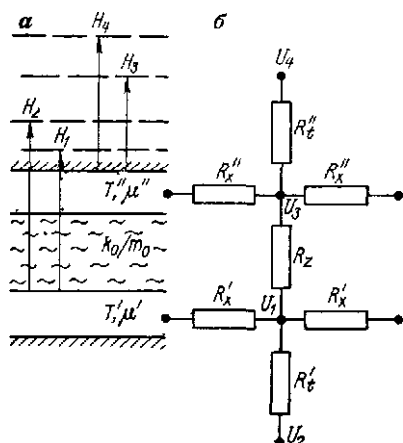


Рис 5.11 Схема трехслойного водоносного комплекса (а) и электрической модели (б) для оценки его параметров

Поскольку сопротивление R_z является общим для двух отдельных моделей взаимодействующих пластов, то можно определить соотношение сопротивлений рассматриваемой схемы-модели трехпластовой системы. Сопоставление сопротивлений может быть произведено по отношению к любому из них, выбран-

ному в качестве эталона, поэтому первый этап анализа модели целесообразно назвать ее эталонированием.

В отличие от первого второй этап идентификации модели трехпластовой системы можно назвать ее масштабированием. На этом этапе на единой модели трехпластовой системы с установленным на этапе эталонирования соотношением сопротивлений в точках, соответствующих положению источников — стоков с известными расходами Q_i , подбирается ток I_0 , при котором во всех узловых точках фиксируются потенциалы, отвечающие известным понижениям напоров водоносной системы. Затем определяется масштаб сопротивлений модели m_ϕ по формуле

$$m_\phi = \frac{I_0 m_S}{Q_i V_{\max}}, \quad (5.31)$$

где m_S — масштаб понижений напоров, определяемый зависимостью

$$m_S = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}}; \quad (5.32)$$

S_{\max} и S_{\min} — максимальное и минимальное понижения напоров моделируемой системы; U_{\max} и U_{\min} — соответствующие значения электрических потенциалов; V_{\max} — напряжение, соответствующее потенциалу U_{\max} .

Располагая значениями сопротивлений модели, при известном масштабе сопротивлений нетрудно перейти к фильтрационным параметрам трехпластовой системы по формулам (4.11а). Характеристики относительного водоупора k_0/m_0 определяются по зависимости

$$\frac{k_0}{m_0} = \frac{1}{R_z \Delta x \Delta y m_\phi}. \quad (5.33)$$

Подчеркнем, что в качестве потенциальной функции следует выбирать понижения напора взаимодействующих пластов, что освобождает от необходимости учета инфильтрационного питания в расчетной схеме-модели. Интенсивность инфильтрационного питания затем можно подобрать на модели с известными параметрами, оперируя потенциальными функциями напоров.

Идентификация схем-моделей многопластовых водоносных систем принципиально может быть выполнена путем эталонирования и масштабирования электрических моделей. Методическая особенность эталонирования в этом случае является необходимость определения соотношений сопротивлений моделей каждого из взаимодействующих пластов при наличии двух смежных с ним водоупоров. Подбор сопротивлений модели, содержащей в каждой узловой точке по два сопротивления R_z (кроме R_t и R_x), вынуждает в этом случае выполнять не менее трех шагов по времени (даже при однородности пласта по проводимости).

В частном случае нестационарного режима фильтрации в пласте, питающемся за счет водного объекта (водопосного горизонта, водоема) со стабильным напором, для оценки характеристики водоупора k_0/m_0 и водоотдачи μ пласта можно использовать операционный метод, реализуемый на моделях при двух значениях параметра преобразования t_p' и t_p'' . Определение фильтрационных параметров в этом случае производится аналогично оценке дополнительного инфильтрационного питания решением системы уравнений

$$\begin{cases} R_p' = \frac{1}{m_\phi \Delta x \Delta y (\mu/t_p' + k_0/m_0)}; \\ R_p'' = \frac{1}{m_\phi \Delta x \Delta y (\mu/t_p'' + k_0/m_0)}. \end{cases} \quad (5.34)$$

Повышенная некорректность этой задачи и сложность контроля погрешностей определения параметров в целом снижают достоверность идентификации многопластовой системы и требуют независимой оценки отдельных ее элементов, а также многофакторного анализа системы по критериям физического правдоподобия.

5.4. Анализ качества определения фильтрационных параметров неоднородных водоносных пластов

Результаты полноценных наблюдений за режимом подземных вод на шахтных и карьерных полях целесообразно интерпретировать на математических (численных или аналоговых) моделях, позволяющих рассматривать как стационарные, так и нестационарные процессы. На двумерной модели можно существенно уточнить параметры кусочно-однородных водоносных

пластов, полученные по результатам предварительной интерпретации исходной информации (при расчете их по лентам тока, например). Прежде всего производится оценка качества исходной схемы-модели двумерного поля, установление ее соответствия имеющейся информации о фильтрационном процессе в натурных условиях, т. е. оценка возможности модели достаточно надежно воспроизводить известную «историю» фильтрационного процесса.

Оценка качества исходной расчетной схемы (или ее калибровка) предполагает определенным образом организованное сопоставление данных о фактическом развитии процесса с реакцией модели на возбуждение, соответствующее натурному возмущению водоносной системы. Сопоставление может производиться по выбранным характеристикам фильтрационного потока. В общем случае на двумерной модели при заданных граничных условиях первоначально определяются во всех расчетных точках так называемые невязки напоров

$$\gamma_{\Delta H, i} = H_{н, i} - H_{м, i}, \quad (5.35)$$

где $H_{н, i}$ и $H_{м, i}$ — напор в точке i в натуре и на модели.

При определении проводимости поля фильтрации наряду с невязками вида (5.35) целесообразно использовать другое их выражение:

$$\gamma_{\Delta I, i} = I_{н, i} - I_{м, i}, \quad (5.36)$$

где $I_{н, i}$ и $I_{м, i}$ — градиенты потока на участке i между двумя расчетными точками (в натуре и на модели).

Обобщенная оценка модели в целом определяется функцией ее качества f_k . Функция качества может быть представлена в виде суммы отклонений модельных характеристик потока от натурных значений последних в ряде расчетных точек (соответствующих, например, положению пьезометров). Доброкачественные расчетные схемы характеризуются минимальным значением функции качества.

При определении емкостных свойств водоносных горизонтов, параметров их питания по площади (инфильтрации или перетекания) в качестве представительных характеристик анализируемых полей фильтрации рекомендуется выбирать напоры в расчетных точках. Соответствующая функция качества модели в целом в этом случае определяется зависимостью

$$f_{k, \Delta H} = \sum_{i=1}^{i=n} \delta_i \gamma_{\Delta H, i} \quad (5.37)$$

или

$$f_{k, \Delta H} = \sum_{i=1}^{i=n} \delta_i^2 \gamma_{\Delta H, i}^2 \quad (5.37a)$$

где δ_i — весовой коэффициент, назначаемый в зависимости от качества исходной информации ($1 \leq \delta < 0$).

Функции качества (5.37) и (5.37а) могут использоваться и при определении проводимости водоносных горизонтов; однако в этом случае более представительными характеристиками потока являются значения напорного градиента, которые наряду с фильтрационными характеристиками пластов отчасти учитывают структуру потока. Функция качества при этом записывается в виде

$$f_{k, \Delta I} = \sum_{i=1}^{i=n} \delta_i \gamma_{\Delta I, i}. \quad (5.38)$$

Функции качества вида (5.37) и (5.38) можно назвать основными калибрационными критериями. Однако выполнение этих критериев (минимальные их значения) не обеспечивает однозначности параметров расчетной схемы (отвечая в общем случае лишь соотношению значений параметров). Поэтому для полной калибрации расчетной схемы-модели необходима ее проверка по критериям интегрального характера. Интегральным калибрационным критерием является сумма небаланса фильтрационных расходов в каждой из расчетных зон модели [25]

$$f_{k, \Delta Q} = \sum_{i=1}^{i=n} \delta_i (Q_{n, i} - Q_{m, i}), \quad (5.39)$$

где $Q_{n, i}$ и $Q_{m, i}$ — фильтрационные расходы на границе номер i (в натуре и на модели).

Критерий (5.39) обеспечивает проверку однозначности решения обратной задачи по определению фильтрационных параметров, однако обычный дефицит исходной информации не позволяет проконтролировать модель в целом по этой характеристике. Практически приходится ограничиваться оценкой качества модели по расходам, измеренным на внутренних границах области фильтрации (горных выработках, дренажных скважинах), что снижает в целом качество контроля модели, но обеспечивает однозначность подбора параметров по всему полю фильтрации.

Входящие во все калибрационные критерии весовые коэффициенты δ не поддаются строгой регламентации, так как они отражают не только возможные метрологические погрешности характеристик потока, но и отчасти косвенно учитывают возможные погрешности гидрогеологической схематизации.

Анализ расчетной схемы модели должен включать в качестве обязательного элемента оценку чувствительности модели. Последняя заключается в определении так называемых коэффициентов чувствительности α , представляющих собой отношение изменений выбранных для калибрации характеристик

фильтрационного поля в расчетной точке к зафиксированному изменению фильтрационного параметра в окрестностях этой точки или других точек. Например, коэффициент чувствительности схемы-модели по функциям напоров определяется следующей зависимостью:

$$\alpha_{i,n} = \Delta H_{i,n} / \Delta P_n, \quad (5.40)$$

где $\Delta H_{i,n}$ — изменение напора в расчетной точке i при изменении параметра P в окрестностях точки n на ΔP_n .

В принципе коэффициент чувствительности изменяется нелинейно с изменением параметров модели, однако при ограниченном диапазоне варьирования параметра этот коэффициент можно рассматривать как константу. Практически коэффициент чувствительности исследуемой модели определяется при варьировании параметров этой модели с фиксацией соответствующих изменений характеристик потока (напоров, градиентов или фильтрационных расходов). После определения реакции модели на изменение одного из ее параметров (или параметра отдельной зоны поля фильтрации) модель возвращается в исходное состояние, после чего изменяется другой ее параметр (параметр другой зоны).

Коэффициенты чувствительности дают возможность судить о значимости того или иного параметра (или зоны поля фильтрации) для расчетной схемы в целом, а также позволяют оценить возможность улучшения расчетной схемы, которое называется ее коррекцией (или коррекцией параметров). Коррекция модели может быть выполнена на основе различных методов подбора, которые можно разделить на две группы:

— методы целенаправленного улучшения параметров модели (или градиентные методы минимизации функций качества);

— методы проб и ошибок (или итеративные методы).

Один из возможных вариантов целенаправленной коррекции параметров модели может быть реализован в следующем порядке. После определения качества модели и оценки ее чувствительности выполняется предварительный расчет поправок параметров ΔP_i^0 в окрестностях расчетных точек (или в отдельных зонах) по формуле

$$\Delta P_i^0 = \gamma_i / \alpha_{i,i}, \quad (5.41)$$

где γ_i — невязка (по значениям напоров или градиентов) в расчетной точке (зоне); $\alpha_{i,i}$ — коэффициент чувствительности модели в этой точке (или зоне).

Предварительный расчет поправок ΔP_i^0 предполагает, что снижение невязок в расчетных точках достигается только за счет изменения параметра в окрестностях этих расчетных точек, т. е. без учета влияния изменений параметров в соседних зонах.

Расчет уточненных поправок параметров ΔP_i , обеспечивающих снижение величины индекса помех во всех расчетных точках (зонах) с учетом взаимного их влияния, производится по формуле

$$\Delta P_i = \lambda \frac{\gamma_i - \sum_n \Delta P_n^0 \alpha_{i,n}}{\alpha_{i,i}}, \quad (5.42)$$

где γ_i — невязка в расчетной точке i (в зоне i); ΔP_n^0 — предварительно рассчитанная поправка параметра в точке n ; $\alpha_{i,n}$ — коэффициент чувствительности расчетной точки i по изменению параметра в точке n ; $\alpha_{i,i}$ — коэффициент чувствительности расчетной точки i по изменению параметра в окрестностях этой точки; λ — коэффициент, ограничивающий изменение параметров модели (для электрического моделирования может быть принят равным 0,2—0,3, а для численных моделей 0,05—0,1).

Общей принципиальной особенностью разнообразных методов проб и ошибок является непосредственная коррекция модели по одному из параметров (или параметров одной из зон кусочно-однородного поля фильтрации), которая контролируется соответствующим изменением качества модели в целом. Алгоритм поиска может быть различным: поиск по Гауссу предусматривает одновременное изменение всех искомых параметров модели после того, как исследованы реакции на изменения отдельных параметров; поиск по Зейделю предусматривает изменение последующего из ряда рассматриваемых параметров после изменения и фиксирования предыдущего. Первый из этих алгоритмов характеризуется лучшей сходимостью.

Методы проб и ошибок требуют использования ЭВМ или АВМ для получения решений, дающих возможность оценить качество математической модели и обосновать целесообразность ее улучшения. Эти методы не гарантируют однозначности получаемого решения в силу зависимости последнего от стартовой точки, т. е. от того, с какого значения параметра (с какой зоны) начинался подбор. Для корректной постановки задачи по определению параметров итеративными методами требуется выполнение дополнительных условий (например, использование нескольких известных значений параметров, которые контролируют подбор параметров кусочно-однородного поля). Методы этой группы эффективны при относительно хорошем качестве исходной модели (требующей корректировки только наиболее чувствительных зон).

Реализация методов проб и ошибок может быть успешна при определенном опыте и интуиции исследователя. При решении практических задач по определению параметров рационально сочетать методы проб и ошибок (на первом этапе) с методами целенаправленного поиска.

Окончательно скорректированная тем или иным методом оптимальная модель может быть проанализирована с позиций оценки возможных погрешностей определения гидрогеологических параметров в рамках выбранной расчетной схемы. С этой целью исходя из коэффициентов чувствительности скорректированной функциональной модели рассчитываются абсолютные погрешности конкретного параметра в окрестностях расчетных точек (зон) по формуле

$$\Delta P'_i = (\Delta A + \Delta B) / \alpha_{i,i}, \quad (5.43)$$

где ΔA — абсолютная погрешность определения характеристики фильтрационного потока в природе (напора, градиента); ΔB — абсолютная погрешность вычислительного алгоритма (моделирования), применяемого при анализе поля фильтрации; $\alpha_{i,i}$ — коэффициент чувствительности в расчетной точке скорректированной модели (по выбранной характеристике потока).

Возможные погрешности определения характеристик потока в природе оцениваются некоторым диапазоном погрешностей разного знака. Такой диапазонной оценке подлежат прежде всего метрологические погрешности (измерений расходов и уровней), а также погрешности интерполяции напоров при построении карты гидроизопьез и лент тока. Погрешности вычислительной схематизации могут быть оценены однозначно при определении точности моделирования рассматриваемой схемы.

Формализованная оценка точности определяемых параметров не исчерпывает всех требований к анализу расчетной схемы. В частности расчетная функциональная схема-модель может быть рассмотрена с позиций имитационной постановки анализа, основанного на многовариантном конструировании сложных систем с неопределенной структурой [45].

Решающее значение при оценке качества расчетной схемы-модели имеет ее оценка на основе критериев физического правдоподобия. В качестве критериев физического правдоподобия модели могут выступать результаты опытно-фильтрационных работ, соответствие установленного распределения параметров геологическому строению водоносного пласта или комплекса, ограничение расчетных параметров доверительными пределами. Критериями физического правдоподобия тех или иных фильтрационных параметров могут считаться разнообразные физические свойства обводненных массивов, а также характеристики физических процессов, наблюдаемых или инициированных в этих массивах.

В частности, оценки проницаемости (параметра проводимости, коэффициентов фильтрации водоносных пластов и относительных водоупоров) могут контролироваться гранулометрическим составом рыхлых пород, трещиноватостью полускальных пород, степенью закарстованности карбонатных отложений, наличием тектонических нарушений, физическими свойствами

пород (электропроводностью, сейсмопроводностью, теплопроводностью).

Водоотдача пород может коррелировать с их пористостью, коэффициентами сжимаемости, влагоемкостью, упругоемкостью воды. При контроле характеристик инфильтрационного питания подземных вод критериями являются количество атмосферных осадков, состав, структура и свойства покровных отложений, глубина залегания водоносного пласта и зеркала подземных вод, колебания уровней в водоемах и водотоках.

Следует подчеркнуть, что проведение субъективных оценок математических моделей на основе геологического и гидрогеологического анализа исследуемого объекта зачастую является единственной возможностью получения достоверного решения обратной задачи.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА КОНКРЕТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Опыт специальных гидрогеологических исследований, выполненных ВНИМИ в течение последних двух десятилетий на ряде угольных и рудных месторождений с разнообразными условиями, позволяет проиллюстрировать некоторые из научно-методических положений, обсуждаемых выше. Прежде всего целесообразно рассмотреть методические моменты, связанные с организацией режимных наблюдений, схематизацией природных условий и использованием математических моделей для анализа и прогноза техногенного режима подземных вод при оценке условий разработки месторождений открытым и подземным способом. Полезным представляется рассмотрение сложных гидрогеомеханических процессов, развивающихся на локальных участках вблизи горных выработок или инженерных сооружений. Изучение и прогноз этих процессов базируется на результатах натурных наблюдений и экспериментов в сочетании с интерпретацией их на математических моделях, в частности, в имитационной постановке.

В целом представленный материал фрагментарно отражает специфику гидрогеологических исследований, проводящихся главным образом на стадии строительства и эксплуатации горнодобывающих предприятий. Эти исследования позволяют оценить эффективность и обосновать направленность гидрогеологической разведки на подобных месторождениях.

6.1. Изучение техногенного режима подземных вод при эксплуатации Эстонского сланцевого месторождения *

Эстонское месторождение горючих сланцев эксплуатируется около 70 лет. В настоящее время на его территории действуют 7 шахт и 4 карьера с суммарной производительностью более 30 млн. т сланца в год. Разрабатываемый сланцевый пласт (промпласт) мощностью 2,6—3,4 м приурочен к стратифицированной толще осадочных карбонатных отложений среднего ордовика, представленных известняками, доломитами и мергелем.



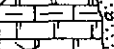
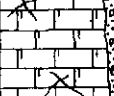
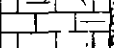
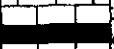

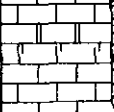
* Раздел написан Ю. А. Норватовым с участием А. Б. Анисимова и О. А. Гребенщиковой.

Рис. 6.1. Литолого-стратиграфическая колонка района Эстонского месторождения горючих сланцев.

Q — почва, торф, пески, суглинки; O_2nb-rk — доломиты, известняки трещиноватые; O_2on — известняки и доломиты глинистые; O_2kl-jh — известняки доломитизированные; O_2ld — известняки, мергели; O_2kk — известняки, горючие сланцы; O_2uh — известняки глинистые, мергели; O_2ls-kp — известняки, доломиты.

лами. Промпласт монокли-нально погружается от выхо-дов на дневную поверхность (по северной границе место-рождения) до глубины 100—120 м на юге разведанной тер-ритории (рис. 6.1). Трещино-ватость пород закономерно уменьшается с погружением пластов, однако на этом фоне фиксируются аномальные зоны интенсивной трещинова-тости, обусловленные тектони-ческими, карстовыми и эрози-онными процессами. Максимально развита трещиноватость на-пластования, а также секущие трещины северо-восточного и се-веро-западного простирания. Покровные отложения представ-лены песчано-глинистыми породами и торфом. На эксплуати-руемой территории прослежены два древних эрозионных вреза (глубиной до 160 м), заполненных ледниковыми песчано-глини-стыми отложениями.

Месторождение приурочено к северным склонам Прибалтий-ского артезианского бассейна. Ордовикский водоносный ком-плекс представлен выделенными по стратиграфическому при-знаку набала-раквереским, кейла-кукрузеским водоносными горизонтами, залегающими в кровле промпласта, и ласнамяэ-кундаским горизонтом, приуроченным к отложениям почвы пром-пласта. Положение водоносных зон и относительно водоупор-ных прослоев комплекса не всегда совпадает со стратиграфиче-скими границами. Проницаемость карбонатных пород изменя-ется в широких пределах (от 0,1 до 700 м/сут). Проводимость водоносного комплекса в целом и отдельных водоносных пла-стов существенно изменяется по площади месторождения при явной тенденции к уменьшению этого параметра от выходов промпласта в южном направлении (в пределах от 1000 до 10 м²/сут). Роль четвертичного водоносного горизонта сводится к регулированию инфильтрационного питания ордовикского во-доносного комплекса. В пределах эрозионных врез, выполнен-

| Ярус | Горизонт | Индекс | Средняя мощность, м | Литологическая колонка |
|--------------|--------------------|------------|---------------------|---|
| | | Q | 10 |  |
| Карадокский | Набала-раквереский | O_2nb-rk | 30 |  |
| | Оандуский | O_2on | 4 |  |
| | Кейла-йыхви-ский | O_2kl-jh | 20 |  |
| Лландейлский | Идавереский | O_2ld | 10 |  |
| | Кукрузеский | O_2kk | 15 |  |
| | Ухакуский | O_2uh | 15 |  |
| Ландверский | Ласнамяэ-кундаский | O_2ls-kp | 25 |  |

ных песчано-глинистыми отложениями, четвертичный водоносный горизонт имеет самостоятельное значение.

Режим подземных вод территории характеризуется их активной связью с атмосферными осадками по всей площади развития ордовикского комплекса. Разгрузка подземных вод в естественных условиях осуществлялась в Финский залив и местную гидрографическую сеть бассейна р. Нарва.

При среднегодовом количестве атмосферных осадков около 700 мм/год их просачивание, по аналогии с Ижорским плато, составляло около 150 мм/год.

Эксплуатация месторождения способствовала существенному изменению водного баланса территории: водоносные горизонты в настоящее время разгружаются в горные выработки, а доля просачивания атмосферных осадков возросла до 300—350 мм/год. Связь подземных и поверхностных вод интенсифицировалась вследствие увеличения проницаемости массива горных пород над подземными горными выработками за счет появления мульд сдвижения на поверхности и снижения напоров водоносных пластов, дренируемых при эксплуатации шахт и карьеров.

По условиям формирования водопритоков в горные выработки в пределах месторождения четко выделяются два района: южный и северный. На территории южного района ордовикский водоносный комплекс представлен полным разрезом, в то время как в пределах северного района в кровле промпласта залегает только кейла-кукрузеский водоносный горизонт. В условиях южного района эксплуатируется шахта «Эстония» и расположены перспективные шахтные поля. На территории северного района находятся подавляющее большинство шахт и карьеров. Ниже остановимся на результатах гидрогеологических исследований применительно к условиям северного района, где техногенный режим подземных вод развивается на большой площади.

Глубина залегания промпласта на территории северного района ограничивается 45—50 м. При моноклиальном падении кейла-кукрузеского водоносного горизонта он представлен одним подгоризонтом в северной части территории (причем трещиноватость карбонатных отложений здесь максимальна); в южной части над промпластом можно выделить два водоносных подгоризонта, разделенных относительным водоупором (рис. 6.2).

Применение камерно-столбовой системы при подземных горных работах определяет ограниченное развитие водопроводящих трещин над выработанным пространством в южной части района, где в кровле горных выработок сохраняются относительные водоупоры. Однако за счет существенного повышения их проницаемости вкrest напластования интенсифицируется гидравлическая связь дренируемых водоносных пластов. В северной части района зона водопроводящих трещин в карбонат-

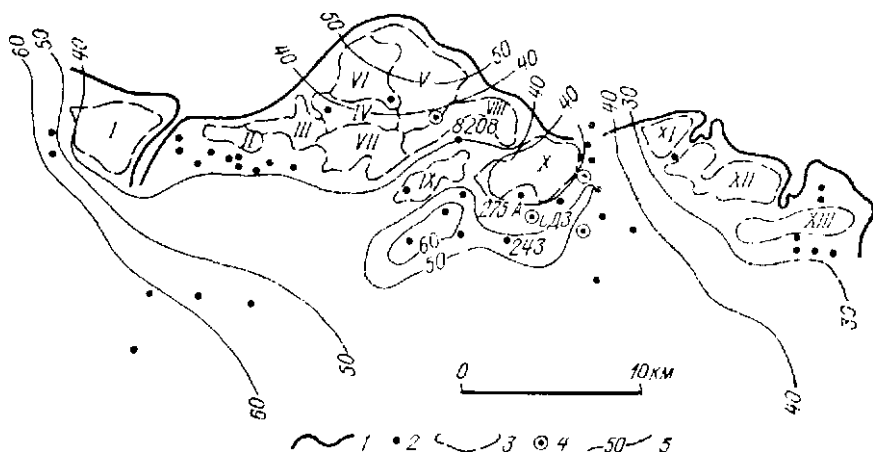


Рис. 6.2. Карта пьезонизогии кейла-кукрузеского водоносного горизонта на 1985 г. со схемой расположения наблюдательных скважин.

1 — граница выхода промпласта под четвертичные отложения; 2 — наблюдательные скважины, оборудованные на кейла-кукрузеский водоносный горизонт; 3 — контуры очистных горных работ по шахтам «Кивныль» (I), «Кохтла» (II), № 2 (IV), № 4 (V), «Кява-2» (VI), «Сомпа» (VII), «Таммику» (VIII), «Виру» (IX), «Ахтме» (X) и по карьерам «Октябрьский» (III), «Вивиконд» (XI), «Сиргала» (XII), «Нарвский» (XIII), 4 — станции с датчиками давления; 5 — пьезонизогиясы (в абсолютных отметках).

ном комплексе развивается практически до земной поверхности (до подошвы покровных отложений).

Водоприток в подземные выработки формируются главным образом за счет атмосферных вод, просачивающихся по площади очистных работ, а также за счет подземных вод, поступающих по контуру этой площади. Водоприток из ласномая-кундаского водоносного горизонта формируются за счет перетекания по площади горных работ и составляют первые проценты в объеме водоотлива предприятий.

Наблюдательные скважины гидрорежимной сети вскрывают всю толщу кейла-кукрузеского водоносного горизонта. Лишь единичные пьезометры оборудованы поинтервально на кейлаский и кукрузеский водоносные подгоризонты (см. рис. 6.2). Вместе с тем эта дифференцированная информация необходима при анализе техногенного режима подземных вод, поэтому по предложению ВНИМИ на некоторых характерных участках территории были оборудованы специальные скважины с датчиками гидростатического давления. Датчики фиксируют напоры в трещинах напластования и относительных водоупорах, залегающих в кровле промпласта (рис. 6.3).

Анализ многолетних гидрогеологических наблюдений позволил установить, что режим кейла-кукрузеского горизонта характеризуется нестационарностью фильтрационных процессов в течение года за счет сезонного изменения инфильтрационного питания на фоне квазистационарности техногенного режима

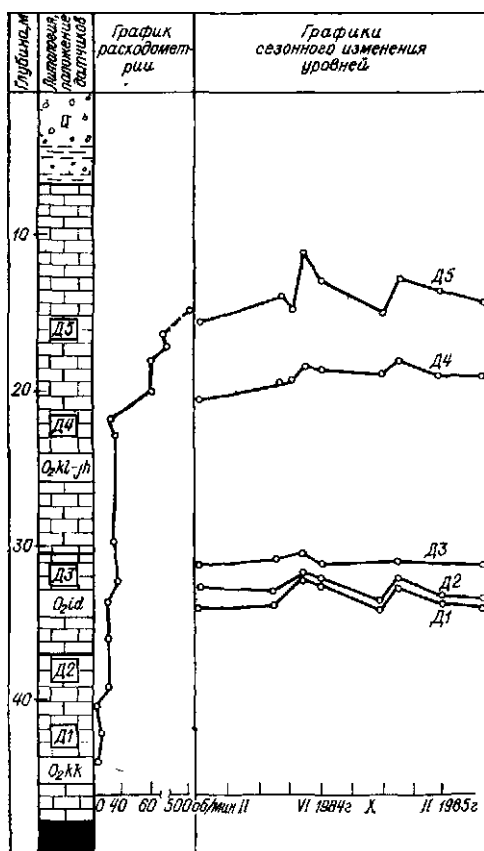


Рис. 6.3. Литолого-стратиграфическая колонка, результаты расходомерии и сезонные колебания напоров подземных вод по станции СДЗ.

подземных вод в многолетнем цикле. Сезонная изменчивость инфильтрационного питания может быть оценена при рассмотрении двух крайних вариантов режима, соответствующих паводковому и меженному периодам (табл. 6.1).

Сложности в оценке условий формирования водопритоков в горные выработки и при анализе уровня режима дренируемых водоносных пластов определяются неравномерностью распределения инфильтрации по площади месторождения, которая является следствием неоднородности ордовикского комплекса по

проницаемости. Усиленное просачивание атмосферных осадков наблюдается непосредственно по площади подземных горных работ за счет развития техногенной трещиноватости в кровле горных выработок. поступления воды с поверхности по техническим и разведочным скважинам, скопления атмосферных вод в мульдах сдвижения. Амплитуды сезонных колебаний уровней подземных вод максимальны непосредственно по площади очных горных работ при постепенном их сокращении к внешним границам воронок депрессии (рис. 6.3 и 6.4).

Как уже было отмечено, в северной части рассматриваемой территории промпласт перекрыт относительно однородной трещиноватой карбонатной толщей, поэтому здесь расчетная гидродинамическая схема отвечает условиям дренирования безнапорного потока с инфильтрационным питанием. В южной части района, где процессы сдвижения горных пород не приводят к нивелированию проницаемости подработанного массива, гидродинамическая схема соответствует дренированию двух пластов, разделенных относительным водупором. В этих условиях инфильтрационное питание по площади воронок депрессии рас-

Таблица 6.1

Водопритоки в шахты и карьеры при эксплуатации
Эстонского сланцевого месторождения за 1980—1985 гг., м³/ч

| Предприятие | Общий водоприток | Водоприток по площади горных работ | Водоприток к контуру горных работ |
|--|---------------------|---|--|
| Шахты: | | | |
| «Кивныли» | 1200 | 700 | 500 |
| | 4200 | 3000 | 1200 |
| «Кохтла» | 950 | 250 | 700 |
| | 2900 | 1400 | 1500 |
| «Сомпа» | 2700 | 2350 | 350 |
| | 7500 | 6100 | 1400 |
| «Таммику» | 2000 | 1900 | 100 |
| | 7000 | 6600 | 400 |
| «Ахтме» | 1700 | 1100 | 550 |
| | 5000 | 4550 | 450 |
| «Виру» | 1000 | 850 | 150 |
| | 2600 | 2450 | 150 |
| Итого по шахтам | 9550 29 200 | 7200 24 050 | 2350 5050 |
| Карьеры: | | | |
| «Октябрьский» | 2700 | 550 | 2150 |
| | 4400 | 2250 | 2150 |
| «Вивиконд» | 800 | — | 800 |
| | 1800 | 1000 | 800 |
| «Сиргала» | 1000 | — | 1000 |
| | 3000 | 2000 | 1000 |
| «Нарвский» | 400 | — | 400 |
| | 1700 | 1300 | 400 |
| Итого по карьерам | 4900 10 900 | 550 6550 | 4350 4350 |
| Всего по северному району месторождения | 14 450 40 100 | 7750 30 600 | 6700 9400 |

Примечание. В числителе — водопритоки в меженные периоды, в знаменателе — в паводковые.

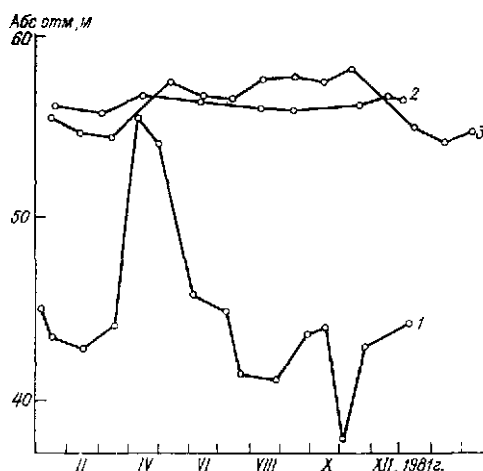


Рис. 6.4 Графики сезонных колебаний уровней кейла-кукрузского водоносного горизонта.

1 — по пьезометру 8208 (вблизи контура подземных горных выработок); 2 и 3 — по пьезометрам 243 и 275-А (вблизи внешней границы депрессии).

пределяется между двумя пластами в зависимости от проницаемости относительно водоупоров.

Анализ условий формирования водопритоков в горные выработки предполагал интерпретацию

режимных наблюдений с целью определения интенсивности просачивания по площади очистных горных работ и параметров питания ордовикского комплекса по площади воронки депрессии с последующим определением фильтрационных параметров дренируемых водоносных горизонтов. Оценка характеристик питания водоносного комплекса и интенсивности просачивания по площади горных работ проводилась путем решения системы балансовых уравнений (5.21) с использованием материалов многолетних наблюдений за режимом подземных вод на месторождении.

Расчеты выполнялись для паводковых и меженных периодов годов с примерно равным количеством атмосферных осадков. Результаты расчетов (рис. 6.5) отражают четкую зависимость: снижение интенсивности инфильтрационного питания дренируемых пластов по мере их погружения в южном направлении. Такая же тенденция фиксируется и при оценке диапазона сезонных изменений инфильтрационного питания ордовикского комплекса.

На рис. 6.6 представлены результаты расчета удельных водопритоков (т. е. интенсивности просачивания атмосферных осадков) по площади очистных горных работ в пределах конкретных шахтных полей; эти характеристики сгруппированы по тому же принципу, что и параметры питания кейла-кукрузского водоносного горизонта. Их распределение по площади месторождения не имеет определенной закономерности, что свидетельствует о комплексном характере этого показателя, отражающего как изменение проницаемости пород кровли при их сдвигении, так и наличие скважин по площади очистных выработок.

Разделение общего притока в шахту на «боковой» приток и поступление непосредственно по площади горных работ позволило установить закономерное снижение доли «бокового» при-

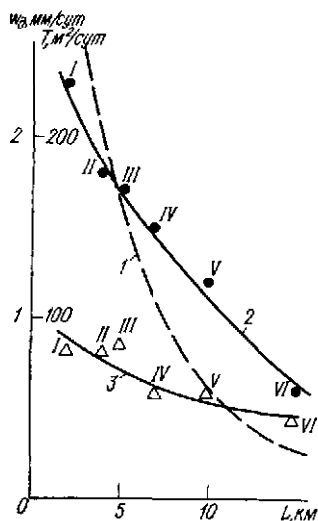


Рис. 6.5. Графики изменения проводимости ордовикского водоносного комплекса (1) и интенсивности его инфильтрационного питания в паводок (2) и в межень (3) в направлении падения промпласта от его северной границы для полей шахт и карьеров «Октябрьский» (I), «Кохтла» (II), «Кивийли» (III), «Сомпа» (IV), «Виру» (V), «Ахтме» (VI).

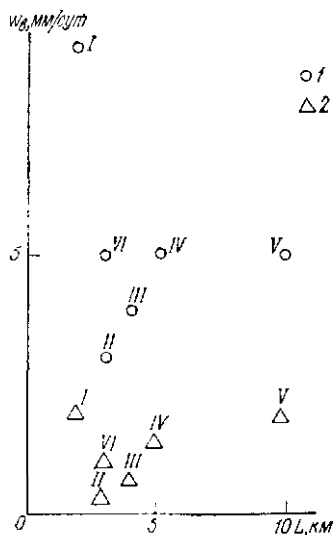


Рис. 6.6. Изменения удельных водопритоков на единицу площади очистных горных работ в паводковый (1) и в меженный (2) периоды для шахт «Таммику» (I), «Кохтла» (II), «Кивийли» (III), «Сомпа» (IV), «Виру» (V), «Ахтме» (VI).

тока по мере увеличения глубины горных работ. Поскольку «боковой» приток формируется за счет дренирования кейла-кукрузеского горизонта, то его интенсивность является критерием влияния горных работ на изменение естественного режима подземных вод. Водопритоки по площади горных работ характеризуют в основном ущерб поверхностному стоку (см. табл. 6.1).

В последние годы ущерб подземным водам северного района месторождения оценивается в 3650 м³/ч в меженный период и 6550 м³/ч в паводковый, что соответствует 40 и 20 % общешахтных притоков в эти периоды. В суммарном водоотливе из карьеров доля подземных вод составляет соответственно (по сезонам) 58 и 28 %.

Выделение «бокового» притока позволило оценить фильтрационные параметры кейла-кукрузеского водоносного горизонта при измеренных его напорах. Для северной части месторождения проводимость ордовикских отложений (кукрузеского водоносного подгоризонта) определена либо аналитически по фор-

мулам (5.22)—(5.23) применительно к выделенным лентам тока, либо на математических моделях, учитывающих сложную конфигурацию границ дренажа (контуров открытых и подземных горных работ). Для участков затрудненной связи кейлаского и кукрузеского подгоризонтов оценка их проводимости и характеристик разделяющего относительного водоупора потребовала применения математического моделирования.

В частности, интерпретация результатов режимных наблюдений на участке шахты «Виру» выполнялась на электрической модели после предварительной аналитической оценки интенсивности питания кейла-кукрузеского водоносного горизонта. В качестве исходных данных использовались напоры, зафиксированные дифференцированно по двум водоносным подгоризонтам на площади горных работ и за ее пределами (рис. 6.7), а также суммарный водопиток в шахту. Интересно отметить, что амплитуды сезонных колебаний уровней нижнего (кукрузеского) подгоризонта на площади горных работ существенно превышают амплитуды сезонных колебаний уровней верхнего (кейлаского) подгоризонта, что объясняется инфильтрационным характером

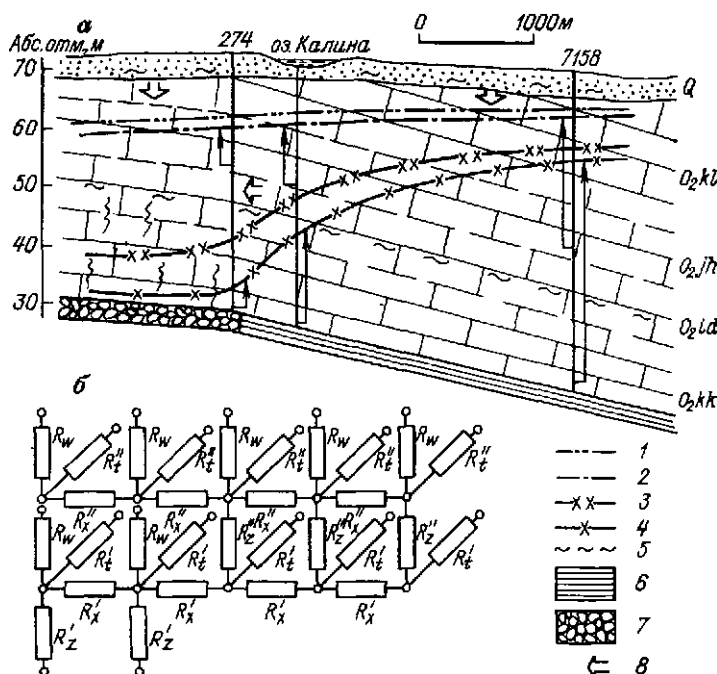


Рис. 6.7. Схема формирования водопитока к горным выработкам шахты «Виру» (а) и структура электрической модели водоносного комплекса (б). 1 и 2 — уровни кейлаского подгоризонта в паводок и в межень; 3 и 4 — то же, для кукрузеского подгоризонта; 5 — относительный водоупор; 6 — промпласт; 7 — выработанное пространство; 8 — направление подземного потока. R_x и R'_x — сопротивления, соответствующие проводимостям водоносных пластов T_1 и T_2 ; R'_t и R''_t — временные сопротивления, соответствующие водоотдачам пластов μ_1 и μ_2 ; R'_z и R''_z — сопротивления, соответствующие характеристикам водоупоров k_{01} и k_{02} ; R_w — сопротивления, имитирующие инфильтрационное питание пластов ω .

питания нижнего подгоризонта при меньшей (по сравнению с верхним подгоризонтом) его гравитационной водоотдаче.

Моделирование обратной задачи проводилось на цепочках электрических сопротивлений (в осесимметричной постановке) по схеме Либманна. Подбор параметров электрической модели осуществлялся в определенном порядке. В первую очередь подбирались параметры кукрузеского подгоризонта с учетом его взаимодействия с кейласким подгоризонтом. Однозначность подбора соотношений электрических сопротивлений контролировалась напорами взаимодействующих подгоризонтов, зафиксированными на ряд расчетных моментов. Аналогичным образом подбирались соотношения сопротивлений модели кейлаского подгоризонта. Затем проводилось масштабирование модели и расчет фильтрационных параметров водоносного комплекса. Контроль параметров кукрузеского и кейлаского водоносных подгоризонтов и относительных водоупоров осуществлялся с привлечением критериев физического правдоподобия (в частности, с учетом параметров, полученных по результатам опытно-фильтрационных работ).

По итогам моделирования установлены следующие фильтрационные параметры:

— проводимость кукрузеского подгоризонта равна $25 \text{ м}^2/\text{сут}$ при водоотдаче $2 \cdot 10^{-4}$ (упругой) и 10^{-2} (гравитационной);

— проводимость кейлаского подгоризонта $50 \text{ м}^2/\text{сут}$ при гравитационной водоотдаче $2 \cdot 10^{-2}$;

— коэффициент фильтрации относительного водоупора (мощностью 10 м), разделяющего водоносные пласты, $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}/\text{сут}$ (в пределах площади очистных работ) и $5 \cdot 10^{-8} \text{ м}/\text{сут}$ (за пределами этой площади);

— коэффициент фильтрации относительного водоупора (мощностью 10 м) в непосредственной кровле горных выработок $10^{-3} \text{ м}/\text{сут}$.

Характеристика питания ордовикского комплекса представлена на рис. 6.8.

Электрическая модель, отвечающая подобранным параметрам, оптимально соответствует поведению реальной гидрогеологической системы в годовом цикле. Оценка чувствительности математической модели свидетельствует о ее

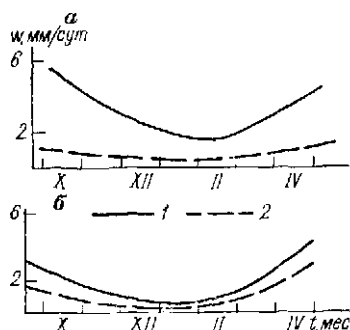


Рис. 6.8. Интенсивность питания кейлаского (а) и кукрузеского (б) водоносных подгоризонтов по площади очистных работ (1) и по воронке депрессии (2).

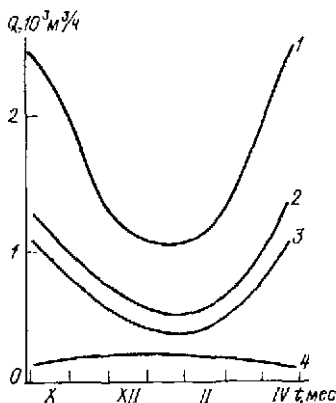


Рис. 6.9. Сезонные изменения баланса водопритоков в очистные выработки шахты «Виру». 1 — общешахтный приток; 2 — водоприток по площади очистных работ за счет перетекания через относительный водоупор; 3 — водоприток по площади горных работ по техническим скважинам; 4 — «боковой» приток к площади горных работ.

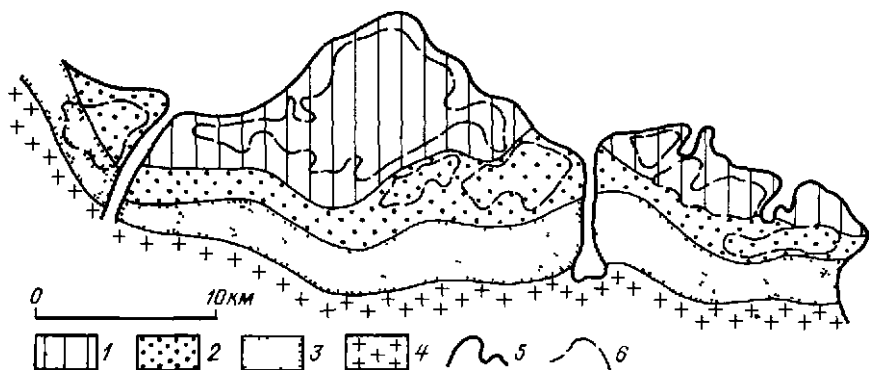


Рис 610 Схема распределения фильтрационных параметров кейла-кукрязского водоносного горизонта по площади Эстонского сланцевого месторождения

1 — зона с проводимостью $T > 100$ м²/сут и интенсивностью инфильтрационного питания $\omega = (1 - 5) \cdot 10^{-4}$ м/сут, 2 — зона с $T = 100 - 50$ м²/сут $\omega < 5 \cdot 10^{-4}$ м/сут и параметром пдавереского водоупора $k_0/m_0 > 10^{-5}$ м/сут, 3 — зона с $T = 50 - 25$ м²/сут и параметром пдавереского водоупора $k_0/m_0 < 10^{-5}$ м/сут, 4 — зона с $T < 25$ м²/сут, 5 — граница выклинивания промпласта, 6 — контуры горных работ

удовлетворительном качестве. Модель позволяет дифференцированию представить баланс водопритока в шахту (рис 69)

Аналогичные исследования на моделях выполнены и для других шахтных и карьерных полей, результаты определения фильтрационных параметров ордовикского комплекса на территории северной части месторождения представлены на рис 610

Идентификация параметров и условий питания ордовикского комплекса по площади месторождения позволила сделать важный практический вывод о незначительном влиянии горных работ на изменение режима четвертичного водоносного горизонта на участке Вазавереской долины, являющейся охраняемым природным комплексом. Кроме того, оценка современного техногенного режима ордовикского комплекса позволяет считать, что процесс затопления погашенных шахт в северной части месторождения стабилизировался, сезонные изменения водопритоков в эксплуатирующиеся шахты «Сомпа» и «Таммику» со стороны затопленных шахт определяются главным образом повышением напоров в водоносных пластах, залегающих в кровле затопленных выработок.

Полученные по результатам режимных наблюдений фильтрационные параметры и характеристики питания ордовикского водоносного комплекса дают возможность прогнозировать водопритоки в горные выработки и уровни подземных вод на период до 2000 г

Прогноз водопритоков в шахты проводился на основании сочетания метода аналогии с математическим моделированием. Водопритоки по площади горных работ оценивались с учетом удельных водопритоков, полученных по данным эксплуатации (табл 6.2). «Боковые» притоки к контуру горных работ опре-

**Прогнозные водоприток в шахты и карьеры при развитии горных работ
на Эстонском сланцевом месторождении**

| Горнодобывающее предприятие | Площадь очистных работ, 10 ³ м ² | Удельный водопристок на единицу площади очистных работ, 10 ³ м ³ /сут | Водопристок по площади очистных работ, 10 ³ м ³ /ч | Интенсивность инфильтрационного питания подземных вод, 10 ³ м ³ /сут | «Боковой» водопристок к горным выработкам, 10 ³ м ³ /ч | Суммарный водопристок в горные выработки, 10 ³ м ³ /ч |
|-----------------------------|--|---|--|--|--|---|
| Шахты: | | | | | | |
| «Ахтме» | 3,9 | <u>1</u> 5 | <u>16</u> 81 | <u>6</u> 6 | <u>6</u> 6 | <u>22</u> 87 |
| «Виру» | 3 | <u>2</u> 5 | <u>25</u> 63 | <u>4</u> 12 | <u>6</u> 9 | <u>31</u> 72 |
| «Сомпа» | 3 | <u>1,5</u> 4,5 | <u>19</u> 57 | <u>6</u> 15 | <u>13</u> 40 | <u>28</u> 97 |
| «Таммику» | 3 | <u>2</u> 9 | <u>25</u> 100 | <u>6</u> 20 | <u>4</u> 10 | <u>29</u> 110 |
| «Кохтла» | 1,5 | <u>0,3</u> 3 | <u>2</u> 18 | <u>8</u> 20 | — | — |
| «Кививыли» | 4 | <u>0,7</u> 4 | <u>16</u> 67 | <u>6</u> 17 | <u>9</u> 16 | <u>25</u> 83 |
| Карьеры: | | | | | | |
| «Октябрьский» | 2,9 | <u>1</u> 10 | <u>37</u> 112 | <u>8</u> 20 | <u>8</u> 11 | <u>45</u> 123 |
| «Вивиконд» | 2 | <u>—</u> 3 | <u>—</u> 25 | <u>7</u> — | <u>9</u> 12 | <u>9</u> 37 |
| «Нарвский» | 2,5 | <u>—</u> 3 | <u>—</u> 31 | <u>5</u> — | <u>4</u> 6 | <u>4</u> 37 |
| «Сиргала» | 4,2 | <u>—</u> 2 | <u>—</u> 35 | <u>6</u> — | <u>10</u> 14 | <u>10</u> 49 |

Примечание. В числителе — показатели на месячный период, в знаменателе — на паводковый.

делялись на моделях с использованием параметров дренируемых кейлаского и кукрузеского подгоризонтов, характеристик их связи и питания с учетом сложной конфигурации контуров дренажа. Моделирование позволило оценить положение уровней этих подгоризонтов при планируемом на 2000 г. продвижении фронта горных работ (рис. 6.11).

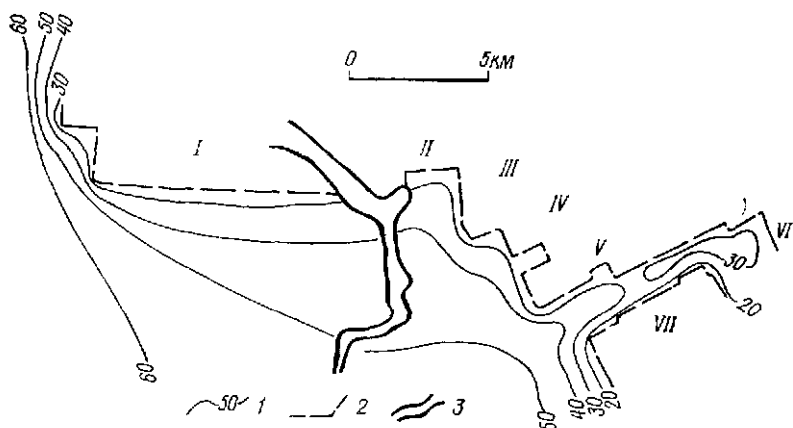


Рис. 6.11. Схематическая карта прогнозных напоров кукрузского водоносного подгоризонта на 2000 г.

1 — изобары водоносного подгоризонта (в абсолютных отметках); 2 — положение контуров горных работ на 2000 г.; 3 — древняя долина.

Предприятия: I — «Кивийли», II — «Октябрьский», III — «Кохтла», IV — «Сомла», V — «Виру», VI — «Ахтме», VII — «Эстония».

Прогноз уровня режима ордовикского комплекса в восточной части месторождения затруднен из-за ограниченного объема исходной информации. Принимая во внимание инфильтрационный характер питания водоносных горизонтов, можно считать, что воронки депрессии на участках карьерных полей будут смещаться параллельно по мере продвижения фронта горных работ.

Для уточнения результатов выполненных исследований и для систематического контроля техногенного режима подземных вод следует расширить сеть пьезометров, располагая их в виде створов с оборудованием раздельно на кейлаский и кукрузский водоносные подгоризонты.

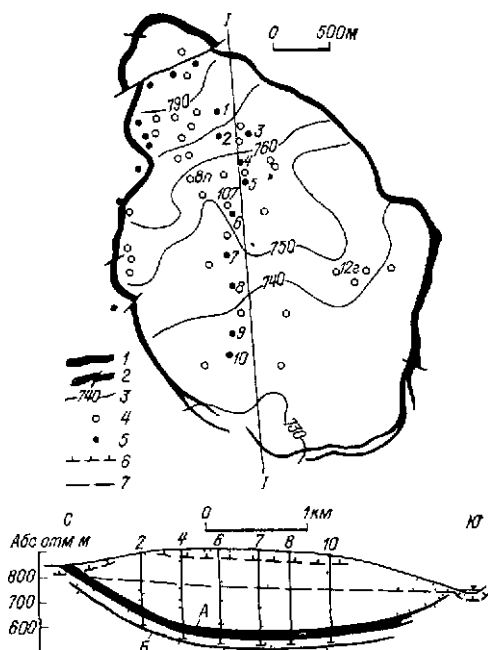
6.2. Изучение гидрогеологических условий освоения Нерюнгринского угольного месторождения *

Нерюнгринское месторождение коксующихся углей является сырьевой базой Южно-Якутского промышленного комплекса, который создается в районе БАМ. В настоящее время начата эксплуатация карьера, производительность которого достигла 12 млн. т угля в год. Геологическое строение месторождения определяется его приуроченностью к синклинали структуре, выполненной отложениями юрского и мелового возраста. Угленосность связана с меловыми отложениями нерюнгринской и холодниканской свит, представленными преимущественно песчаниками при подчиненном содержании алевролитов и конгло-

* Раздел написан И. Б. Петровой и Ю. А. Норватовым.

Рис 6.12 Схематическая карта Нерюнгринского месторождения и разрез по линии 1—1

1 — выходы угольного пласта, 2 — тектонические нарушения; 3 — гидроизогипсы естественного потока, 4 — наблюдательные скважины, 5 — водопопняющие скважины первой очереди, 6 — нижняя граница зоны многолетнемерзлых пород, 7 — положение уровней естественного потока подземных вод.
А — угольный пласт «Мощный»,
Б — пласт «Пятиметровый»



мератов (рис. 6.12). При пологом днище мульды, имеющей протяженность до 6 км и ширину около 4 км, углы падения пород на ее крыльях изменяются от 10 до 30°.

Промышленный пласт угля «Мощный» характеризуется средней мощностью 25 м; максимальная глубина залегания пласта около 300 м. Угленосность также связана с пластом «Пятиметровым», залегающим на 100—120 м ниже пласта «Мощного». Междупластье представлено песчаниками, реже алевролитами или гравелитами. Залегание меловых отложений осложнено многочисленными крутопадающими разрывными тектоническими нарушениями, к которым приурочены зоны повышенной трещиноватости песчаников и пластов угля. В целом по месторождению отмечается резкая неоднородность трещиноватости угленосных отложений. Месторождение расположено в зоне развития многолетнемерзлых пород, которые прослеживаются на 80 % площади месторождения, распространяясь от поверхности на глубину до 160 м.

Гидрогеологические условия эксплуатации месторождения определяются развитием надугольного и подугольного водоносных горизонтов, приуроченных к трещиноватым песчаникам, конгломератам и алевролитам. Надугольный горизонт характеризуется безнапорным режимом, его зеркало залегает под нижней границей мерзлоты. Глубина залегания уровней подземных вод в центральной части мульды составляет около 200 м; мощность безнапорного потока достигает здесь 150 м. Уклон естественного потока подземных вод, ориентированного в южном направлении, составлял примерно 0,01 (см. рис. 6.12).

Проницаемость надугольных песчаников определяется степенью их трещиноватости и характеризуется средними значениями коэффициентов фильтрации около 1 м/сут, однако при-

легающие к тектоническим разломам зоны развития оперяющих трещин отличаются повышенной проницаемостью. Непосредственно зоны разломов зачастую выполнены слабопроницаемыми глинистыми породами, что определяет плановую анизотропию водоносного комплекса. Фильтрационная неоднородность надугольных песчаников проявляется как в плане, так и в разрезе. Максимальной трещиноватостью и соответственно проницаемостью песчаников характеризуется центральная и южная части мульды.

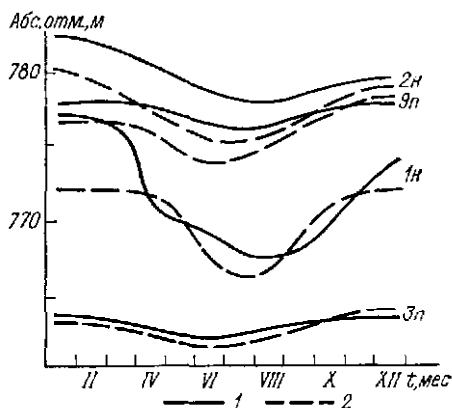
Подугольный водоносный горизонт связан с трещиноватыми песчаниками и алевролитами междупластья пластов «Мощного» и «Пятиметрового». Мощность горизонта в среднем составляет 150 м. Для этих отложений также характерна фильтрационная неоднородность в плане при среднем коэффициенте фильтрации, составляющем 0,8 м/сут. Напоры подугольного горизонта в условиях естественного режима, как правило, превышали напоры надугольного, однако при сезонных колебаниях уровней фиксировалось и обратное соотношение. На участках выходов пород междупластья под четвертичные отложения подугольный горизонт приобретает характер безнапорного потока.

Угольный пласт «Мощный» характеризуется в целом низкой проницаемостью как по напластованию, так и вкрест напластования. На локальных участках развития тектонических нарушений не исключается повышенная проницаемость пласта вкрест напластования.

Питание подземных вод в районе месторождения осуществляется в летний период главным образом за счет инфильтрации атмосферных осадков на участках сквозных таликов, развитых на водоразделах, о чем свидетельствует совпадение планового положения последних с максимальными отметками зеркала подземных вод. Долины рек, окаймляющие месторождение с запада, юга и востока, характеризуются развитием многолетнемерзлых пород, которые определяют затрудненную связь поверхностных и подземных вод. Разгрузка подземных вод в естественных условиях происходила по речным долинам преимущественно в юго-западной части месторождения, где фиксируются многочисленные источники. Результаты режимных наблюдений свидетельствуют о значительных (до 10 м) амплитудах сезонных колебаний уровней подземных вод (рис. 6.13), что, очевидно, связано с малой гравитационной водоотдачей (недостатком насыщения) песчаников, определяемой их трещиноватостью.

Проектом горных работ предусмотрена отработка пласта «Мощного» по падению с северо-западного и западного крыльев мульды. На первых этапах развития горных работ вскрышные породы размещаются во внешних отвалах с последующим переходом к образованию внутренних отвалов на подошве карьера. Гидрогеологические условия отработки пласта «Мощного»

Рис. 6.13. Графики сезонных колебаний уровней надугольного (скважины 1н и 2н, см. рис. 6.14) и подугольного (скважины 3п и 9п) водоносных горизонтов на 1979 г. (1) и на 1980 г. (2).



открытым способом в целом можно оценить как благоприятные, что определяется следующими факторами:

- обводненные надугольные и подугольные отложения представлены крепкими полускальными породами, не склонными к размоканию;

- вскрытие подугольного горизонта горными работами исключает консервацию высоких напоров в лежащем боку месторождения и ограничивает влияние подземных вод на устойчивость бортов карьера;

- ограниченность естественных запасов подземных вод и затрудненная связь подземных вод с реками в северной части месторождения лимитирует водоприток к горным выработкам (прогнозные водоприток оценивались в 300—500 м³/ч).

Осушению водоносного комплекса способствуют следующие геологические факторы:

- дренирование надугольного и подугольного горизонтов стимулируется способностью трещиноватых песчаников к осушению (при малой гравитационной водоотдаче);

- проницаемость пласта «Мощного» не исключает возможность совместного дренирования надугольного и подугольного горизонтов;

- наклонное залегание относительного водоупора способствует повышению эффективности глубинных средств дренажа при развитии горных работ по падению пластов;

- литологический состав осушаемых пород исключает «пескование» дренажных скважин.

В рассматриваемых гидрогеологических условиях при более мягком климате эксплуатация карьера могла бы осуществляться при организации лишь открытого водоотлива. Однако при суровости климата открытый водоотлив с подошвы карьера возможен лишь в течение короткого летнего периода, а в зимнее время эксплуатация карьера может быть существенно затруднена из-за образования наледей на бортах и подошве за счет высачивания подземных вод. Поэтому для обеспечения нормальных условий ведения горных работ и предотвращения дополнительного увлажнения угля необходима организация опережающего глубинного дренажа. В этих условиях первоначаль-

чальным проектом ВИОГЕМ предусматривалось осушение карьерного поля подземным дренажным комплексом. Однако высокие капитальные затраты и лимит времени на сооружение комплекса стимулировали пересмотр этого проектного решения.

В качестве средств глубинного дренажа по предложению ВНИМИ окончательным проектом предусмотрено применение водопонижающих скважин, вскрывающих надугольный и подугольный горизонты со стороны рабочего и нерабочего бортов карьера (см. рис. 6.12). Гидрогеологическое обоснование эффективности водопонижающих скважин связано с повышенными требованиями к исходной информации о параметрах и условиях питания водоносных горизонтов. Для выявления плановой фильтрационной неоднородности водоносного комплекса, параметров взаимосвязи водоносных горизонтов, а также для оценки технической эффективности водопонижающих скважин был организован и проведен крупномасштабный эксперимент — опытно-эксплуатационное водопонижение (ОЭВ).

Для проведения ОЭВ были пробурены две комбинированные скважины (IIп и IVп) глубиной по 365 м и одна скважина, оборудованная на надугольный горизонт (Iн) глубиной 238 м (рис. 6.14). Суммарный дебит трех скважин достигал 90 м³/ч (скважина Iн — 15, IIп — 50, IVп — 25 м³/ч). Наблюдения за

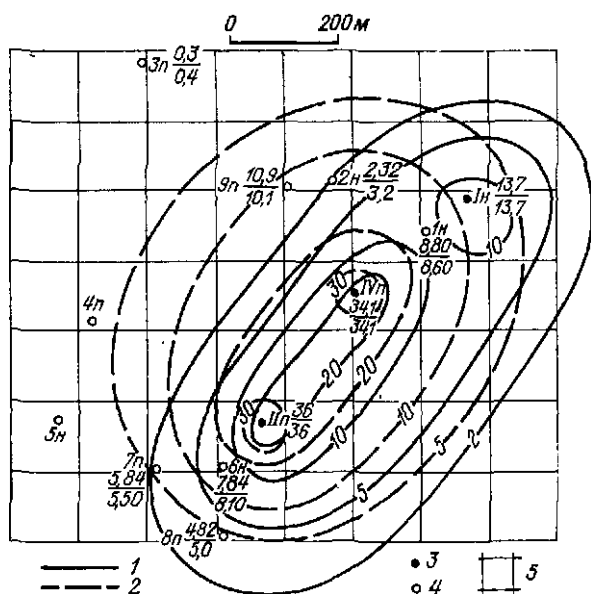


Рис. 6.14. Результаты опытно-эксплуатационного водопонижения на конечной стадии его проведения (2.X.1980 г.).

1 и 2 — линии равных понижений напора надугольного и подугольного водоносных горизонтов; 3 — водопонижающие скважины; 4 — наблюдательные скважины на надугольный (с индексом «н») и подугольный (с индексом «п») горизонты; 5 — разбивка поля фильтрации при электромоделировании водопонижения; цифры у скважин: в числителе — понижения напора в натуре, в знаменателе — на электрической модели.

снижением уровней проводилась по пьезометрам, оборудованным на надугольный (1н, 2н, 6н) и подугольный (7п, 8п, 9п) водоносные горизонты. Водопонижение проводилось в течение трех месяцев (август — октябрь) 1980 г. Снижения напоров по надугольному горизонту достигли 6—10 м, по подугольному — 12 м (рис. 6.14 и 6.15).

При интерпретации результатов ОЭВ исходя из гидрогеологических условий Нерюнгринского месторождения в целом с учетом особенностей рассматриваемого участка анализировалась следующая расчетная гидродинамическая схема. Дренируемый комплекс имеет трехслойное строение: верхний (надугольный) горизонт — безнапорный, ограничен в плане контуром обводненности; нижний (подугольный) — напорный пласт, не ограниченный в пределах области влияния водопонижения; угольный пласт рассматривается как относительный водоупор. Геологическая информация дает основание предположить сопоставимость проводимостей подугольного и надугольного горизонтов при общем снижении проводимости последнего от центра мульды к периферии.

Предварительная интерпретация результатов ОЭВ проводилась аналитическими методами. Поскольку по техническим причинам при проведении ОЭВ не было получено данных о распределении водопритоков по стволам комбинированных скважин IIп и IVп, для расчета использовался метод Джейкоба,

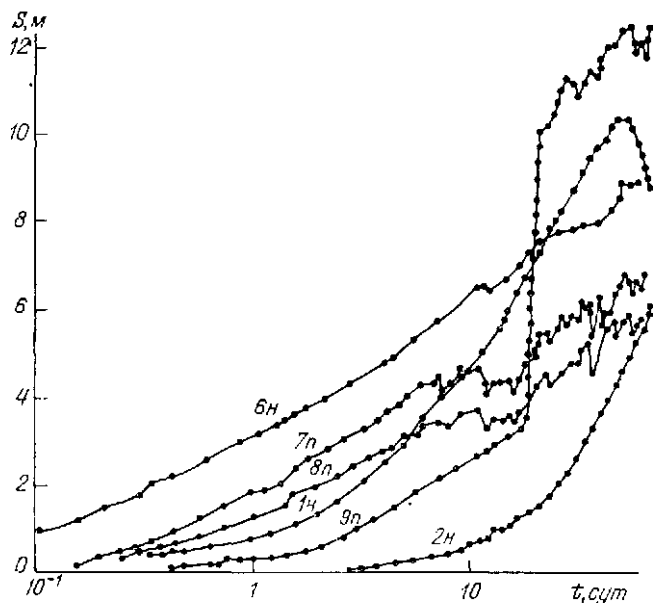


Рис. 6.15. Хронологические графики понижений напоров S надугольного и подугольного водоносных горизонтов при опытно-эксплуатационном водопонижении.

который по истечении некоторого времени позволяет оценить суммарную проводимость обоих горизонтов.

Анализируя результаты водопонижения на качественном уровне, можно отметить, что графики временного прослеживания понижений по подугольному горизонту (см. рис. 6.15) в наблюдательных скважинах 7п и 8п идентичны по форме и могут аппроксимироваться прямой линией; незакономерные отклонения графика от прямой (скважина 9п) вызваны изменениями расхода при откачке. Графики по надугольному горизонту (скв. 6н, 1н, 2н) имеют определенную специфику: форма графика по наблюдательной скважине 6н аналогична форме графиков по скважинам подугольного горизонта; с другой стороны, по скважинам 1н и 2н графики имеют меньший уклон, чем по остальным скважинам (6н, 7п, 8п, 9п). Поскольку скважины 1н и 2н расположены на участке выклинивания надугольного горизонта, меньший уклон графиков может свидетельствовать о заметном уменьшении проводимости этого горизонта вблизи его границы.

Расчет методом Джейкоба проведен для двух периодов водопонижения: первый период — работают две возмущающие скважины 1н и 1п (начальный этап), второй период — к ним подключается скважина 4п. Результаты расчета суммарной проводимости и осредненного коэффициента пьезопроводности опробуемой толщи приведены в табл. 6.3. Суммарная проводимость водоносного комплекса в центральной зоне участка ОЭВ оценивается в 80—85 м²/сут, а по скважинам 1н, 2н, 9п, приуроченным к периферийной северо-восточной части, — в 40 м²/сут. По формуле Дюпюи по паре скважин 7п и 8п получена проводимость 62 м²/сут, а по скважинам 1н и 2н — 10 м²/сут. Можно предположить, что несовпадение результатов расчета суммарной проводимости методами временного и площадного прослеживания определяется плановой неоднородностью опробуемого комплекса. С другой стороны, значительное различие в емкостных характеристиках верхнего и нижнего горизонтов также может быть причиной завышения проводимости, рассчитанной методом Джейкоба на начальных этапах откачки.

По результатам ОЭВ целесообразно ориентировочно оценить гравитационную водоотдачу песчаников исходя из объема осушенных пород и объема воды, отобранной из надугольного водоносного горизонта. При этом трудно учесть роль динамических притоков, поэтому рассчитанное значение коэффициента гравитационной водоотдачи, равное 0,02, следует рассматривать как верхний предел этого параметра.

Проведенные при водопонижении термометрические наблюдения * по пьезометрам, оборудованным на надугольный и под-

* Термометрия выполнена главным гидрогеологом Нерюнгринской ГРП В. В. Номинхановым.

**Результаты расчета фильтрационных параметров
водоносного комплекса в северной части Нерюнгринского
угольного месторождения**

| Номера наблюдательных скважин | Расчетное время, сут | Коэффициенты проницаемости, м ² /сут | | Суммарная проницаемость, м ² /сут |
|-------------------------------------|----------------------------|--|-------------------------|--|
| | | Надугольный горизонт | Подугольный горизонт | |
| Iн | — | — | — | — |
| | 20—60 | $9,2 \cdot 10^3$ | — | 40 |
| 2н | — | — | — | — |
| | 20—60 | $2,7 \cdot 10^3$ | — | 40 |
| 6н | 1—6 | $2 \cdot 10^5$ | — | 90 |
| | 20—60 | $5 \cdot 10^4$ | — | 87 |
| 7п | 1—6 | — | $2 \cdot 10^5$ | 90 |
| | 20—60 | — | $4,5 \cdot 10^4$ | — |
| 8п | 1—6 | — | $1 \cdot 10^5$ | 100 |
| | 20—60 | — | $3,4 \cdot 10^4$ | 91 |
| 9п | 1—6 | — | $6 \cdot 10^7$ | 60 |
| | 20—60 | — | $1,2 \cdot 10^5$ | — |

Примечание. В числителе — параметр, рассчитанный по периоду совместной эксплуатации скважин Iн и IIп с дебитом 14 л/с, в знаменателе — то же, по периоду эксплуатации скважин Iн, IIп и IVп с дебитом 22 л/с.

угольный горизонты (рис. 6.16 и 6.17), позволяют оценить проницаемость относительно «водоупорного» угольного пласта. По этим данным коэффициенты фильтрации водоупора изменяются в пределах от $2,6 \cdot 10^{-4}$ до $1,8 \cdot 10^{-3}$ м/сут.

Для дальнейшего уточнения расчетной гидродинамической схемы и повышения ее достоверности выполнено электрическое моделирование по схеме Либманна, которое дало возможность скорректировать фильтрационные параметры с учетом сложной структуры потока, профильной и плановой неоднородности дренируемого комплекса.

На первом этапе интерпретации проведен анализ результатов эксплуатации отдельных водопонижающих скважин. В частности, на локальных электрических моделях имитировался период параллельной эксплуатации скважин Iн и IIп. В течение первых 20 сут взаимодействием скважин при осушении надугольного водоносного горизонта можно пренебречь в силу ограниченности размеров зон влияния каждой скважины (заметные понижения прослеживаются в этот период в радиусе 200—250 м от скважины Iн при расстоянии между скважинами порядка 600 м). В связи с этим появляется возможность оценить

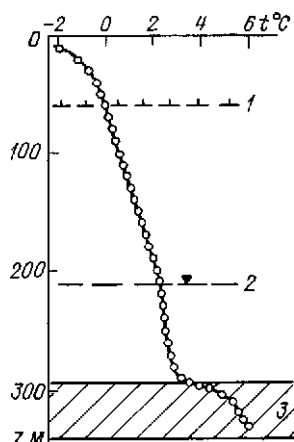


Рис 6.16 Термограмма угленосной толщи по скважине 12г

1 — нижняя граница зоны развития многолетнемерзлых пород; 2 — положение уровней надугольного и подугольного водоносных горизонтов, 3 — угольный пласт «Мощный»

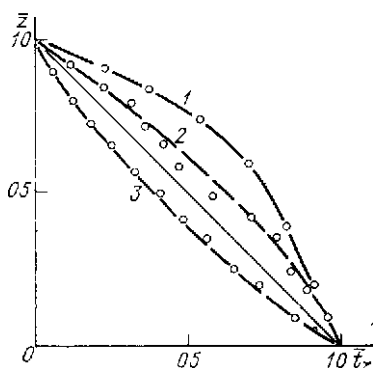


Рис 6.17 Термограммы угольного пласта по пьезометрам 12г (1), 8п (2) и 107 (3)

$\bar{z} = z/m_0$ (z — координата точки в угольном пласте мощностью m_0), $\bar{t}_z = (t_z - t_{\min}) / (t_{\max} - t_{\min})$ (t_{\max} и t_{\min} — температура в подошве и в кровле пласта, t_z — температура в точке с координатой z)

фильтрационные параметры в окрестностях каждой из этих скважин в рамках относительно простых осесимметричных схем. Для локального участка, тяготеющего к скважине 1н, эта схема контролируется данными об изменении уровней в пьезометрах 1п, 2п и 9п. В пределах этого участка за расчетный период (20 сут) наряду со снижением уровней надугольного водоносного горизонта фиксировалось снижение напоров в подугольном горизонте (преимущественно за счет скважины 1п). До начала водопонижения напоры подугольного водоносного горизонта здесь превышали на 4—7 м уровни надугольного горизонта. В процессе водопонижения условия перетекания из подугольного водоносного горизонта в надугольный сохранялись, что учитывалось при моделировании.

Для определения фильтрационных параметров трехслойного комплекса в условиях перетекания с изменяющимися напорами во взаимодействующих горизонтах использовалась методика подбора параметров электрической модели, основанная на последовательном эталонировании и масштабировании расчетной схемы (см. раздел 5.3). По этой методике определены фильтрационные параметры водоносного комплекса в окрестностях скважины 1н и пьезометров 1п, 2п, 9п. проводимость надугольного горизонта $T = 5 \text{ м}^2/\text{сут}$ при водоотдаче $\mu = 10^{-2}$; коэффициент фильтрации угольного пласта вкост напластования $k_0 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/сут}$ (при мощности $m_0 = 25 \text{ м}$). Выявленная прово-

димось водоносного горизонта, очевидно, отвечает средней проницаемости массива надугольных песчаников на участках между отдельными системами трещин. Параметры подугольного водоносного горизонта на этом участке не определялись в силу недостаточно представительной исходной информации о его напорах.

При определении фильтрационных параметров в рассматриваемом варианте оценивался эффективный радиус скважины I_n , который оказался существенно отличным от радиуса бурения. Эффективный радиус водопонижающих скважин определялся на этапе эталонирования модели путем подбора сопротивления R_r между узловыми точками сеточной модели. На этапе масштабирования модели расчетный радиус вычисляется по формуле

$$\ln r_{эф} = \ln r - R_r m_\phi 2\pi T, \quad (6.1)$$

где $r_{эф}$ — эффективный радиус скважины; r — расстояние от узловой точки со скважиной до соседней точки осесимметричного потока; R_r — выбранное на модели электрическое сопротивление между этими точками; m_ϕ — масштаб сопротивлений; T — проводимость пласта.

С учетом этой зависимости эффективный радиус скважины может быть принят равным 25 м. Полученный эффективный радиус, очевидно, отражает наличие системы трещин, имеющих активную гидравлическую связь со скважиной и характеризующихся малым фильтрационным сопротивлением. В пределах этой зоны напоры несущественно отличаются от уровня в самой скважине (в дальнейшем эта закономерность неоднократно отмечалась при работе эксплуатационных скважин). Полученная оценка эффективного радиуса скважины I_n свидетельствует о том, что эта скважина вскрыла зону повышенной трещиноватости. Эффективный радиус водопонижающих скважин как элемент расчетной схемы существенно затрудняет идентификацию модели при обычном дефиците информации о напорах водоносного горизонта по площади его развития. Для комбинированных скважин эти затруднения усугубляются тем, что эффективные радиусы скважины по надугольному и подугольному горизонтам могут быть существенно различными из-за разной трещиноватости надугольных и подугольных песчаников и различной степени глинизации трещин при бурении.

Локальная модель осесимметричного потока позволила оценить роль перетекания в формировании водопритока к скважине I_n : на расчетный момент $t = 10$ сут расход перетекания по площади воронки депрессии составил около 20 % от дебита этой скважины.

Локальная модель использовалась далее для анализа чувствительности расчетной схемы к изменению всех ее параметров. С этой целью проводилось поочередное изменение

параметров модели с последующим ее возвращением в исходное состояние. Наиболее высокой чувствительностью при изменении параметров характеризуется пьезометр 1н. В максимальной степени схема-модель чувствительна к изменению проводимости, причем по всем расчетным точкам отмечается близкая чувствительность по этому параметру. В минимальной степени схема чувствительна к изменению коэффициента фильтрации относительного водоупора и водоотдачи, причем чувствительность по этим параметрам резко падает по мере удаления расчетных точек от водоупонизающей скважины. Анализ чувствительности свидетельствует об удовлетворительной точности определения параметров надугольного водоносного горизонта на рассматриваемом участке.

Локальная модель осесимметричного потока рассматривалась также при анализе водоносного комплекса на участке расположения скважины IIп и пьезометров 6н, 7п, 8п. До начала водоупониза на этом участке напоры надугольного горизонта на 3—5 м превышали напоры подугольного.

Масштабирование модели производилось исходя из суммарного водоотбора по надугольному и подугольному горизонтам. В связи с этим следует отметить, что при неизвестном распределении расходов по взаимодействующим горизонтам моделирование является наиболее эффективным средством для оценки фильтрационных параметров. По результатам моделирования участок расположения скважины IIп характеризуется следующими параметрами: проводимости подугольного и надугольного горизонтов примерно одинаковы (около $35 \text{ м}^2/\text{сут}$); водоотдача надугольного горизонта $\mu = 10^{-2}$, водоотдача подугольного горизонта $\mu = 10^{-3}$; коэффициент фильтрации вкост напластования угольного пласта $k_0 = 10^{-2} \text{ м/сут}$ (при мощности $m_0 = 25 \text{ м}$).

Таким образом, проводимость надугольного водоносного горизонта на участке расположения скважины IIп оказывается более высокой, чем на участке расположения скважины 1н, что свидетельствует о плановой фильтрационной неоднородности этого горизонта. Эффективный радиус скважины IIп по надугольному и подугольному горизонтам определен равным 2,5 м, т. е. существенно меньшим, чем по скважине 1н.

Для надугольного горизонта максимальная чувствительность фиксируется по гравитационной водоотдаче и проводимости, для подугольного горизонта — по коэффициенту фильтрации относительного водоупора. Оба горизонта характеризуются высокой чувствительностью к изменению эффективного радиуса скважины IIп.

Уточнение параметров надугольного и подугольного водоносных горизонтов, а также параметров их взаимосвязи проведено на общей плановой сеточной модели при анализе всего периода эпинноза (100 сут). Первоначальные параметры плановой модели отражали результаты аналитических расчетов и моделирования локальных участков.

Внешние границы плановой модели соответствовали контурам выхода водоносных горизонтов под покровные отложения на северо-западном и северо-восточном крыльях мульды, южная граница моделируемой области отвечала размерам зоны влияния водопонижения. Внешние границы трактовались как непроницаемые контуры; на участках выхода подугольного горизонта под покровные отложения задавалась гравитационная водоотдача песчаников. Надугольный и подугольный горизонты моделировались с учетом их связи через относительный водупор. Границами дренажа являлись водопонижающие скважины, охарактеризованные расходами и эффективными радиусами, полученными при анализе локальных моделей.

Сеточная модель по каждому из взаимодействующих горизонтов содержала 160 узловых точек. Центральная часть моделируемой области (где расположены водопонижающие скважины и пьезометры) предварительно была разделена по квадратной сетке с размерами сторон 125×125 м (см. рис. 6.14); периферийные участки поля фильтрации представлены более крупной разбивкой (250×250 м). Моделирование периода эпигноза проводилось по схеме Либманна с шагом по времени 10 сут. Выбранная дискретность по времени обеспечивает точность определения функций понижения на модели для рассматриваемой гидродинамической схемы на уровне 2—5 % (по абсолютной погрешности) для удаленных от скважин участков и на уровне 1—2 % для участков, тяготеющих к границе дренажа. Идентификация плановой модели выполнялась по методике, применявшейся при решении одномерных осесимметричных задач, т. е. при определении параметров вначале проводилось эталонирование модели по надугольному и подугольному горизонтам, а затем — масштабирование модели в целом по известным дебитам водопонижающих скважин. В результате коррекции плановой модели выявлена определенная зональность в распределении проводимости надугольного горизонта (рис. 6.18), которая соответствует закономерному снижению мощности этого безнапорного водоносного горизонта от центральной части мульды к ее краевым частям.

Моделирование всего периода эпигноза при переменных дебитах водопонижающих скважин в совокупности с анализом результатов моделирования по отдельным этапам водопонижения позволило за счет корректировки параметров модели методом итераций уточнить гравитационную водоотдачу надугольного горизонта ($\mu = 2 \cdot 10^{-2}$), упругую водоотдачу подугольного горизонта ($\mu = 3 \cdot 10^{-3}$) и проницаемость угольного пласта вкрест напластования ($k_0 = 10^{-2}$ м/сут при мощности $m_0 = 25$ м). Проводимость подугольного горизонта составляет в среднем около 30 м²/сут (пласт рассматривался как квазиоднородный в пределах рассматриваемой области). Проведенный анализ чувствительности плановой модели свидетельствует о подтверждении выводов, сделанных при анализе локальных моделей в от-

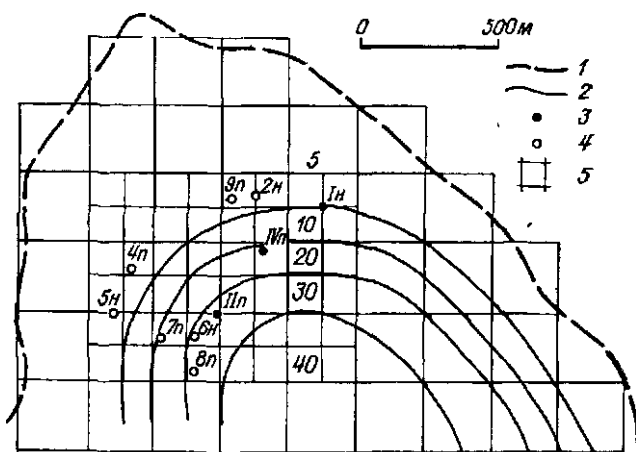


Рис. 6.18. Фильтрационная неоднородность надугольного водоносного горизонта на участке проведения опытно-эксплуатационного водопонижения. 1 — граница обводненности надугольных песчанников; 2 — границы зон фильтрационной неоднородности (проводимость, $\text{м}^2/\text{сут}$); 3 — водопонижающие скважины; 4 — пьезометры; 5 — разбивка поля фильтрации при подготовке модели.

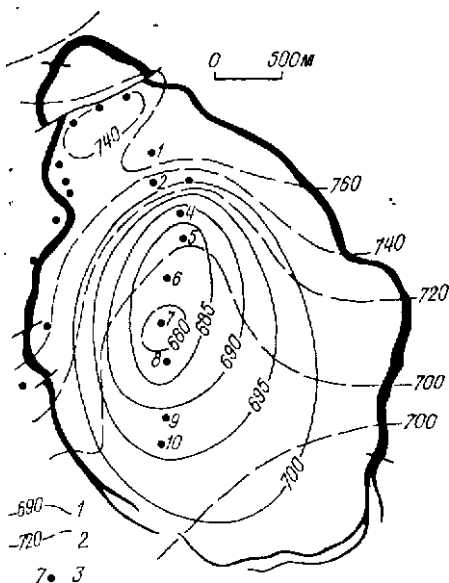
ношении отдельных элементов расчетной схемы стратифицированного водоносного комплекса.

Моделирование опытно-эксплуатационного водопонижения на плановой модели позволило полностью использовать весь объем исходной гидрогеологической и геологической информации об объекте.

Проведенные исследования подтверждают эффективность электрического моделирования прежде всего как инструмента гидрогеологической схематизации. В данном случае моделирование наряду с выявлением неоднородности в плане позволило обосновать параметры взаимосвязи водоносных горизонтов и их емкостные характеристики, т. е. наиболее сложные для оценки элементы расчетной гидродинамической схемы. Вместе с тем следует отметить, что ограниченность исходных данных, полученных при выполнении рассмотренного опытно-эксплуатационного водопонижения, не позволила провести более обстоятельный анализ результатов решения обратной задачи, в частности исследовать некорректность этой задачи с оценкой возможных погрешностей параметров.

Результаты проведенного моделирования дали возможность произвести прогнозные оценки техногенного режима, согласно которым опережающее осушение рабочих забоев и подошвы карьера может быть достигнуто при постепенном вводе в работу двух рядов скважин со стороны рабочего и нерабочего бортов карьера, что обеспечит его эксплуатацию в течение 17 лет. Гидрогеологическое обоснование системы осушения, проведенное ВНИМИ, легло в основу проекта, составленного

Рис. 6.19. План пьезонизогипс водоносного комплекса при эксплуатации первой очереди водопонижающих скважин (1986 г.).
1 и 2 — изопьезы надугольного и подугольного водоносных горизонтов;
3 — водопонижающие скважины.



ВНОГЕМ. В настоящее время на карьере ведется эксплуатация первой очереди водопонижающих скважин, которая в целом подтверждает прогнозные оценки.

Суммарная производительность дренажной системы достигла к 1986 г. 1000—1500 м³/ч при 20 одновременно работающих скважинах. Дебит отдельных скважин достигает 200 м³/ч. За пять лет эксплуатации скважин уровни надугольного горизонта снижены на 65—70 м, а в подугольном понижения изменяются от 20 до 40 м (рис. 6.19). Результаты эксплуатационного водопонижения в совокупности с данными режимных наблюдений по сети пьезометров позволяют создать постоянно действующую модель этого объекта, с помощью которой можно уточнить фильтрационные параметры и условия питания водоносного комплекса, оптимизировать мобильную систему водопонижающих скважин, увязать режим работы водозабора, расположенного в южной части месторождения, и дренажных скважин системы осушения. В настоящее время такая модель подготовлена ВНИМИ совместно с сотрудниками Нерюнгринской ГРП.

6.3. Прогноз техногенного режима подземных вод при проектировании Березовского карьера в Канско-Ачинском угольном бассейне *

Березовское буроугольное месторождение, являясь одним из крупнейших в Канско-Ачинском бассейне, предназначено к разработке открытым способом. В настоящее время ведется строительство карьера «Березовский-1» производительностью 50 млн. т угля в год; проектная глубина карьера 100—130 м. Проект был выполнен Гипрошахтом, по заданию которого во ВНИМИ проводились специальные исследования на электрических моделях с целью гидрогеологического обоснования системы дре-

* Раздел написан Ю. А. Норватовым с участием О. А. Гребенщицкой.

нажа карьерного поля. Эти исследования включали оценку эффективности и определение параметров отдельных элементов дренажной системы, а также оценку прогнозных водопритоков к системе дренажа и изменений уровней подземных вод в процессе ее эксплуатации. Особо рассматривался вопрос о влиянии дренажных мероприятий на условия водоснабжения района.

Геологическое строение месторождения характеризуется развитием угленосных отложений юрского возраста, представленных переслаиванием песчаников, алевролитов, аргиллитов и пластов угля (рис. 6.20). Для угленосной толщи характерна фациальная изменчивость отложений как в плане, так и в разрезе. Промышленный пласт угля («Березовский») мощностью до 55 м приурочен к мульдобразной структуре; участок первоочередной отработки характеризуется углами падения пластов 4—7° в северном и северо-восточном направлениях. Угленосная толща перекрыта четвертичными отложениями, представленными суглинками и аллювиальными песчано-галечниковыми породами. На отдельных участках выходов угольного пласта под четвертичные отложения развиты сильно трещиноватые «горелые» породы. В почве угольного пласта залегает пачка алевролитов мощностью до 10 м, подстилаемая пластом разнородных песчаников мощностью 60—80 м.

Гидрогеологические условия месторождения определяются развитием четвертичного, надугольного, угольного и подугольного горизонтов. Водовосный горизонт четвертичных отложений связан с песчано-галечниковыми отложениями речных долин и имеет локальное распространение по площади месторождения. Мощность аллювиальных отложений (при коэффициентах фильтрации 15—25 м/сут) изменяется от 2 до 15 м в долинах рек Урюп и Береш. На участке первоочередного вскрытия пласта мощность аллювиальных отложений составляет 10—15 м. Зер-

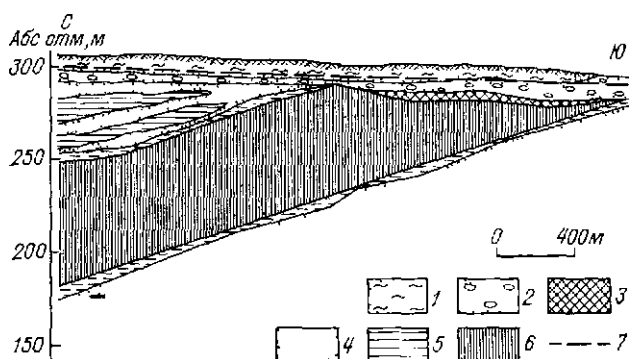


Рис. 6.20 Геологическое строение Березовского буроугольного месторождения (меридиональный разрез по участку первоочередной отработки).

1 — супеси, суглинки; 2 — аллювиальные песчано-галечниковые отложения; 3 — «горелые» породы; 4 — песчаники; 5 — алевролиты, аргиллиты; 6 — угольный пласт «Березовский»; 7 — уровень подземных вод.

кало грунтовых вод залегает на глубинах от нуля на пойменных участках до 20 м на водоразделах.

Надугольный и подугольный водоносные горизонты связаны с песчаниками и алевролитами, коэффициенты фильтрации которых изменяются от 0,2 до 3 м/сут. Угольный водоносный горизонт, определяющий условия обводненности разреза, связан с промышленным пластом «Березовский», характерной особенностью которого является закономерное уменьшение трещиноватости и проницаемости по мере погружения (рис. 6.21). Подобная закономерность характерна для ряда месторождений Канско-Ачинского бассейна.

Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков по площади развития выделенных горизонтов; разгрузка подземных вод происходит по долинам рек. В западной части месторождения угольный пласт перекрыт обводненными песчано-галечниковыми отложениями на полосе шириной до 2 км; здесь проявляется непосредственная гидравлическая связь четвертичного и угольного водоносных горизонтов.

В силу фациальной изменчивости угленосных отложений выделенные в разрезе водоносные горизонты при усиленном их дренировании образуют единую гидравлически связанную систему — неоднородный в разрезе безнапорный комплекс с переменной проводимостью в плане. Относительно низкая проницаемость отложений, залегающих в почве угольного пласта, позволяет считать их условным водоупором при рассмотрении локальных задач. Однако при анализе региональных фильтрационных процессов подугольный водоносный горизонт приходится рассматривать как элемент единого водоносного комплекса.

Качество гидрогеологической разведки месторождения составляет желать лучшего: количество опытных опробований

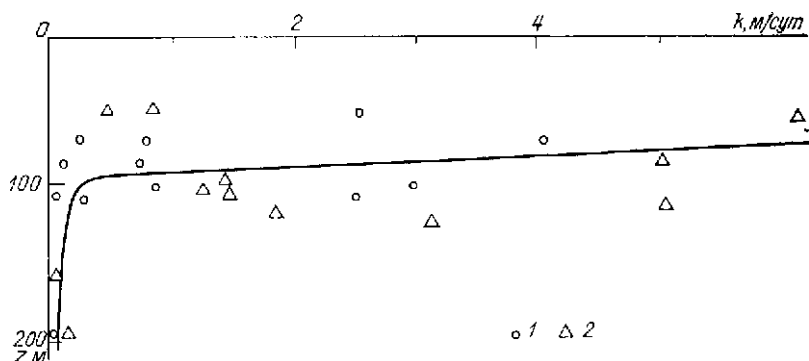


Рис. 6.21. Изменение коэффициента фильтрации угольного пласта k в зависимости от глубины его залегания z по Березовскому (1) и Урюпскому (2) буроголовым месторождениям.

водоносных горизонтов, техника их выполнения и интерпретация не соответствуют современным требованиям к изученности объекта, на котором планируется проведение широкомасштабных дренажных мероприятий. В частности, четвертичный водоносный горизонт был опробован тремя кустовыми и пятью одиночными откачками, надугольный — одной кустовой и одной одиночной, угольный — четырьмя кустовыми и несколькими одиночными, подугольный — четырьмя кустовыми откачками. В этих условиях выбор расчетных значений фильтрационных параметров для прогнозных оценок (табл. 6.4) выполнен с привлечением информации по разведке аналогичных месторождений бассейна (Итатского, Урюпского), а также с использованием опыта эксплуатации карьеров «Ирша-Бородинский» и «Назаровский».

Таблица 6.4

Расчетные значения фильтрационных параметров водоносных горизонтов для прогноза условий дренирования Березовского месторождения

| Водоносный горизонт | Мощность, м | Фильтрационные параметры | | | |
|---------------------|-------------|-----------------------------------|---|-------------------------------|------------|
| | | Проводимость, м ² /сут | Коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности), м ² /сут | Коэффициент фильтрации, м/сут | Водоотдача |
| Четвертичный: | | | | | |
| зона 1 | 8 | 200 | 1300 | 25 | 0,15 |
| зона 2 | 6 | 90 | 600 | 15 | 0,15 |
| Надугольный | 60 | 60 | 2200 | 1 | 0,03 |
| Угольный | 60 | 2—90 | 36—1800 | 0,03—1,5 | 0,05 |
| Подугольный | 75 | 15 | 750 | 0,2 | 0,02 |

Для обеспечения нормального развития горных работ и снижения влажности угля проектом предусмотрено опережающее осушение обводненных пород контурной системой водопонижающих скважин на стадии строительства разреза, а в период его эксплуатации осушение поля разреза осуществляется подземным дренажным комплексом — системой дренажных штретков, пройденных в почве угольного пласта из двух шахтных стволов в направлении к выходам пласта под четвертичные отложения.

Для интенсификации осушения угольного пласта и надугольных песчаников из штретков проектом предусмотрено бурение горизонтальных и восстающих скважин, а также оборудование сквозных фильтров на надугольные песчаники и аллювиальные отложения. На подошве карьера по проекту организуется система водоотвода со сбросом карьерных вод в подземные выработки. При подходе горных работ к поймам рек Урюп и Береш

запланировано сооружение барража в аллювиальных отложениях.

Прогнозные оценки процесса осушения обводненной толщи осложняются следующими факторами:

- сложными очертаниями области фильтрации в плане;
- фильтрационной неоднородностью осушаемого комплекса в плане и в разрезе;
- нелинейным характером фильтрации, который обусловлен существенным изменением мощности потока во времени и в плане и связан с уклоном относительного водоупора в подошве угольного пласта.

Эффективность подземного дренажного комплекса зависит прежде всего от размеров и конфигурации так называемых дренажных панелей, т. е. участков водоносного пласта (комплекса) в плане, околнуренных дренажными шtreками. Скорость снижения напоров в пределах дренажной панели зависит также от уклона водоупора, нелинейности процесса безнапорной фильтрации, фильтрационной неоднородности угольного пласта.

Влияние каждого из этих факторов на процесс осушения угленосного комплекса было проанализировано по результатам решения на электрических моделях серии специальных тестовых задач, отражающих условия рассматриваемого объекта. Результаты моделирования можно свести к следующим выводам.

1. Сравнительно небольшой уклон водоупора ($\alpha \approx 5^\circ$) в основании дренируемой толщи существенно сказывается на скорости осушения прямоугольных дренажных панелей. Наиболее ощутимое влияние этого уклона водоупора проявляется при отношениях размеров панелей $b/l \leq 0,5$, поэтому панели целесообразно ориентировать длинной стороной по падению угольного пласта.

2. Угленосный комплекс целесообразно осушать дренажными панелями трапециевидальной формы с углами разворота боковых контуров $30-45^\circ$ и с отношением осевых размеров $b/l = 0,2$. Скорость осушения такой панели эквивалентна скорости осушения квадратной панели ($b/l = 1$), однако в последнем варианте протяженность дренажных шtreков оказывается на 25—30 % больше, чем в первом. Учет уклона водоупора ($\alpha = 5^\circ$) не меняет этого вывода.

3. Пренебрежение нелинейным характером процесса осушения угленосного комплекса приводит к завышению прогнозируемой скорости снижения напоров в 3—10 раз (с учетом уклона водоупора) и завышению скорости перемещения границы обводненности по наклонному водоупору в 20—30 раз.

4. Фильтрационная неоднородность угольного пласта существенно влияет на выбор положения дренажного контура относительно линии выхода пласта под четвертичные отложения. Выполненное на электрических моделях моделирование, учитывающее экспоненциальный характер изменения проводимости и водоотдачи угольного пласта по мере его погружения, позволяет определить оптимальное положение дренажного контура в зависимости от требуемого снижения напора на выходе пласта.

Результаты локального моделирования позволили обосновать совместно с Гипрошахтом оптимальные размеры трапециевидальных дренажных панелей, которые были приняты равными 2×2 км (при первоначальном варианте $0,4 \times 0,8$ км). Таким образом, моделирование дало возможность обоснованно сократить сроки и капитальные затраты на строительство запроектированного подземного дренажного комплекса.

Кроме того, результаты проведенных исследований на локальных моделях позволили проанализировать роль различных факторов, осложняющих процесс фильтрации, и подойти к гидрогеологической схематизации при обосновании региональных моделей.

Для определения эффективности водопонижающих скважин, предназначенных для обеспечения строительства разрезной траншеи, рассматривалась профильная модель, учитывающая наличие песчано-галечниковых отложений, перекрывающих угольный пласт; для оценки наиболее «жестких» условий проницаемость углей в вертикальном направлении принималась существенно меньшей (в 10 раз), чем в горизонтальном. Моделирование выполнялось на сеточной двумерной емкостной модели в нелинейной постановке. Два параллельных ряда дренажных скважин моделировалось с помощью дополнительных контурных сопротивлений [41] при заданных максимальных понижениях в скважинах. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что четвертичный водоносный горизонт может быть полностью осушен между рядами скважин через 2 мес после их включения. Водоотбор из угольного пласта компенсируется перетоком из четвертичного горизонта на полосе 50—100 м. Удельные водопритоки к контурной установке (двусторонние) составят 1 м³/ч через 2 мес ее работы.

Далее эффективность группы водопонижающих скважин была рассмотрена на плановой емкостной модели, представленной 460 узловыми точками, 60 из которых отвечают однослойному строению комплекса (угольный и четвертичный горизонты представляют собой гидравлически единый поток), а 400 соответствуют двухслойной системе (угольный и четвертичный горизонты связаны лишь по скважинам, т. е. рассматриваются как самостоятельные напорные системы). Общая площадь моделируемого участка составила 2,5×2,5 км. На плановой модели установлено, что при эксплуатации 8 водопонижающих скважин при среднем дебите 15 м³/ч в течение 3—4 мес уровни в угольном пласте окажутся на 10—12 м ниже его кровли (на участке вскрытия).

Фактическая эксплуатация оборудованных согласно проекту водопонижающих скважин в течение 2 лет показала, что при суммарном водопритоке к 8 скважинам и к зумпфу на подошве разрезной траншеи, составляющем 120—360 м³/ч, уровни внутри дренажного контура снизились на 8—10 м. Результаты проведенного опытно-эксплуатационного понижения позволили уточнить фильтрационные параметры угольного пласта и четвертичных отложений. Среднее значение коэффициента фильтрации углей (1,7 м/сут) и песчано-галечниковых отложений (13 м/сут) определены на сеточных моделях при моделировании задачи в квазистационарной постановке. Водоотдача песчано-галечниковых отложений ($\mu=0,17$) определена по схеме Либманна (при заданной водоотдаче углей $\mu=0,05$).

В дальнейшем на региональной сеточной модели проведен комплекс исследований, связанных с прогнозом изменений режима подземных вод в районе месторождения, с уточнением водопритоков к запроектированной системе осушения на 20-летний период. Обоснование региональной модели потребовало проведения тщательного анализа геологических и гидрогеологических материалов, а также решения ряда вспомогательных задач. Региональная модель характеризуется следующими внешними границами (рис. 6.22):

— на северо-западе и севере за границу питания приняты контуры рек Урюп и Береш;

— юго-восточная граница модели принята в виде непроницаемого контура, так как дреназирующее действие системы осушения не достигает этой границы в течение прогнозируемого периода;

— южная граница проводится по выходам слабопроницаемых подугольных отложений под четвертичные отложения.

Моделируемая площадь водоносного комплекса составила 12×15 км. Четвертичный, надугольный, угольный и подугольный горизонты рассматривались как единая гидравлически

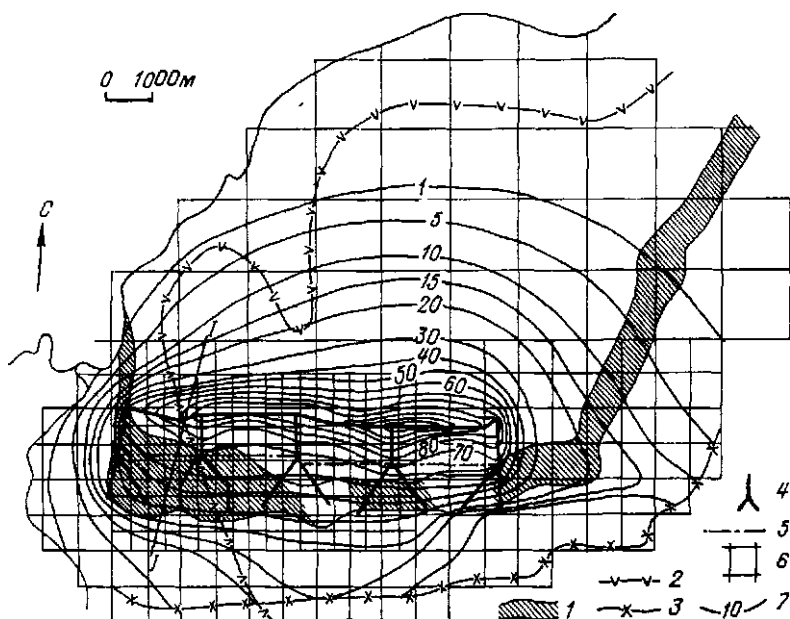


Рис. 6.22. Прогноз понижений уровней угольного водоносного комплекса на 10-й год эксплуатации проектируемого карьера «Березовский-1».

1 — выход угольного пласта под четвертичные отложения; 2 — границы развития аллювиальных отложений; 3 — положение границы угольного водоносного комплекса; 4 — проектируемые дренажные штреки; 5 — проектное положение фронта добычных горных работ на 10-й год эксплуатации карьера; 6 — разбивка поля фильтрации при моделировании; 7 — линии прогнозируемых равных понижений уровней угольного водоносного комплекса, м.

связанная система; в процессе моделирования учитывалась нелинейность первого рода (по проводимости и водоотдаче) и второго рода (перемещение границы обводненности угольного пласта). На дренажных штреках задавались условия первого рода (постоянное понижение), соответствующее отметкам выработок на различных участках (с учетом уклона подошвы пласта). Для определения дополнительных фильтрационных сопротивлений, учитывающих несовершенство выработок, дренирующих неоднородную в разрезе фильтрующую толщу, а также с целью определения «активной мощности» подугольного горизонта, решена серия профильных задач на сеточных и бумажных моделях.

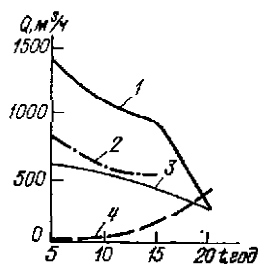
Разбивка поля фильтрации принята неравномерной: сетка $\Delta x_1 = \Delta y_1 = 375$ м — в пределах карьерного поля и сетка $\Delta x_2 = \Delta y_2 = 1500$ м — на периферийных участках (см. рис. 6.22). Задача решалась по схеме Либманна с постепенным укрупнением шага по времени. Согласно приближенным оценкам максимальные вычислительные погрешности в определении прогнозных уровней характеризуются абсолютными приведенными значениями, не превышающими 2—3 %. Моделирование осуществлялось в потенциальных функциях понижений, отсчитываемых от естественных уровней, что позволяло учитывать наличие инфильтрации и компенсировало погрешности в оценке первоначального распределения уровней. На каждом шаге по времени производились подбор сопротивлений сетки модели в соответствии с изменяющейся проводимостью (число итераций на первом шаге равно 5, а на последующих шагах — 2—3), а также изменение временных сопротивлений в соответствии с перемещением депрессионной поверхности потока подземных вод. Согласно проекту с 5-го года эксплуатации дренажных штреков на них проходятся сквозные фильтры, которые на модели учитывались переменными дополнительными сопротивлениями.

В процессе моделирования контролировались условия на границе модели, соответствующей контуру рек; проблематичность задания на этом контуре условий первого рода вынуждала на каждом шаге по времени просматривать другой альтернативный вариант — непроницаемый контур. Расхождения в потенциалах (до 6 %) вблизи этой границы (в крайних вариантах) наблюдались лишь на 15-й и 20-й годы эксплуатации дренажной системы, что свидетельствует о возможности принятия любой из этих схем.

В результате моделирования установлено, что эксплуатация дренажной системы приведет к развитию региональной депрессии, вытянутой в широтном направлении (см. рис. 6.22); размеры депрессии (понижения напоров более 1 м) на 5-й год эксплуатации дренажной системы достигнут $14,5 \times 8,5$ км, а на 20-й — $16 \times 9,5$ км; средняя скорость движения границы депрессии составляет 70 м/год. Ощутимого взаимодействия за-

Рис. 6.23. Графики прогнозируемых притоков подземных вод к дренажному комплексу карьера «Березовский-1».

1 — суммарный приток подземных вод в подземный дренажный комплекс; 2 и 3 — притоки подземных вод в дренажные выработки шахт № 2 и № 1; 4 — приток подземных вод в карьер.



проектированной системы осушения карьера «Березовский-1» и проектируемой системы осушения соседнего Урюпского карьера не ожидается. Понижения уровней на 5 м можно считать «критическими» с позиций использования четвертичного водоносного горизонта как источника водоснабжения; на 5-й год эксплуатации системы дренажа эти понижения фиксируются на площади 13,5×6,5 км, а на 20-й — 15×7,5 км. Дренаж карьерного поля не окажет существенного влияния на условия эксплуатации водозаборов в южной части территории, так как прогнозное снижение уровней на участке расположения скважин, оборудованных на подугольные отложения, не превысит 10—12 м. Нужно учитывать, что на южной границе модели были заданы самые «жесткие» условия (непроницаемый контур), определяющие максимально возможное снижение напоров на этом участке моделируемой территории.

Прогнозные водоприток к дренажной системе изменяются от 1400 (5-й год эксплуатации) до 260 м³/ч (20-й год) (рис. 6.23). При указанных водопритоках к дренажной системе последняя обеспечивает опережающее осушение фронта добычных работ. Внутрикьерный водоотвод и водоотлив должен быть ориентирован лишь на объемы атмосферных осадков, выпадающих по площади карьера. С этих позиций через 15—20 лет с начала эксплуатации карьера подземная система осушения карьерного поля может оказаться нецелесообразной.

Результаты моделирования позволили также оценить, что сооружение барражной завесы вдоль рек Береш и Урюп целесообразно лишь на заключительном этапе эксплуатации проектируемой дренажной системы. Результаты моделирования явились основой для определения расположения, количества и порядка оборудования пьезометров для наблюдений за техногенным режимом подземных вод в районе месторождения (общее количество пьезометров составляет 25—30 на 15—20 лет эксплуатации карьера).

Прогнозные оценки свидетельствуют также о том, что дренирование поля карьера «Березовский-1» не окажет существенного влияния на режим подземных вод в районе соседнего Урюпского бурогоугольного месторождения.

6.4. Результаты анализа сложных гидродинамических схем

Рассмотрение ряда сложных гидродинамических схем на электрических моделях позволило получить обобщенные зависимости, оформленные в виде расчетных графиков. Эти графики можно использовать для анализа и прогноза фильтрационных процессов, развивающихся, как правило, на ограниченных участках водоносных пластов, что позволяет рассматривать последние как квазиоднородные в плане или упорядоченные по структуре в разрезе.

Осушение карьерных и шахтных полей нередко сопровождается истощением естественных запасов подземных вод на локальных участках, оконтуренных дренажными выработками. Фильтрационные процессы при этом характеризуются нелинейностью, связанной с изменением проводимости безнапорных потоков или с движением внешних контуров этих потоков при наклонном задегании подстилающих их относительных водоупоров. Для ряда расчетных схем, осложненных отмеченными факторами, получены решения на электрических моделях. Эти решения оформлены в виде графиков, построенных в безразмерных координатах, что дает возможность использовать их для прогноза уровней и расходов потоков при любых фильтрационных параметрах (см. рис. 6.24—6.27).

Можно прокомментировать прикладное значение рассмотренных фильтрационных схем. Схемы, приведенные на рис. 6.24 и 6.25, соответствуют процессу осушения однородного безнапорного водоносного горизонта, оконтуренного параллельными совершенными линейными дренами (траншеями, канавами, дренажными штреками), пройденными либо одновременно, либо последовательно, с разрывом по времени, соответствующим формированию квазистационарного потока к одной из дрен к моменту ввода второй. Обе эти схемы отражают технологические особенности дренажных или мелиоративных мероприятий, проводимых на полях шахт и карьеров.

Одномерные схемы, учитывающие уклон водоупора при сработке естественных запасов подземных вод, могут использоваться для оценки гидрогеологической ситуации в более широком масштабе, например для определения дренажного эффекта разрезных траншей, дренажных штреков, пройденных по длинной оси вытянутых мультимасштабных структур или по простиранию моноклинально залегающих водоносных комплексов (рис. 6.26).

Истощение водоносных комплексов на участках, оконтуренных со всех сторон дренажными штреками (осушение дренажных панелей) может оцениваться с использованием графика, представленного на рис. 3.2.

Осушение безнапорного водоносного горизонта горными выработками, приуроченными к центральной части мультимасштабных

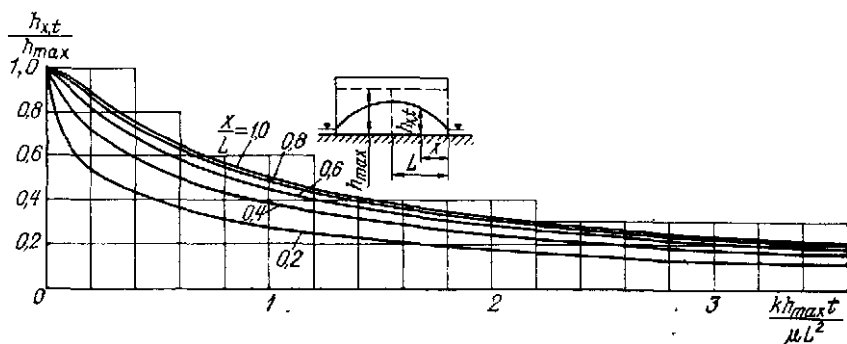


Рис. 6.24. Расчетные графики для оценки уровней безнапорного потока на горизонтальном водоупоре между двумя одновременно пройденными дренажными выработками.

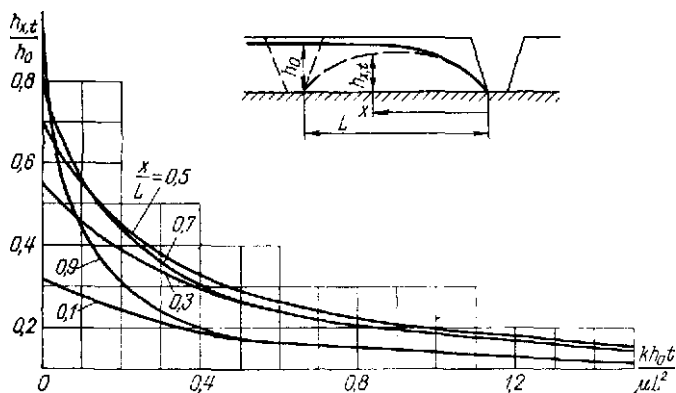


Рис. 6.25. Расчетные графики для оценки уровней безнапорного потока на горизонтальном водоупоре между двумя одновременно пройденными дренажными выработками.

образных структур (приведенных к круговой области с радиусом R), отвечает нелинейной схеме, представленной на рис. 6.27. Эта же схема пригодна для оценки эффективности систематического вертикального дренажа (поглощающих скважин с заданным понижением, расположенных по сетке $2R \times 2R$).

Специфические гидродинамические задачи возникают при обосновании параметров подземного выщелачивания металлов из руд.

Выщелачивание является сложным физико-химическим процессом, который зависит как от развития диффузионных и дисперсионных явлений, так и от характера фильтрации выщелачивающих растворов. Поэтому для обоснования оптимальных параметров систем выщелачивания в первую очередь необходимо изучение закономерностей принудительной фильтрации реагентов. Умеренная концентрация выщелачивающих растворов обычно позволяет

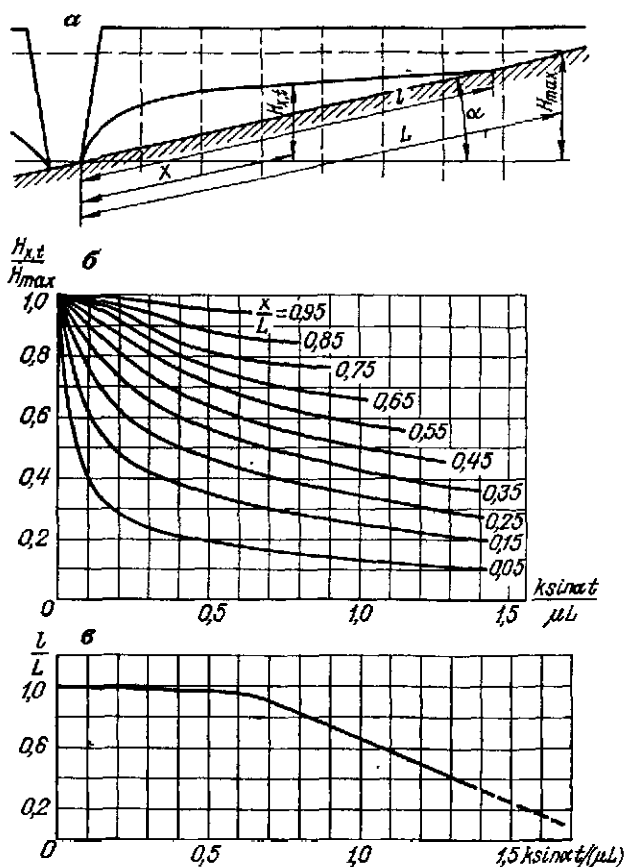


Рис. 6.26. Расчетные графики для оценки напора безнапорного потока на наклонном водоупоре.
 а — расчетная схема; б — хронологические графики изменения относительного напора потока; в — хронологический график перемещения внешней границы потока.

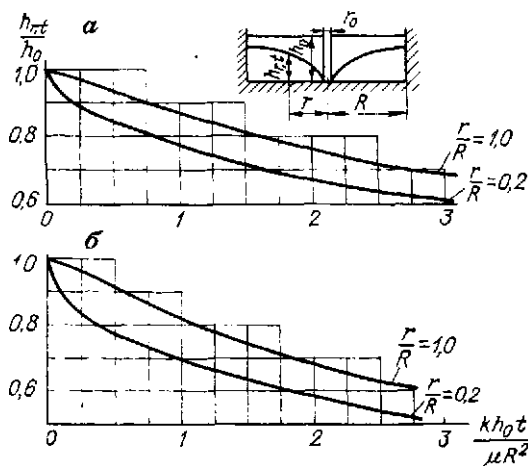


Рис. 6.27. Расчетные графики для оценки уровня безнапорного водоносного горизонта, ограниченного круговым непроницаемым контуром R , дренируемого горной выработкой с заданным понижением ($S=h_0$) с радиусом r_0 .
 а — $R/r_0=10^3$; б — $R/r_0=10^2$.

Рис 628 Расчетные графики для определения промежутка высачивания напорно-безнапорного пласта (а) и параметра A безнапорного потока (б)

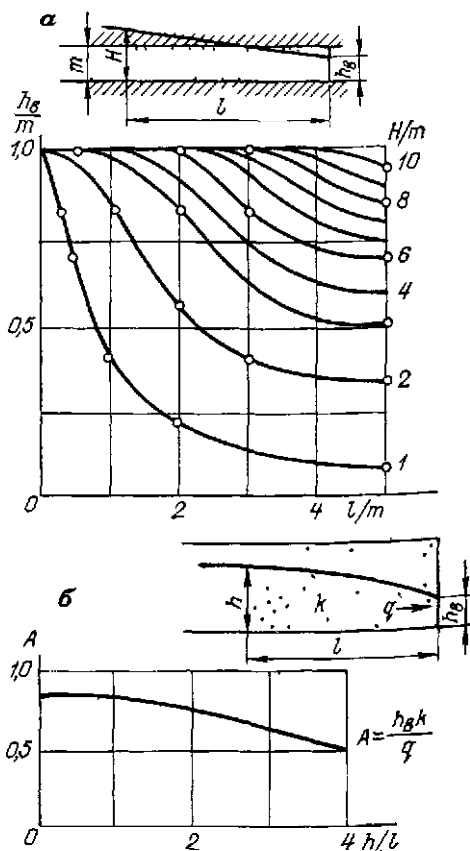
Кружками показаны результаты моделирования

рассматривать процесс их фильтрации в породном массиве исходя из тех же закономерностей, которым подчиняется движение пресных подземных вод

Эффективное выщелачивание металлов из породных блоков, оконтурированных нагнетательными и дренажными выработками, происходит при оптимальном режиме фильтрации раствора в блоке, при котором в условиях максимального заполнения блока обеспечивается реакция раствора со всем объемом породы. Поэтому движение раствора от нагнетательных к дренажным выработкам должно происходить при определенном перепаде напоров. Вместе с тем чрезмерно высокие давления на нагнетательных выработках нежелательны, вследствие того что при этом выщелачивающий раствор не сможет в должной мере вступить в реакцию с рудой, и продуктивный раствор, поступающий в дренажную выработку, окажется обедненным. Кроме того, создание высоких напоров в нагнетательных выработках технически трудно осуществимо. Следовательно, оптимальность режима фильтрации в блоках определяется несколькими противоречивыми критериями, поэтому обоснование технологических схем подземного выщелачивания требует довольно строгого учета факторов, влияющих на процесс фильтрации.

Закономерности фильтрации в блоках обычно бывают осложнены неоднородностью рудоносного массива, сложной конфигурацией нагнетательных и дренажных выработок, наличием промежутка высачивания высотой несколько метров на дренажных выработках, проявлением эффектов, связанных с двойной пористостью фильтрующего массива.

Благодаря сравнительно небольшим (до нескольких десятков метров) размерам породных блоков, фильтрация в них может рассматриваться в основном в рамках стационарных моделей. Определение наиболее рационального расположения и размеров нагнетательных и дренажных выработок может проводиться на моделях из электропроводной бумаги при сочетании моделирования в плановой и в профильной постановке. На плановых бумажных моделях с успехом решаются задачи с учетом высотного положения и конфигурации



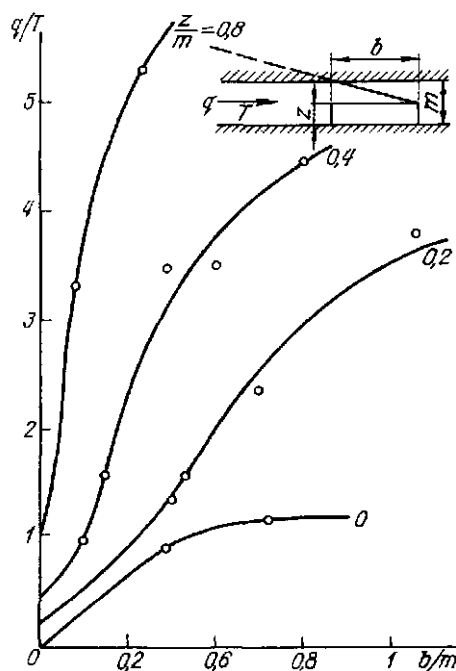


Рис 6.29 Графики для определения размера полосы «нависания» b над горной выработкой (высотой z) при дренировании водоносного пласта в условиях напорно-безнапорного режима фильтрации

Кружками показаны результаты моделирования

выработок, на профильных моделях можно определять оптимальные давления на нагнетательных выработках.

Следует подчеркнуть особую роль промежутка высачивания на стенках дренажных выработок, высота которого соизмерима с размерами блока и является одним из основных критериев, характеризующих оптимальность технологической схемы, так как

этот параметр определяет степень насыщенности блока выщелачивающим раствором.

На электрических профильных моделях проведено решение ряда тестовых задач, в результате которого построен обобщенный расчетный график для определения высоты промежутка высачивания h_b (рис. 6.28, а). Известно, что промежуток высачивания связан с фильтрационным расходом q линейной зависимостью вида $h_b = Aq/k$, однако параметр A нелинейно зависит от граничных условий (рис. 6.28, б).

Довольно часто принимается вариант технологической схемы, предусматривающей несовершенство дренажной выработки. Основным параметром этой схемы является ширина выработки, обеспечивающая полный «перехват» продуктивного раствора (рис. 6.29). Отметим, что эта гидродинамическая схема может быть использована также для оценки размеров полосы «нависания» потока над кровлей очистной выработки.

Моделирование нестационарной фильтрации в блоках подземного выщелачивания целесообразно проводить на бумажных профильных моделях (с учетом промежутка высачивания) по явной схеме методом градиентов [13]. Моделирование на цепочке дискретных сопротивлений по схеме Либманна в нелинейной постановке не обеспечивает необходимую точность решения задачи.

Оценка условий формирования водопритокков к подземным

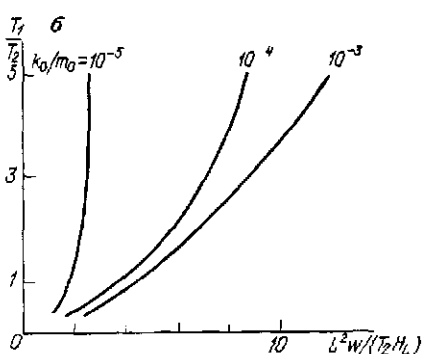
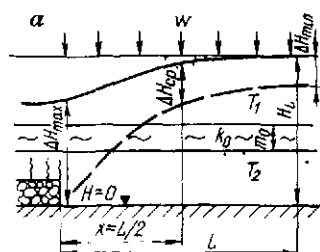
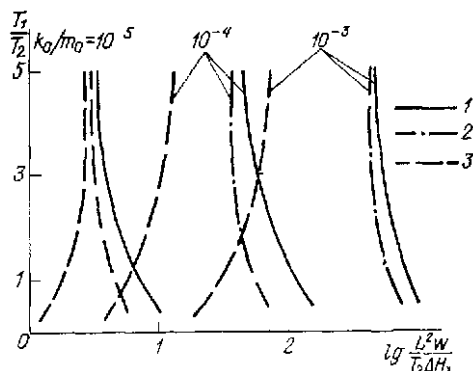


Рис 6 30 Гидродинамическая схема трехслойного водоносного комплекса с инфильтрационным питанием (а) и графики для определения параметров этой схемы (б) в сечениях $x=L$ (1), $x=0,5 L$ (2), и $x=0$ (3)



горным выработкам, вскрывающим слоистые водоносные толщи при наличии инфильтрационного питания подземных вод обычно невозможна без привлечения математического моделирования. Моделирование частой схемы, отражающей условия дренирования трехслойного водоносного комплекса, позволило получить ряд расчетных графиков, построенных в безразмерных координатах (рис. 6 30), которые дают возможность выполнить полный анализ такой схемы*.

6.5. Изучение на моделях гидрогеомеханических процессов

Эксплуатация месторождений полезных ископаемых зачастую сопровождается развитием гидрогеомеханических процессов, изучение закономерностей которых необходимо для планирования ряда важных инженерных мероприятий горного производства. Гидрогеомеханические процессы являются наиболее сложными формами фильтрации, поэтому при их анализе и прогнозе эффективно использование математического

* Моделирование на сеточных электрических моделях выполнено И. Б. Петровой и А. Б. Анисимовым под руководством Ю. А. Норватова.

моделирования. В частности, весьма сложные расчетные схемы приходится рассматривать при исследованиях, направленных на решение проблемы борьбы с горными ударами и внезапными выбросами угля и газа.

Одним из действенных методов борьбы с горными ударами является нагнетание воды в скважины, оказывающее пластифицирующее действие на угольные пласты и способствующее снижению накопленной в них упругой энергии [24]. Анализ фильтрационного процесса при выборе оптимальных параметров нагнетания (расположение, диаметр и длина скважин, давление нагнетания, расход воды) осложняется тем, что угольный пласт обладает «двойной» пористостью при неполном его водонасыщении в естественных условиях. Подвижность внешней границы области фильтрации также стимулирует применение моделирования для количественной оценки закономерности процесса.

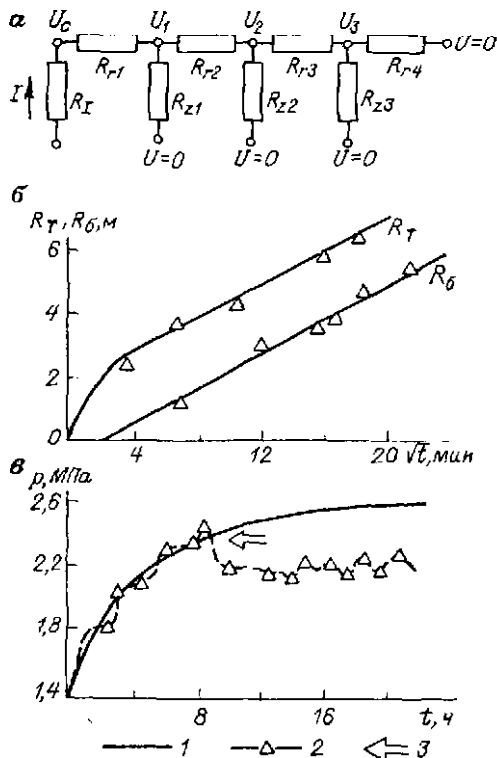
Моделирование выполнялось применительно к условиям проведения натурного эксперимента на шахте им. В. И. Ленина Ткибульского угольного месторождения [26] и сводилось к рассмотрению плоской осесимметричной неустановившейся фильтрации в угольном пласте с известной мощностью m при нагнетании в него воды через совершенную скважину с постоянным расходом Q_c , пройденную нормально к напластованию*. Проводимость угольного пласта определяется проводимостью трещин T_t , а его емкостные свойства (в данном случае — недостаток насыщения) зависят от свободного объема порового пространства блоков μ_b . Емкость трещин μ_t незначительна по сравнению с емкостью блоков, а проницаемость блоков угля на несколько порядков ниже проницаемости массива по трещинам. Сжимаемостью скелета угля можно пренебречь, поскольку она на несколько порядков ниже недостатка насыщения блоков. Блоки угля практически изотропны, коэффициенты фильтрации угля k_b составляют $(1,1 \div 1,5) \times 10^{-3}$ м/сут. При средней пористости углей около 15 % естественная их влажность составляет 5—6 %, т. е. дефицит насыщения $\mu_b = 0,08 \div 0,09$.

Фильтрационные параметры определялись в основном в лабораторных условиях, за исключением проницаемости массива углей, оцененной по результатам проведенного нагнетания. Коэффициент фильтрации угольных пластов по трещинам k_t , зависящий от горного давления на той или иной глубине и от горнотехнических условий, получен равным 0,05—0,1 м/сут при активной трещинной пустотности μ_t , составляющей в среднем 10^{-3} . Наличие отчетливо выраженной анизотропии массива по проницаемости позволяет пренебречь фильтрацией по нормально секущим пласт трещинам и принять схему, при которой насыщение блоков реализуется лишь

* Полевые и лабораторные экспериментальные работы, а также анализ их результатов выполнены Е. В. Моляским, совместно с которым написана работа [26] и подготовлена данная публикация.

Рис. 6.31. Результаты моделирования процесса нагнетания воды в угольный пласт.

а — принципиальная схема электрической модели; б — хронологические графики размеров зон водонасыщения по трещинам R_T и блокам R_B (треугольниками показаны результаты натурных наблюдений); в — хронологический график давлений на нагнетательной скважине на модели (1) и в натурных условиях (2) с зафиксированным гидроразрывом (3).



со стороны плоскостей (трещин) напластования. Последнее обстоятельство позволяет заменить реальный угольный пласт математической моделью фиктивной линейно-изотропной среды применительно к схеме радиального потока, рассматривая движение воды по одной полутрещине с насыщением половины мощности блока m_B . Моделирование выполнялось на сеточной модели (рис. 6.31, а); специфической особенностью моделирования является необходимость изменения параметров модели, соответствующих определенному положению фронта обводненности по трещинам и блокам. Элементы модели должны соответствовать фильтрационным сопротивлениям расчетных участков области фильтрации в пределах зоны полного насыщения по трещинам Φ_r и по блокам Φ_z . Для данной задачи можно записать

$$\Phi_r = \frac{1}{2\pi T_T} \ln \frac{r_{n+1}}{r_n};$$

$$\Phi_z = \frac{m_z}{k_B \pi (r_{m+1}^2 - r_m^2)}, \quad (6.2)$$

где r_n и r_{n+1} — расстояние от нагнетательной скважины до расчетных узловых точек n и $n+1$ (до середины расчетных участков); r_m и r_{m+1} — расстояния до границ расчетных участков; m_z — мощность зоны насыщения по блокам.

Сопротивления R_r и R_z сеточной модели, соответствующие фильтрационным сопротивлениям Φ_r и Φ_z , изменяются в процессе моделирования. Моделирование заключается в подаче тока, пропорционального заданному расходу нагнетания,

в первую узловую точку модели, соответствующую положению нагнетательной скважины, и в измерении электрических потенциалов в узловых точках модели (при нулевых потенциалах на граничных точках) на ряд последовательных моментов времени, различающихся заранее выбранным шагом по времени Δt . Положение фронта обводненности (а следовательно, и параметры модели на последующий шаг по времени) определяется на каждом расчетном временном шагу исходя из объемов насыщенного за время Δt пространства отдельно по блокам и по трещинам, которые вычислялись по фильтрационному расходу (силе тока), фиксируемому вблизи границ обводненности. Таким образом, в данном случае реализуется явная конечно-разностная схема, для обеспечения устойчивости которой требуется соблюдение определенного соотношения между шагом по времени и разбижкой по пространству.

Значение первого расчетного шага по времени Δt определялось предварительно в предположении, что за время Δt насыщается объем трещин W_7' в пределах первого элемента до точки, соответствующей $\Phi_{r1} + 0,1 \Phi_{r2}$, а также часть объема первого блока W_6' , соответствующая $0,1 \Phi_{z1}$, т. е. $\Delta t = (W_7' + W_6')/Q$. В первой точке (см. рис. 6.31, а) выставлялись сопротивления $0,1 R_{r2}$ и $0,1 R_{z1}$, на концы которых подавались нулевые потенциалы, и измерением тока определялись расходы насыщения по трещинам и в первом блоке; по расходам определялось положение границ насыщения на следующий шаг по времени. По мере движения границы насыщения по трещинам модель наращивалась новыми элементами. При достижении полного насыщения порового пространства по блокам ($m_z = m_6$) элементы R_z в соответствующих точках модели отключались.

Таким образом, в результате моделирования можно получить положение зоны насыщения по трещинам и блокам на ряд моментов времени, а также значения напоров в пределах зоны насыщения (в том числе и на нагнетательной скважине).

Результаты моделирования нагнетания в скважину применительно к конкретным условиям Ткибульского месторождения позволили сделать следующие выводы:

- в начальный период вода движется по трещинам и лишь спустя некоторое время появляется вторая движущаяся граница — контур полного насыщения блоков (рис. 6.31, б);

- принятые при моделировании фильтрационные параметры и математическая модель удовлетворительно отражают натурные условия;

- в процессе нагнетания проницаемость массива может изменяться за счет гидроразрыва (рис. 6.31, в).

Подобные исследования фильтрации в средах с двойной пористостью можно выполнять и на емкостных электрических моделях. Имеющиеся разработки в области решения нелинейных задач на емкостных моделях [13] опираются на использование сложных операционных блоков и усилителей, од-

нако целесообразно ориентироваться на приемы, основанные на частичной дискретизации переходного процесса, что позволяет использовать серийно выпускаемый интегратор ЭИИП 3/66.

Процесс накопления электрического заряда на конденсаторах описывается формулой

$$q = CU, \quad (6.3)$$

где C — емкость конденсатора; U — напряжение на конденсаторе.

Заполнение порового пространства блоков и трещин отвечает электрическим зарядам, т. е. определенным потенциалам U_6 на конденсаторе C_6 и потенциалам U_T на конденсаторе C_T .

При моделировании потенциал на обкладках конденсатора изменяется непрерывно до стабилизации тока в цепи (до конца переходного процесса), поэтому необходимо зафиксировать время достижения на обкладке конденсаторов заранее вычисленного значения потенциалов U_6 и U_T исходя из соотношений

$$C_6 = \frac{\mu_6 F_6}{m_C}; \quad C_T = \frac{\mu_T F_T}{m_C};$$

$$U_6 = \frac{m_6}{m_H}; \quad U_T = \frac{\Delta r}{m_H}, \quad (6.4)$$

где $F_6 = \pi(r_{2n+1}^2 - r_{2n}^2)$; $F_T = \pi(r_{2n+1}^2 - r_{2n}^2)$; $r_n, r_{n+1}, r_m, r_{m+1}$ — то же, что и в формуле (6.2); m_H — масштаб напоров; m_C — масштаб емкости; $m_C = = t_n / (t_m \cdot m_\phi)$; m_ϕ — масштаб сопротивлений; t_n и t_m — время протекания процесса в натуре и на модели.

После фиксирования времени достижения потенциалов U_6 и U_T решение «приостанавливается»; модель изменяется: отключаются соответствующие конденсаторы, модель наращивается сопротивлениями R_r, R_z , а на вершины конденсаторов задаются потенциалы, зафиксированные на конц предыдущего периода. Методика позволяет решать задачи при граничных условиях первого или второго рода на нагнетательных скважинах. При заданных на скважинах условиях второго рода напряжение на конденсаторах может возрастать до 250 В (до значения напряжения на блоке питания интегратора ЭИИП), поэтому целесообразно подключить к расчетным узловым точкам заземленные стабилитроны, ограничивающие напряжение в пределах 30 В, что обеспечивает безопасность работы оператора и сохранность измерительной аппаратуры.

Своеобразные гидрогеомеханические задачи рассматриваются при изучении условий гидроотвалообразования, определении оптимальных параметров гидроотвалов [8, 24] и обосновании мероприятий по их рекультивации. Эти задачи связаны с оценками процесса фильтрационной консолидации пород глинистого состава при изменении напряженного состояния породного массива.

Особенностью фильтрационной консолидации при гидроотвалообразовании является изменение положения верхней границы толщи слабоуплотненных пород и цикличность (сезонность) намыва, при которой периоды намыва чередуются с периодами «отдыха». Необходимость учета изменения положения границ водонасыщенной толщи, а также целесообразность рассмотрения фильтрационной консолидации как нелинейного процесса, зависящего от изменения проницаемости пород и других физико-механических свойств, вынуждают обращаться к моделированию на АВМ или ЭВМ.

Дифференциальное уравнение, выражающее закономерности консолидационного процесса с учетом скорости намыва

толщи на непроницаемое основание, может быть записано в виде [24]

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\gamma'}{\gamma} v + C_v \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}, \quad (6.5)$$

где p — избыточное поровое давление; t — продолжительность намыва; v — скорость намыва толщи; γ — объемный вес грунта; γ' — объемный вес грунта с учетом гидростатического взвешивания; h — мощность толщи; z — ордината расчетной точки; $C_v = k(1 + \varepsilon)/(\gamma a) = f(\sigma)$ — коэффициент консолидации; ε — коэффициент пористости; a — коэффициент сжимаемости; k — коэффициент фильтрации грунта; $\sigma = \gamma'(h - z) - \gamma p$ — эффективное напряжение, определяемое весом лежащих над расчетной точкой пород; $\gamma' = (\delta - \delta_0)(1 - n)$; δ и n — плотность и пористость пород; δ_0 — плотность воды.

В конечно-разностной форме уравнение (6.5) может быть представлено в виде [24]

$$\frac{\Delta p a(\sigma_i) \Delta z v}{\Delta t [1 + \varepsilon(\sigma_i)] k(\sigma_i)} = \frac{\gamma'(\sigma_i) a(\sigma_i) \Delta z v}{[1 + \varepsilon(\sigma_i)] k(\sigma_i)} + \sum_{i=1}^{i=2} \frac{\Delta p_i}{\Delta z}, \quad (6.6)$$

где Δp_i — разность давлений в расчетной точке i и в соседних с ней на момент времени t .

Уравнение (6.6) моделируется по схеме Либманна на цепочке сопротивлений R_z с переменными временными сопротивлениями R_t и дополнительными сопротивлениями R_i , через которые в каждую узловую точку подается ток I . По мере увеличения мощности слоя модель наращивается новыми элементами. Сопротивления определяются соотношениями

$$R_t = \frac{\Delta t [1 + \varepsilon(\sigma_i)] k(\sigma_i)}{a(\sigma_i) \Delta z \gamma m_\phi}; \quad I = \frac{\gamma'(\sigma_i) a(\sigma_i) \Delta z m_\phi V_{\max}}{[1 + \varepsilon(\sigma_i)] k(\sigma_i) m_p}, \quad (6.7)$$

где m_ϕ — масштаб сопротивлений; $m_p = (p_{\max} - p_{\min}) / (U_{\max} - U_{\min})$ — масштаб давлений; p_{\max} и p_{\min} — максимальное и минимальное значения давлений, соответствующие максимальному U_{\max} и минимальному U_{\min} электрическим потенциалам на модели.

Анализ результатов моделирования в нелинейной постановке при конкретных характеристиках пород гидроотвала комбината КМАруда показал, что осреднение параметров при линеаризации дает существенную погрешность, особенно для первых лет намыва [24]. Естественно, что довольно высокие погрешности лабораторного определения свойств пород и сомнительная представительность испытуемых образцов снижают эффективность решения конкретных задач с применением моделей, однако моделирование процесса консолидации в имитационной постановке позволяет анализировать возможные

структуры расчетных схем, а также изучать общие закономерности и совершенствовать методы определения соответствующих расчетных параметров в натурных и лабораторных условиях.

Многочисленные сопоставления фактических значений порового давления, измеренных непосредственно в намывных породах гидроотвалов, с прогнозными, вычисленными исходя из параметров, полученных в результате лабораторных испытаний образцов, свидетельствуют о существенных погрешностях прогнозных оценок. Повышение достоверности оценок процессов фильтрационной консолидации может быть достигнуто за счет определения расчетных значений параметров при интерпретации результатов натурных экспериментов, сопровождаемых измерениями порового давления в массиве намывных пород.

Эксперимент такого рода был проведен на гидроотвале Краснородского разреза в Кузбассе*. На поверхности гидроотвала, намыв которого был закончен за 8 лет до эксперимента, производилась отсыпка призмы полускальных пород, сопровождаемая наблюдениями за изменениями порового давления в намывных породах основания призмы и измерениями деформаций. Отсыпанная призма имела длину 30 м, ширину 14 м и высоту 6,5 м (рис. 6.32). Мощность намывных отложений на участке отсыпки отвала составляла 25—30 м; эти отложения характеризуются тонким переслаиванием супесей и суглинков. В толще намывных отложений в плоскости, перпендикулярной к фронту отсыпки, на различных глубинах были заложены датчики гидростатического давления струнного типа ДС-13 конструкции ВНИМИ; гидростатические напоры до отсыпки призмы совпадали с поверхностью гидроотвала. При подготовке эксперимента в основание отсыпаемого отвала был заложен репер тарельчатого типа для последующих наблюдений за осадкой намывной толщи при ее пригрузке.

Отсыпка пригрузочной призмы на опытном участке была проведена в течение 2 сут; деформации откосов призмы и ее основания, а также изменения порового давления фиксировались в течение 100 сут. Осадка основания призмы, которая была реализована в период рассеивания порового давления (см. рис. 6.32), составила около 800 мм. Рассчитанный по этим данным модуль деформации равен 0,2 МПа, а соответствующий коэффициент сжимаемости $0,5 \text{ МПа}^{-1}$ (этот параметр примерно соответствует среднему значению коэффициентов сжимаемости, полученных по образцам, отобраным из скважины на опытном участке).

* Полевые экспериментальные работы выполнены сотрудниками ВНИМИ Ю И Кутсовым и Г И Годлевской.

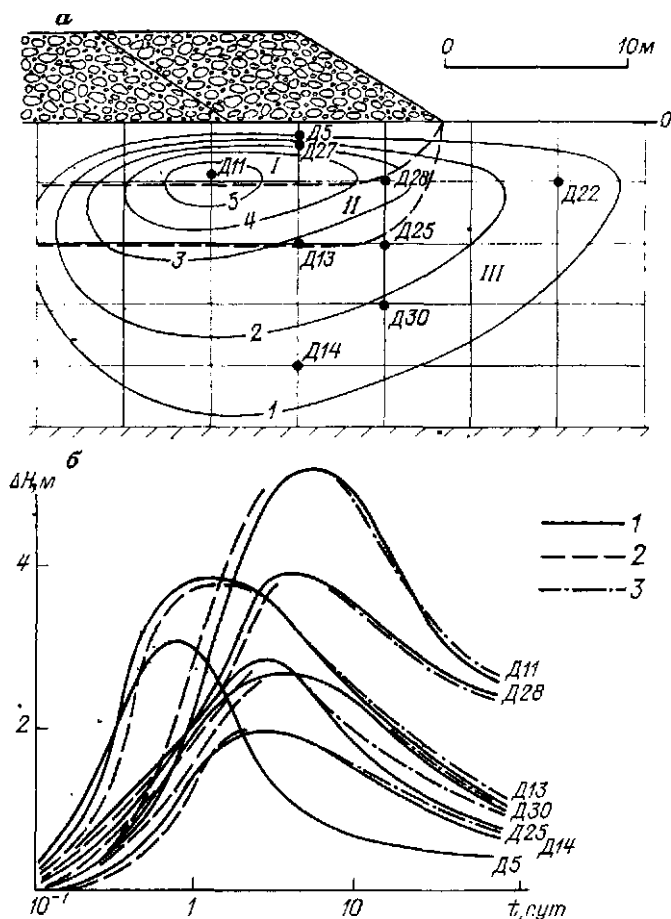


Рис. 6.32. Развитие гидростатического (порового) давления в водонасыщенных породах гидроотвала при их пригрузке отвалом сухих пород.

a — схема установки датчиков гидростатического давления и его распределение в гидроотвале (изолезы в метрах водяного столба); *б* — хронологические графики избыточного гидростатического давления по датчикам (в метрах водяного столба ΔH). 1 — в натуральных условиях; 2 — при моделировании по схеме Либманна; 3 — при моделировании на емкостных моделях.

Анализ результатов измерения порового давления в основании призмы позволил обосновать расчетную геофильтрационную схему и определить параметры консолидации. Характер двумерного поля давлений свидетельствует о том, что основание гидроотвала может рассматриваться как непроницаемый контур, а поверхность гидроотвала проявляет свойства границы дренажа. Синхронность изменений порового давления по датчикам 14 и 22 при почти симметричном их расположении относительно центра возмущения свидетельствует

о фильтрационной изотропии слоистого массива намывных пород.

Оцененные аналитически ориентировочные значения параметра консолидации увеличиваются по мере удаления расчетных точек от центра приложения возмущения, что свидетельствует о закономерной неоднородности поля фильтрации в основании отсыпаемого отвала.

Определение параметров неоднородного фильтрационного поля проведено путем решения серии обратных задач на электрических сеточных моделях. В пределах двумерного поля были условно выделены три кусочно-однородные зоны I—III (см. рис. 6.32, а), параметры консолидации которых определялись путем подбора соответствующих параметров электрических моделей; этот подбор контролировался возможно близким совпадением моделируемых функций порового давления с натурными измерениями в течение всего периода наблюдений. Начальный этап изменения порового давления моделировался на сеточных моделях по схеме Либманна, позволяющей учесть изменчивость граничных условий во времени (изменения давлений, соответствующие росту внешней нагрузки). Этап рассеивания порового давления моделировался на емкостной сеточной модели с начальными условиями, отвечающими распределению давлений в массиве на 10-е сутки с начала проведения эксперимента. Анализ чувствительности модели позволил оценить относительную погрешность определяемых параметров, которая не превышает 100 % при возможных абсолютных погрешностях моделирования 5 % и метрологических погрешностях того же порядка (давления в натуре измерялись с погрешностью не более $2 \cdot 10^{-3}$ МПа или 0,2 м вод. ст.).

Моделирование начального периода отсыпки опытного отвала показывает, что до момента достижения максимума порового давления весь массив намывных пород характеризовался коэффициентом пьезопроводности, равным $150 \text{ м}^2/\text{сут}$. В результате моделирования второго этапа осыпки установлено, что среднее значение параметра консолидации ближайшей к источнику возмущения зоны I равно $0,1 \text{ м}^2/\text{сут}$ (в период от 10 до 100 сут с начала пригрузки гидроотвала). Для этого же периода средние значения параметров зон II и III соответственно равны 30 и $150 \text{ м}^2/\text{сут}$. Очевидно, что параметр внешней зоны (III) соответствует коэффициенту пьезопроводности неуплотненных намывных пород. Если принять, что передача порового давления в этот период реализуется с учетом сжимаемости воды (коэффициент упругой емкости воды в порках составляет $2 \cdot 10^{-6}$), то коэффициент фильтрации намывных пород оценивается в $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}/\text{сут}$.

Следует подчеркнуть, что установленная фильтрационная неоднородность соответствует средним значениям параметров пород, свойства которых сформировались в процессе консолидации. Выявленная закономерность свидетельствует о нелинейном

характере консолидации глинистых пород гидроотвалов и необходимости учета этого фактора при определении расчетных параметров для прогнозных оценок.

Проведение натурных экспериментов позволяет глубже изучить сложные нестационарные гидрогеомеханические процессы, уточнить расчетные схемы, учитывающие характер деформирования слабоуплотненных пород в основании сооружений при оценке устойчивости последних. Натурные эксперименты следует рассматривать как источник наиболее информативных материалов, интерпретация которых с максимальной эффективностью может проводиться с применением математического моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложность, особая динамичность и многообразие форм техногенного режима геофильтрации являются объективной причиной определенных трудностей в изучении и прогнозе этого природного явления. Выполненное обобщение опыта гидрогеологических исследований на месторождениях полезных ископаемых, вероятно, не может дать исчерпывающих ответов на все возникающие проблемные вопросы. Постоянное развитие техники и технологии горного производства также предопределяет необходимость периодического переосмысливания подходов к постановке и проведению соответствующих гидрогеологических исследований. Вместе с тем рассмотренные методические и практические результаты позволяют определить пути дальнейшего расширения и углубления гидрогеологических исследований по обсуждаемой проблеме. В частности, углубленного анализа требуют геомеханические процессы, которые развиваются при подземной разработке месторождений, приуроченных к слаболитифицированным обводненным песчано-глинистым отложениям. Изучение и прогноз концентрированных водопроявлений (прорывов) в этих условиях до сих пор базируется на эмпирических подходах и требует дополнительных теоретических и научно-методических проработок.

Не менее важно расширить изучение закономерностей инфильтрационного питания подземных вод при дренаже шахтных и карьерных полей. Дополнительные гидрогеологических исследований требуют и вопросы, связанные с затоплением территорий грунтовыми водами при деформациях поверхности за счет подземных горных работ.

Серьезной методологической проблемой является дальнейшее совершенствование численного моделирования геомеханических и фильтрационных процессов в направлении создания эффективных специализированных программ для ЭВМ с учетом накопленного опыта электрического моделирования.

Наконец, целесообразна разработка фундаментальных научно-методических основ мониторинга подземных вод при эксплуатации месторождений полезных ископаемых. На этой базе должны оптимально решаться вопросы дренажа карьерных и

шахтных полей в тесной увязке с обоснованием природоохран-ных мероприятий и с контролем их эффективности.

Наряду с научными проработками необходимы организа-ционные меры по повышению эффективности гидрогеологиче-ской разведки месторождений с учетом специфики многопла-новых прогнозных оценок, а также практические мероприятия по совершенствованию системы наблюдений за режимом под-земных вод при строительстве и эксплуатации горнодобываю-щих предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 *Бабушкин В Д, Лебедевская З П, Леви Л Э* и др Прогноз водопритоков в горные выработки и водозаборы подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах М, Недра, 1972 196 с
- 2 *Бабушкин В Д, Бунтман А Д, Малышев Л И, Хасин М Ф* Осушение выработок в неоднородных водоносных системах М, Недра, 1977 208 с
- 3 *Боревский Б В, Самсонов Б Г, Язвин Л С* Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек М, Недра, 1973 304 с
- 4 *Веселков В И, Мочалов А М, Норватов Ю А, Бокий Л Л* Устойчивость бортов и отвалов на разрезах Подмосковского бассейна — Тр ВНИМИ, 1974, № 92, с 65—72
- 5 *Веселков В И, Норватов Ю А, Трезина Э В К* вопросу об оползнях на Тигнинском угольном разрезе — В кн Вопросы инженерной геологии при строительстве и эксплуатации подземных сооружений, шахт и карьеров Л, 1970, с 102—107
- 6 *Гавич И К* Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии М, Недра, 1980 357 с
- 7 *Гвирицман Б Я, Кацнельсон Н Н, Бошняков Е В* Безопасная выемка угля под водными объектами М, Недра, 1977 175 с
- 8 *Гидрогеологические* исследования в горном деле/В. А Мироненко, Ю А Норватов, Л И Сердюков и др М, Недра, 1976 352 с
- 9 *Гидрогеологические* прогнозы на месторождениях полезных ископаемых М, ВСЕГИНГЕО, 1980 77 с
- 10 *Гороховский В М* Математические методы и достоверность гидрогеологических и инженерно геологических прогнозов М, Недра, 1977 76 с
- 11 *Гриф А Г, Невечеря И К, Семенова С М* Комплексная оценка параметров взаимосвязи поверхностных и подземных вод в речных долинах — Экспресс-информация ВИЭМС Гидрогеология и инженерная геология, 1976, № 3, с 1—15
- 12 *Жалпарханов С Ж, Кунанбаев С Б, Крылов В В* и др Подземные воды рудных месторождений Центрального Казахстана Алма Ата, Наука, 1985 158 с
- 13 *Жернов И Е, Шестаков В М* Моделирование фильтрации подземных вод М, Недра, 1971 224 с
- 14 *Ковалевский В С* Основы прогнозов естественного режима подземных вод М, Недра, 1974
- 15 *Кузнецов М А, Громов В В* Определение границ зон опасных сдвижений при разработке слепых залежей ограниченных размеров — В кн Сдвижение земной поверхности и устойчивость откосов Л, ВНИМИ, 1980, с 39—43
- 16 *Леваньков Б И, Миронов А С, Норватов Ю А* Оптимизация комплексных гидрогеологических исследований при оценке безопасных условий разработки угольных пластов под водными объектами — В кн Совершенствование методов расчета сдвижений и деформаций горных пород, сооружений

и бортов разрезов при разработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях Л., ВНИМИ, 1985, с. 59—65

17 Лукнер Л., Шестаков В. М. Моделирование геофильтрации. М., Недра, 1976 404 с

18 Методические указания по гидрогеологическому обслуживанию угледобывающих предприятий/В. А. Мироненко, Ю. А. Норватов, Л. И. Сердюков и др. Л., ВНИМИ, 1975 52 с

19 Методы и критерии промышленной оценки минерально-сырьевой базы сланцедобывающих предприятий/Под ред. И. П. Иванова и А. С. Левина Л., Недра, 1984 170 с.

20 Методы охраны подземных вод от загрязнения и истощения/Под ред. И. К. Гавич М., Недра, 1985 320 с.

21 Мироненко В. А. Динамика подземных вод М., Недра, 1983. 357 с.

22 Мироненко В. А., Норватов Ю. А., Тон Ши Кинь. Решение задач неустановившейся фильтрации с использованием операционного метода — Изв. вузов Геология и разведка, 1978, № 5, с. 112—118

23 Миронов В. А., Румянцев В. Г., Ушаев В. К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах Л., Недра, 1980. 319 с.

24. Мироненко В. А., Шестаков В. М. Основы гидрогеомеханики М., Недра, 1979. 295 с

25 Мироненко В. А., Шестаков В. М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ М., Недра, 1978 325 с

26 Мольский Е. В., Норватов Ю. А. Моделирование нагнетания воды в угольный пласт — Тр. ВНИМИ, 1972, № 85, с. 232—237

27 Миронов А. С., Леванков Б. И. Возможность использования тензометрической аппаратуры при гидрогеологических исследованиях на подрабатываемых территориях — Тр. ВНИМИ, 1979, № 113, с. 30—31

28. Норватов Ю. А. Установление гидрогеологических параметров методами аналогового моделирования. — Разведка и охрана недр, 1973, № 1, с. 44—48.

29. Норватов Ю. А. Принцип построения и опыт использования постоянно действующих моделей для исследования гидрогеологических условий месторождений полезных ископаемых — В кн. Создание и использование постоянно действующих моделей для изучения гидрогеологических условий, формирующихся под влиянием водохозяйственных мероприятий. Киев, 1980, с. 17—28.

30. Норватов Ю. А., Бокий Л. Л., Шмидт Е. Н. Гидрогеологические исследования при оценке устойчивости гидроотвала комбината КМАруда. — Тр. ВНИМИ, 1973, № 89, с. 185—191

31. Норватов Ю. А., Бокий Л. Л. Методика электромоделирования неустановившейся фильтрации при наклонном водоупоре. — Гидротехническое строительство, 1979, № 1, с. 23—26

32 Норватов Ю. А., Петрова И. Б., Миронов А. С. Применение гидрогеофизических методов для повышения информативности опытно-фильтрационных работ. — В кн. Геологические и геофизические методы изучения условий разработки угольных месторождений. Л., ВНИМИ, 1984, с. 9—16.

33. Норватов Ю. А., Тон Ши Кинь. Оценка точности конечно-разностных схем при аналоговом моделировании гидрогеологических процессов. — Тр. ВСЕГИНГЕО, 1976, вып. 110, с. 35—44.

34 Норватов Ю. А., Тон Ши Кинь. Исследование изменений режима подземных вод при эксплуатации железорудных месторождений. — Изв. вузов. Геология и разведка, 1975, № 9, с. 28—34

35 Огняник Н. С., Ситников А. Б., Рудаков В. К. и др. Охрана подземных вод в условиях техногенеза. Киев, «Вища школа», 1985. 220 с

36 Оксанич Н. Ф., Береснев В. С., Гордон А. Б. и др. Осушение месторождений при строительстве железорудных предприятий. М., Недра, 1977. 285 с

37. Плотников Н. И., Краевски С. Гидрогеологические аспекты охраны окружающей среды. М., Недра, 1983. 283 с

38. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. М., Недра, 1981 288 с.

39. *Рекомендации по методике определения гидрогеологических параметров для оценки условий строительства и эксплуатации угледобывающих предприятий*/Ю. А. Норватов, А. Н. Рюмин, Л. Л. Бокий и др. Л., ВНИМИ, 1986, 116 с.

40. *Рихтмайер Р., Мортон К.* Разностные методы решения краевых задач. М., Мир, 1972. 413 с.

41. *Руководство по дренированию карьерных полей. Разделы I—IV*/В. А. Мироненко, Г. Л. Фисенко, Ю. А. Норватов и др. Л., ВНИМИ, 1968. 382 с.

42. *Стрельский Ф. П., Миронов А. С.* Оценка условий подработки водных объектов методом наблюдений за поровым давлением.—Тр. ВНИМИ, 1977, № 106, с. 36—41.

43. *Стрельский Ф. П., Норватов Ю. А., Миронов А. С.* Оценка условий ведения очистных работ под водными объектами по наблюдениям за поровым давлением в подрабатываемой толще.—Тр. ВНИМИ, 1975, № 96, с. 54—59.

44. *Фролов Н. М.* Гидрогеостермия. М., Недра, 1976. 280 с.

45. *Шеннон Р.* Имитационное моделирование систем—искусство и наука. М., Мир, 1978. 418 с.

46. *Шестаков В. М.* Динамика подземных вод. М., Изд-во Моск. ун-та, 1973. 327 с.

47. *Шестаков В. М.* Методика интерпретации опытно-фильтрационных наблюдений. М., Изд-во Моск. ун-та, 1982. 52 с.

48. *Alderman J., Smith W.* Acid mine drainage: the problem and the solution.—*Coal Mining and Process.*, 1977, 14, № 8, p. 66—68.

49. *Rushton K. R., Rathod K. S.* Modelling rapid flow in aquifers.—*Ground Water*, 1979, 17, № 4, p. 351—358.

50. *Schmieder A.* Formation du facteur de la conductibilité de pression dans le temps dans les aquifères fissurés et stratifiés a structure poreuse.—*Magy. állami földt. intez. évk.*, 1978, 59, № 1—4, p. 235—245.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|------------|
| Предисловие | 3 |
| 1. Техногенный режим подземных вод в горнодобывающих районах . . | 5 |
| 1.1. Изменения естественного режима подземных вод при строительстве и эксплуатации горнодобывающих предприятий | — |
| 1.2. Формирование техногенного режима подземных вод и факторы, влияющие на его закономерности | 11 |
| 1.3. Дренаж карьерных и шахтных полей и его влияние на техногенный режим подземных вод | 29 |
| 1.4. Основные недостатки гидрогеологического изучения месторождений полезных ископаемых на стадии их разведки и освоения | 36 |
| 2. Изучение техногенного режима подземных вод при разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых | 41 |
| 2.1. Основные цели, принципы и методы гидрогеологических исследований на месторождениях полезных ископаемых | — |
| 2.2. Опытнo-фильтрационные работы при изучении гидрогеологических условий месторождений на стадии их разведки | 51 |
| 2.3. Гидрогеологические работы по изучению техногенного режима подземных вод в период строительства и эксплуатации горнодобывающих предприятий | 75 |
| 2.4. Экспериментальные гидрогеологические работы в период эксплуатации шахт | 82 |
| 3. Гидрогеологическая схематизация при изучении и прогнозе техногенного режима подземных вод | 102 |
| 3.1. Общие принципы гидрогеологической схематизации | — |
| 3.2. Схематизация режима фильтрационных процессов | 106 |
| 3.3. Схематизация границ области фильтрации и условий питания водоносных пластов по площади их развития | 113 |
| 3.4. Схематизация структуры и неоднородности фильтрационных полей | 119 |
| 3.5. Прогноз водопритоков к горным выработкам и уровней дренируемых водоносных горизонтов аналитическими методами | 132 |
| 4. Вычислительная схематизация при моделировании фильтрационных процессов | 141 |
| 4.1. Структура основных математических моделей водоносных горизонтов | — |
| 4.2. Конечнo-разностные уравнения фильтрации | 144 |
| 4.3. Оценка погрешностей математического моделирования гидродинамических процессов | 151 |
| 4.4. Особенности вычислительной схематизации при прогнозировании на электрических моделях сложных гидродинамических процессов | 164 |
| 5. Интерпретация результатов наблюдений за техногенным режимом подземных вод | 175 |

| | |
|--|-----|
| 5.1. Определение проводимости изолированных водоносных пластов при установившемся режиме фильтрации | 176 |
| 5.2. Оценка фильтрационных параметров, определяющих закономерности нестационарного режима подземных вод | 178 |
| 5.3. Оценка параметров питания и взаимосвязи дренируемых водоносных горизонтов | 191 |
| 5.4. Анализ качества определения фильтрационных параметров неоднородных водоносных пластов | 199 |
| 6. Результаты гидрогеологических исследований на конкретных месторождениях полезных ископаемых | 206 |
| 6.1. Изучение техногенного режима подземных вод при эксплуатации Эстонского сланцевого месторождения | — |
| 6.2. Изучение гидрогеологических условий освоения Нерюнгринского угольного месторождения | 218 |
| 6.3. Прогноз техногенного режима подземных вод при проектировании Березовского карьера в Канско-Ачинском угольном бассейне | 231 |
| 6.4. Результаты анализа сложных гидродинамических схем | 240 |
| 6.5. Изучение на моделях гидрогеомеханических процессов | 245 |
| Заключение | 255 |
| Список литературы | 257 |

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

Юлий Александрович Норватов

ИЗУЧЕНИЕ И ПРОГНОЗ ТЕХНОГЕННОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Редактор издательства *В. С. Селиванов*
Переплет художника *А. А. Власова*
Технический редактор *С. М. Архипова*
Корректоры *О. Г. Попова, Е. А. Стерлина*

ИБ № 6753

Сдано в набор 08.06.87. Подписано в печать 27.10.87. М-21166. Формат 60×90^{1/16}. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 16,50, Усл. кр.-отг. 16,50. Уч.-изд. л. 17,23. Тираж 2520 экз. Заказ № 2078/758. Цена 1 р. 20 к

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», Ленинградское отделение, 193171, Ленинград, С-171, ул. Фарфоровская, 18.

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 191126, Ленинград, Социалистическая ул., 14.