

В.А.МИРОНЕНКО Е.В.МОЛЬСКИЙ  
В.Г.РУМЫНИН

# ГОРНО- ПРОМЫШЛЕННАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЯ



ВЫСШЕЕ  
ОБРАЗОВАНИЕ

**В.А.МИРОНЕНКО Е.В.МОЛЬСКИЙ  
В.Г.РУМЫНИН**

# **ГОРНО - ПРОМЫШЛЕННАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЯ**

*Допущено Государственным комитетом СССР  
по народному образованию в качестве учебника  
для студентов вузов, обучающихся  
по специальности "Гидрогеология и инженерная геология"*



**МОСКВА "НЕДРА" 1989**

ББК 26.22

М 64

УДК 556.3 + 622 (075.8)

Рецензенты:

кафедра геологии Московского горного института;

д-р геол.-минер. наук Ю.А. Норватов

**Мироненко В.А., Мольский Е.В., Румынин В.Г.**

**М 64 Горнопромышленная гидрогеология: Учебник для вузов. — М.: Недра, 1989. — 287 с.: ил.**

**ISBN 5-247-01182-1**

Рассмотрены влияние подземных вод на условия разработки месторождений полезных ископаемых, принципы и методы осушения шахтных и карьерных полей. Приведены схемы их дренирования, а также гидрогеологические расчеты осушения месторождений. Описаны гидрогеологические исследования и наблюдения при разведке и освоении месторождений полезных ископаемых. Большое внимание уделено охране и рациональному использованию подземных вод в горнодобывающих районах.

Для студентов геологоразведочных и горных вузов и факультетов, обучающихся по специальности "Гидрогеология и инженерная геология".

1804080000 — 363

М ————— 136—89

043 (01) — 89

**ББК 26.22**

**ISBN 5-247-01182-1**

© Издательство "Недра", 1989

“Горнопромышленная (шахтная и рудничная) гидрогеология” — один из завершающих курсов в образовании горного инженера-гидрогеолога — преследует две основные цели: 1) подготовить специалиста к работе в конкретной сфере инженерной гидрогеологии, связанной с горнодобывающей промышленностью; 2) развить и углубить знания, полученные при изучении фундаментальных курсов в первую очередь “Динамики подземных вод”.

Важность первой цели очевидна, если учесть громадные масштабы горного производства и то внимание, которое уделяется этому направлению народного хозяйства в нашей стране. Нигде в мире не развед�ется и не осваивается такое число месторождений полезных ископаемых в столь разнообразных горно-геологических условиях. В условиях постоянно увеличивающихся масштабов и, что особенно важно, глубин горных разработок гидрогеологический фактор становится одним из определяющих технико-экономическую эффективность горного производства: нередки случаи, когда мероприятия по защите карьерного или шахтного поля от подземных вод повышают себестоимость добываемого полезного ископаемого на 10—15, а то и на 20—25 %. А это означает, что от компетенции гидрогеологов и инженеров-геологов, так или иначе связанных с горным производством, зависит эффективность реализации государственных ассигнований. Важность проблемы обусловлена и тем обстоятельством, что именно горное производство превратилось за последнее время в глобальный экологический фактор: пожалуй, ни одна сфера хозяйственной деятельности не сопряжена со столь значительным ущербом среде обитания. Важнейшим компонентом этой среды являются подземные воды, истощение и загрязнение которых при горных разработках приобрели в ряде районов угрожающий характер.

Вторая из указанных выше целей вытекает из требований непрерывной подготовки будущего инженера-гидрогеолога, приемственности получаемых им знаний от одного курса к другому. С этой точки зрения, курс “Горнопромышленная гидрогеология”<sup>1</sup> позволяет развить и закрепить уже полученные знания и навыки применительно к широкому кругу практически важных и достаточно сложных инженерных задач, носящих, к тому же, комплексный характер. Их сложность и комплексность определяются в первую очередь тесным переплетением гидрогеологических проблем с инженерно-геологическими, что заставляет сле-

---

<sup>1</sup> Данное название курса, хорошо отражая его суть, естественно сопрягается с предложенной В.В. Ржевским дифференциацией наук горного цикла.



циалиста строить инженерные решения на комплексном гидрогеомеханическом подходе [10], сочетающем основополагающие представления из курсов "Динамика подземных вод" и "Механика грунтов (горных пород)".

В соответствии с поставленными целями данная работа освещает основные гидрогеологические (а частично и инженерно-геологические) проблемы освоения месторождений твердых полезных ископаемых. Она позволяет ответить на следующие принципиальные вопросы, возникающие перед гидрогеологами и инженерами-геологами при проектировании, строительстве и эксплуатации горных предприятий или при разведке месторождений — будущих объектов горного производства:

1) к чему сводится и как оценивается влияние подземных вод на условия разработки месторождений (см. гл.1)?

2) каковы эффективные меры защиты горных разработок от подземных вод и подходы к гидрогеологическому обоснованию этих мер (см. гл. 2 и 3)?

3) как провести прогнозные оценки водопритоков в горные выработки и эффективности защитных мероприятий (см.гл.4)?

4) какими путями и методами может быть получена необходимая исходная информация для упомянутых выше гидрогеологических прогнозов и расчетных оценок (см.гл.5)?

5) что и как должны делать гидрогеологи для охраны подземных вод в горнодобывающих районах от истощения и загрязнения (см.гл. 6—8)?

Во избежание излишних повторений и параллелей с курсами "Динамика подземных вод" [7] и курсами горного [14] и инженерно-геологического [5] профилей, ряд проблем рассматривается лишь с той степенью детальности, которая необходима для уяснения специфики их изучения именно в горном деле. Для лучшего понимания этой специфики в книгу включены многочисленные примеры, которые должны восприниматься читателем как обязательные части данного курса.

## ВЛИЯНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА УСЛОВИЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

---

Гидрогеологическая обстановка на месторождении является одним из главных факторов, от которых зависят условия его освоения. Более того, не редки ситуации, когда именно влияние подземных вод во многом определяет технико-экономическую целесообразность разработки месторождения. Это влияние может проявляться: 1) в ухудшении условий эксплуатации горно-транспортного оборудования, проведения буровзрывных работ, а также условий труда рабочего персонала; 2) в снижении качества или полноты выемки полезного ископаемого<sup>1</sup>; 3) в уменьшении устойчивости пород в горных выработках.

Первые два аспекта входят в основном в компетенцию горных инженеров-технологов и будут рассмотрены ниже (см. разд.1.4) очень сжато — в той мере, в какой это необходимо гидрогеологу, занятому в горном деле. Наоборот, последний аспект является главным для гидрогеологов (инженеров-геологов), проводящих оценку условий освоения месторождений, поэтому его мы рассмотрим с повышенной детальностью (см. разд. 1. 1–1.3), выделяя три направления для последующего анализа: а) силовое воздействие подземных вод на горные породы, определяющее изменение их напряженно-деформированного состояния вблизи горных выработок; б) процессы механического выноса в горных породах под влиянием подземных вод; в) роль подземных вод непосредственно в изменении прочности горных пород в процессе строительства и эксплуатации горных выработок.

Нужно отметить, что приведенное разграничение весьма условно и дается, скорее, для удобства рассмотрения отдельных механизмов взаимодействия подземных вод с горными породами. При этом широко используются идеи и методы гидрогеомеханического подхода [10], рассматривающего горные породы и движущиеся в них подземные воды как единую механическую систему.

---

<sup>1</sup> Здесь не рассматривается проблема влияния подземных вод на так называемые геотехнологические методы добычи полезных ископаемых (подземная выплавка серы, подземное выщелачивание урановых руд и др.), при которых вода нередко оказывается важнейшим элементом технологии горных работ.

## 1.1. ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД ПОД ВЛИЯНИЕМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

### 1.1.1. Основные положения подземной гидростатики

Как известно [10], в каждом репрезентативном объеме массива водонасыщенных горных пород действуют два вида напряжений: эффективные  $\sigma_3$ , определяющие силы взаимодействия между отдельными минеральными составляющими горной породы (минеральными зернами или породными блоками в трещиноватых породах), и нейтральные  $\sigma_n$ , отражающие гидростатическое обжатие каждой такой составляющей за счет подземных вод:

$$\sigma_n = \sigma_3 + \sigma_n, \quad (1.1)$$

где  $\sigma_n$  — полное (общее) напряжение.

Если пренебречь сжимаемостью минеральных составляющих при приложении гидростатического давления по сравнению со сжимаемостью всей породы, то ее механические характеристики (прочность, показатели деформируемости и пр.) определяются эффективными напряжениями. Однако приращенные нейтральных напряжений  $\Delta\sigma_n$  также могут вызывать деформирование горной породы, поскольку, согласно уравнению (1.1), они меняют поле эффективных напряжений. В наиболее важном частном варианте, когда изменения напоров  $\Delta H$  подземных вод не приводят к существенному перераспределению полных напряжений<sup>1</sup>, т.е.  $\Delta\sigma_n \approx 0$ , из (1.1) получаем:

$$\Delta\sigma_3 \approx \Delta\sigma_n = -\gamma_0 \Delta H, \quad (1.2)$$

где  $\gamma_0 = \rho_0 g$  — удельный вес воды (здесь  $\rho_0$  — плотность воды;  $g$  — ускорение свободного падения).

Иначе говоря, понижение напора на величину  $\Delta H$  должно вызывать увеличение напряжений в скелете горной породы на  $\gamma_0 \Delta H$ , и наоборот.

Рассмотрим несколько практических примеров проявления этого механизма в условиях подземной гидростатики, т.е. пренебрегая силовыми эффектами, связанными с движением подземных вод.

### 1.1.2. Оседание горных пород при глубоком водопонижении

Хорошо известно, что интенсивный подземный водоотбор приводит к заметному оседанию земной поверхности. В качестве примера можно привести оседание на территории Венеции, вызванное неуме-

---

<sup>1</sup> В худшем случае, это справедливо с относительной погрешностью, не превышающей величину водоотдачи пород [7].

ренным водоотбором (характерно, что после того, как в 1970-х гг. были приняты меры по ограничению водоотбора, процесс оседания практически прекратился). Другой, детально описанный пример — должна Сан-Хоакин в Калифорнии, где понижение напоров на 150 м привело к оседанию поверхности на площади более 15 000 км<sup>2</sup>, причем максимальная осадка превысила 12 м. При этом были деформированы не только многие поверхностные объекты (дороги, каналы и пр.), но и стволы многочисленных глубоких скважин, откачивавших воду.

Применительно к горным разработкам, подобные процессы должны приниматься во внимание, прежде всего, когда речь идет о глубоких шахтных стволах, особенно если они проходятся до основного водопонижения, которое вызывает сжатие толщи горных пород и разрушение жесткой крепи ствола, не способной выдержать большие деформации продольного сжатия без нарушения сплошности. Наиболее известным [10] примером в этом плане является Южно-Белозерское железорудное месторождение: снижение напоров привело здесь к осадке поверхности примерно на 3 м и к аварийному состоянию ранее пройденных шахтных стволов (см. разд. 3.3). Для предотвращения аварий стволов необходимо введение в их конструкцию специальных "узлов податливости", способных деформироваться без нарушения сплошности, а для этого, конечно, нужен достаточно надежный прогноз процесса оседания.

### 1.1.3. Роль гидростатического взвешивания в оползневых процессах

Рассмотрим откос однородных "сухих" пород, находящийся в предельном равновесии (рис.1.1,а). На этом рисунке  $AC$  — потенциально наиболее опасная поверхность скольжения, т.е. поверхность, вдоль которой соотношение  $\eta$  сумм удерживающих  $T_{уд}$  и сдвигающих  $T_{сд}$  сил равно единице:

$$\eta = \frac{\sum_{AC} T_{уд}}{\sum_{AC} T_{сд}} = 1, \quad (1.3)$$

где  $T_{уд} = G \cos \varphi \cdot \operatorname{tg} \rho + c$ ;  $T_{сд} = G \sin \varphi$  (здесь  $G$  — вес столба пород с единичной площадью над поверхностью скольжения;  $\varphi$  — угол наклона поверхности скольжения;  $\rho$  — угол трения;  $c$  — сцепление).

В блоке  $ABC$  условно можно выделить две части: верхнюю  $NLBC$  ("призма активного давления"), где в каждой точке  $T_{сд} > T_{уд}$ , и нижнюю  $ALN$  ("призма упора"), где  $T_{сд} < T_{уд}$ <sup>1</sup>. Иначе говоря, верхняя

<sup>1</sup> Сказанное легко понять, если учесть, что угол наклона поверхности скольжения  $\varphi$  в верхней ее части в среднем больше, чем в нижней.



вблизи откоса за различными экранирующими перемычками (например, дайки водонепроницаемых пород) могут сохраняться высокие напоры, способные привести к обрушению, что особенно важно учитывать для откосов большой высоты. Например, на рис. 1.1,б отражены условия возникновения такого обрушения на глубоководном меднорудном карьере. После обильного выпадения осадков уровень подземных вод за перемычкой непроницаемых пород  $M'N$  поднялся на несколько десятков метров  $\Delta H$ ; в результате вдоль участка  $M'N$  длиной  $L$  развилось дополнительное нейтральное напряжение (равнодействующая его  $\Sigma \Delta \sigma_n = -\frac{1}{2} \gamma_0 L \Delta H$ ), соответственно упали эффективное напряжение и обусловленная им удерживающая сила трения, так что в конечном счете произошло обрушение борта карьера вдоль поверхности  $MM'N$ .

Наиболее часто гидростатическое взвешивание проявляется в развитии оползневых процессов параллельно с действием гидродинамических сил.

#### 1.1.4. Оползни, вызванные совместным действием гидростатических и гидродинамических сил

В условиях фильтрационного потока воды, испытывая сопротивление со стороны горной породы, оказывает на нее, в свою очередь, гидродинамическое давление, удельная (на единицу объема породы) величина которого  $f_0$  [7] определяется по формуле

$$f_0 = I \gamma_0, \quad (1.4)$$

где  $I$  — градиент потока; сила  $f_0$  направлена вдоль вектора скорости фильтрации.

Оползневые деформации, вызванные совместным действием гидростатического и гидродинамического давления, неоднократно наблюдались как на естественных склонах, так и на склонах различных гидротехнических земляных сооружений (дамбы, плотины и т.п.); в последнем случае деформации возникают наиболее часто при быстром спаде свободного уровня вблизи подтопленного откоса.

Роль гидродинамического давления в напряженном состоянии особенно существенна для глинистых пород, где градиенты могут измеряться большими величинами. Рассмотрим наклонный борт карьера, на котором располагаются внутренние отвалы (рис. 1.2). В основании борта под толщей аргиллитов лежит напорный пласт известняков с напором на кровлю  $H_0$ . Под влиянием перепада напоров в аргиллитах развивается восходящая фильтрация воды, приводящая к уменьшению эффективных напряжений в скелете глинистых пород. Учитывая, что сила гидродинамического давления направлена по нормали к пласту, причем  $I = (H_0 - H_B)/m$ , эффективное нормальное напряжение на площадке  $AA$  определяют по формуле

$$\sigma_{AA} = \gamma_B (m \cdot y) \cos \alpha - \gamma_0 (m - y) \cdot \frac{H_0 - H_B}{m}, \quad (1.5)$$

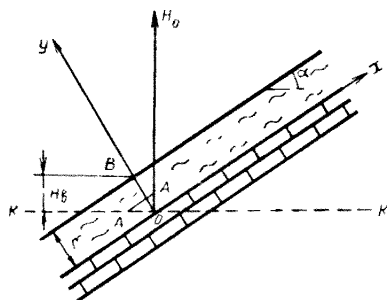


Рис. 1.2. Схема к расчету эффективных напряжений вблизи откоса

где  $\gamma_B$  — расчетный вес единицы объема пород с учетом взвешивания,  $\gamma_B = (\rho_{ск} - \rho_0) (1 - n)g$  (здесь  $\rho_{ск}$  — плотность минеральной составляющей горной породы;  $n$  — пористость).

Отсюда видно, что при больших напорах гидродинамические силы  $f_0$ , выражаемые формулой

$$f_0 = \gamma_0 (m - y) \frac{H_0 - H_B}{m}, \quad (1.6)$$

могут существенно снижать эффективные напряжения в скелете глинистых пород, вплоть до нулевых или отрицательных значений; это приводит к резкому уменьшению сил трения и интенсивному набуханию пород. В результате падает сопротивление массива сдвиговым деформациям и происходит оползень борта и внутренних отвалов, поверхность скольжения которого в нижней части обычно приурочена к контакту аргиллитов с водоносным пластом.

Таковы, например, довольно многочисленные и крупные оползни пород лежащего бока на карьерах североуральских бурогольных месторождений и на ряде других угольных карьеров [16]. Важно подчеркнуть, что возникновение описанных оползней практически не зависит от степени водообильности водоносного горизонта (вопреки представлению, что в этом смысле опасны лишь мощные водообильные пласты): главной здесь является величина напора. Отсюда, в частности, следует необходимость детального изучения (в период разведки месторождений) водоносных горизонтов, залегающих ниже полезного ископаемого, которым изыскатели часто не уделяют должного внимания.

Совместное влияние объемных гидростатических и гидродинамических сил на устойчивость откоса наиболее просто учесть, исходя из принципа эквивалентности объемных и контурных сил [7]. Применительно к инженерным методам оценки устойчивости жесткого оползневого тела вдоль фиксированной поверхности скольжения (см. рис. 1.1, а) из этого принципа вытекает возможность сведения гидростатического взвешивания и гидродинамического давления к единой результирующей силе, распределенной нормально поверхности скольжения с интенсивностью (на единицу площади)

$$f = \gamma_{II} h_{II}, \quad (1.7)$$

где  $h_{\Pi}$  — пьезометрическая высота в данной точке поверхности скольжения. При этом удельный вес пород  $\gamma_{\Pi}$  в пределах оползневого тела принимается вместе с водой, заключенной в них (т.е.  $\gamma_{\Pi} = [\rho_{\text{ск}}(1 - n) + \rho_0 n]g$ ), а для подтопленного откоса дополнительно учитываются силы гидростатического давления, нормальные к поверхности откоса.

Гидростатическое взвешивание и гидродинамическое давление существенно воздействуют на общую устойчивость, если значительная часть "призмы возможного оползания" располагается ниже депрессионной (пьезометрической) кривой, или при больших перепадах напоров вблизи откоса. Очень часто, однако, вблизи откоса формируется пологая депрессионная воронка, поэтому взвешиванию (относительно "поверхности скольжения") подвергается лишь небольшая часть пород, а градиенты измеряются малыми величинами; в подобных условиях роль гидростатических и гидродинамических сил обычно незначительная. Как показывают расчеты, на Лебединском карьере КМА эти силы снижают коэффициент запаса устойчивости в среднем на 3–4 %, а на Сарбайском — на 4–5 %. Еще меньше оказывается разница в степени устойчивости откосов при загрядительном и открытом дренаже: в приведенных примерах она не превышает 2 %. В этом заключается существенное отличие откосов бортов карьеров от откосов земляных плотин, в которых влияние гидростатических сил обычно оказывается достаточно ощутимым.

### 1.1.5. Значение избыточного порового давления при оползневых процессах

Своеобразным проявлением гидростатических и гидродинамических сил служит возникновение избыточного порового давления при приложении дополнительной нагрузки к слабопроницаемым (преимущественно глинистым) породам.

Рассмотрим механическую модель, изображенную на рис. 1.3. В стакане с жесткими стенками 2 тяжелый пористый поршень 3 площадью  $\omega$  опирается на пружину 4. Пространство над поршнем и под ним заполнено водой 1. При приложении к поршню дополнительной нагрузки  $\Delta G$  первоначальное равновесное состояние нарушается и вода из-под поршня начинает отжиматься вверх. Если проницаемость материала поршня мала, то процесс этот весьма замедлен и в первые моменты перемещение поршня вниз практически не фиксируется (вода почти несжимаема); следовательно, пружина пока не сжимается, т.е. вся дополнительная нагрузка ложится на воду, в которой возникает дополнительное гидростатическое давление, равное по величине напряжению  $\Delta\sigma_{\Pi} |_{t=0} = \Delta G/\omega = \Delta\sigma_{\Pi}$  (где  $t$  — время;  $\Delta\sigma_{\Pi}$  — дополнительное полное напряжение). Дополнительная нагрузка на пружину в это время отсутствует, как и дополнительное напряжение в ней  $\Delta\sigma_3 |_{t=0} = 0$ . По мере отжатия воды из-под поршня пружина начинает сжиматься, ее восприни-



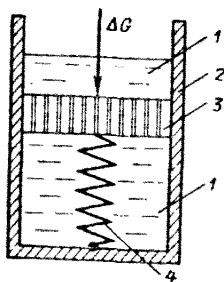


Рис. 1.3. Модель к объяснению механизма развития избыточного порового давления

мается все большая часть дополнительной нагрузки и, в конце концов, наступает новое равновесное состояние, при котором вся дополнительная нагрузка перекладывается на пружину:

$$\Delta\sigma_{\text{п}}|_{t \rightarrow \infty} = 0, \Delta\sigma_z|_{t \rightarrow \infty} = \Delta\sigma_{\text{п}}.$$

Пружина в этом примере имитирует скелет горной породы, вода — внутрипоровый раствор, проницаемость материала поршня отражает проницаемость породы; соответственно  $\Delta\sigma_z$  и  $\Delta\sigma_{\text{п}}$  — дополнительные эффективное и нейтральное напряжения, причем последнее равно по величине избыточному (по отношению к асимптотическому равновесному состоянию) поровому давлению. Очевидно, что для любого промежуточного момента времени величина  $\Delta\sigma_{\text{п}}/\Delta\sigma_z$  тем больше, чем меньше проницаемость породы и больше мощность сжимающегося слоя (толщина поршня). Поэтому избыточное поровое давление наиболее значительно при приложении дополнительных нагрузок к слоям глинистых пород не слишком малой мощности. Нужно, правда, отметить, что на деле избыточное поровое давление обычно меньше, чем это следует из описанной выше механической модели. Причин тому несколько: присутствие воздуха в порах (под поршнем), который достаточно хорошо сжимается; немгновенный характер приложения нагрузки; наличие в породе жестких связей (введите в модель параллельно с пружиной жесткий стержень, воспринимающий часть нагрузки уже при относительно небольших деформациях) и т.п. [10].

Кроме того, ранее мы считали, что деформаций скелета горной породы контролируются лишь скоростью отжатия воды из порового пространства. Между тем, во многих случаях после первой фазы деформирования, отвечающей этому условию, наступает вторая, при которой главным контролирующим фактором оказывается ползучесть скелета, т.е. его замедленная реакция на приложение дополнительных эффективных напряжений. Применительно к процессам уплотнения горных пород данная стадия деформирования получила название *вторичной консолидации*. Понятно, что оценки избыточного порового давления для этой стадии с ориентацией на изложенные выше представления (отвечающие этапу первичной, или фильтрационной, консолидации) окажутся резко завышенными. Более того, при вторичной консолидации избыточное поровое давление может во-

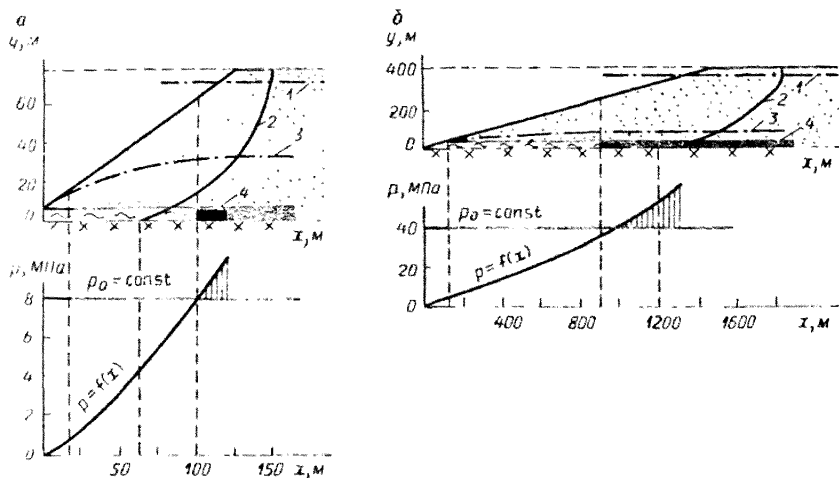


Рис. 1.4. Эпюры распределения давлений на глинистый пласт при малой (а) и большой (б) глубине карьера:

1 – исходный уровень подземных вод; 2 – плоскость скольжения; 3 – сниженный уровень; 4 – зона развития избыточного порового давления.  $p_0$  – исходное давление на глинистый пласт;  $p$  – давление после вскрытия месторождения

обще не проявляться, если скорость оттока воды из порового пространства “не отстает” от скорости сжатия скелета.

С ползучестью скелета обычно необходимо считаться, когда имеют дело с достаточно литифицированными горными породами, а при оценках напряженно-деформированного состояния намывных и насыпных грунтов она часто играет подчиненную роль.

Практически роль избыточного порового давления теперь достаточно очевидна: оно контролирует процесс уплотнения глинистых пород (по крайней мере, первую его фазу) и на первых порах препятствует росту эффективных напряжений и соответственно, сил внутреннего трения в горной породе до величин, отвечающих приложенной нагрузке; тем самым оно способствует возникновению оползневых процессов. Наиболее типичны такие оползни для откосов насыпных и намывных земляных сооружений – плотин, отвалов и др. Часто наблюдаются также деформации различных поверхностных сооружений – дорожных насыпей, бетонных и земляных плотин, отвалов, фундаментов зданий и т.п. вследствие замедленной осадки или выдавливания пород основания.

В качестве примера приведем оползень отвала Лебединского железорудного карьера. Отвал высотой порядка 90 м располагался в пойме реки, частично – на торфяном основании мощностью до 5 м. При пригрузке отвалом в торфах – слабых отложениях с малой проницаемостью – развивалось избыточное поровое давление, снижавшее их сопротивление сдвигу до весьма малых величин. В результате

торф начал выдавливаться из-под отвала с образованием мощного (5-6 м) вала выпирания вблизи его нижней кромки, а откос отвала оказался охваченным оползнем на протяжении нескольких сотен метров.

Учет избыточного порового давления при оценке параметров откосов может быть необходим не только при создании насыпных или намывных сооружений, но и при изучении пород естественного залегания, если вблизи откоса ожидается заметное понижение уровня подземных вод, поскольку уменьшение взвешивающего влияния воды приводит к увеличению давления на глинистые пласты со стороны вышележащих пород и развитию процессов уплотнения. В качестве примера на рис. 1.4 показана опора начального избыточного порового давления в прибортовой зоне глубокого карьера; величина избыточного порового давления достигает здесь 40 % от давления вышележащих пород.

При расчетах устойчивости откосов избыточное поровое давление учитывается в соответствии с общими принципами оценки силового воздействия воды в задачах статике водонасыщенных горных пород (см. разд. 1.1.4). В частности, при расчете по фиксированным поверхностям скольжения избыточное поровое давление может рассматриваться как контурная сила, которая вычитается из нормальных составляющих веса вышележащих пород.

### **1.1.6. Роль подземных вод в быстро протекающих геодинамических процессах**

В последнее время подземным водам придается особое значение во многих направлениях сейсмологических исследований. С помощью этих исследований решаются следующие задачи:

1) объяснение пульсационного характера ряда сейсмических процессов перераспределением масс подземных флюидов и давлений в них;

2) изучение землетрясений, возникающих при заполнении крупных водохранилищ. Механизм их во многом обусловлен возникновением дополнительных гидростатических и гидродинамических сил (с соответствующим уменьшением сил трения) вдоль потенциальных поверхностей перемещения породных масс или дополнительным нагружением массива весом воды в поверхностном бассейне (при слабо проницаемом его основании);

3) использование гидродинамических предвестников землетрясений — например, изменений напоров в пьезометрах, обусловленных скрытым деформированием и перераспределением напряжений;

4) изучение возможностей предотвращения землетрясения (конечно, при относительно неглубоком залегании его эпицентра) путем подземной закачки воды (см. разд. 3.4).

Рассмотрим для примера деформации и разжижения земляных масс под влиянием динамических (сейсмических, взрывных и др.) нагрузок, что особенно характерно для высоких земляных плотин, сложенных преимущественно водонасыщенными тонкозернистыми песками или пылеватыми слабосвязными грунтами. Если плотность таких грунтов невелика (пористость более 43 %), то динамическое сотрясение

нарушает их исходную структуру и вызывает переукладку зерен и уплотнение, для чего необходим, естественно, отток "лишней" воды из пор. Однако из-за низкой проницаемости грунта отток "не поспевает" за ростом нагрузки и последняя воздействует в основном на воду, вызывая появление избыточного порового давления. В результате грунт, исходные связи которого уже нарушены, течет подобно вязкой жидкости: сцепления в исходном материале практически нет, а трению между частицами препятствует избыточное поровое давление. Для возникновения такого разжижения необходимо, чтобы ускорение от динамической нагрузки превысило некоторую критическую для данного грунта величину. Примерно по этой схеме протекают многие деформации высоких дамб хвостов и шламохранилищ и т.п.

## 1.2. ПРОЦЕССЫ МЕХАНИЧЕСКОГО ВЫНОСА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ

Механический вынос частиц наиболее характерен для несвязных, раздельнозернистых пород или для заполнителя трещин в твердых (скальных и полускальных) породах. Нередко такой вынос отождествляют с суффозией и соответственно связанные с ним деформации пород называют суффозионными. Между тем термин "суффозия" изначально имел более узкий смысл, и поэтому, во избежание путаницы, мы будем далее говорить о *фильтрационных деформациях*, подчеркивая тем самым их связь именно с движением подземных вод, с наличием в фильтрующей породе гидродинамического давления (см. разд. 1.1.1), которое и является главным фактором механического выноса. Спектр фильтрационных деформаций довольно разнообразен: мы будем выделять в них суффозию, вынор и прорыв, оплывание и некоторые другие виды.

### 1.2.1. Механическая суффозия

Под собственно механической суффозией понимается вынос мелких частиц через поры крупнозернистого скелета. При этом вынос или имеет ограниченный характер, или приводит к разрушению грунта. Степень развития суффозии для данного грунта зависит в первую очередь от его коэффициента неоднородности и градиента фильтрации. Согласно исследованиям В.С. Истоминой, явления суффозионного разрушения наблюдаются преимущественно в песках с коэффициентами неоднородности  $\eta_n > 15-20$ . Построенный В.С. Истоминой опытный график (рис. 1.5) зависимости между коэффициентами неоднородности и критическими (с точки зрения прогрессирующего выноса) градиентами  $I_{кр} = f(\eta_n)$  показывает, что при  $\eta_n < 10-15$  суффозионное разрушение возникает лишь при высоких градиентах ( $I > 0.8-1$ ); вместе с тем ограниченный вынос мелких частиц может происходить и при меньших градиентах.

Возможная степень развития суффозионных процессов и их допустимые пределы определяются, с одной стороны, ожидаемыми градиен-

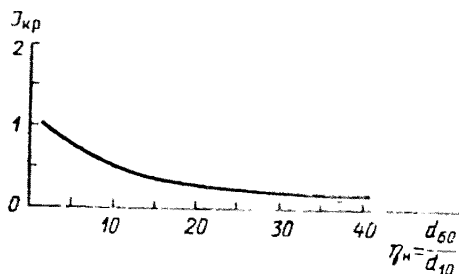


Рис. 1.5. График зависимости  $J_{кр} = f(\eta_n)$  (по В.С. Истоминной)

тами фильтрации, а с другой — характером работы и классом земляного сооружения. Так, высокие градиенты фильтрации, вызывающие прогрессирующую суффозию, могут наблюдаться вблизи фильтров водозаборных скважин, где суффозия приводит к образованию каверн, заилению скважин и порче насосного оборудования, а также вблизи низовых откосов земляных плотин или на участках основания плотин в нижнем бьефе. В последнем случае опасность для устойчивости плотины может представлять даже ограниченный суффозионный вынос, приводящий к снижению сопротивления сдвигу пород низового откоса или к увеличению сжимаемости пород основания с последующей неравномерной осадкой плотины. Поэтому борьба с суффозией здесь ведется особенно тщательно — путем устройства различного типа фильтров.

Исследования показывают, что в откосах открытых горных выработок, где градиенты фильтрации обычно относительно невелики, суффозия может развиваться (в ощутимых для прочности на сдвиг масштабах) лишь в ограниченных зонах (обычно не более 1 м) вблизи промежутка высачивания подземных вод, не приводя к крупным оползневым смещениям. В частности, исследования на многих карьерах не выявили ни одного оползня, обусловленного суффозионными процессами.

### 1.2.2. Фильтрационный выпор

При фильтрационном выпоре под влиянием гидродинамического давления приходят в движение одновременно все фракции грунта в пределах некоторого объема, непосредственно прилегающего к выходной границе фильтрационного потока — дну или откосу горной выработки, стенке скважины и т.п. Так, для возникновения выпора песков в пределах фильтрующего дна котлована необходимо выполнение условия (см. разд. 1.1.4)

$$f_0 = \gamma_0 I > \gamma_v, \quad (1.8)$$

где  $\gamma_v$  — расчетный вес единицы объема песков с учетом их гидростатического взвешивания.

Так как  $\gamma_v \approx 1 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3 \approx \gamma_0$ , для возникновения донного выпора

необходимы градиенты восходящего потока порядка единицы. Обычно это характерно лишь для весьма ограниченных участков дна, где выпор фиксируется по грифонам воды и взвешенного в ней песка. Процесс этот представляет опасность лишь при условии последующего возведения здесь тяжелых сооружений (например, бетонной плотины), плохо реагирующих на неравномерную осадку.

Аналогично для фильтрующего затопленного откоса с углом  $\alpha$  из условия предельного равновесия получаем:

$$I > \frac{\gamma_b}{\gamma_0} \cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} \rho} \quad (1.9)$$

или приближенно

$$I > 1 - \frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} \rho}, \quad (1.9a)$$

где  $\rho$  – угол трения в песках.

Из расчетов следует, что обычно градиенты  $I$  оказываются существенными в небольшой (мощностью порядка высоты промежутка высачивания) зоне подтопленного откоса, прилегающей к урезу воды. Наблюдения показывают, что в этой зоне имеет место локальный выпор грунта, в результате которого угол откоса уменьшается на небольшом участке.

В пределах промежутка высачивания – на незатопленной части откоса – возможность выпора следует учитывать при расчете толщины дренажной призмы<sup>1</sup>, предохраняющей фильтрующую часть откоса от деформаций. В противном случае выпор "перекрывается" процессами оплыwania (см. разд. 1.2.4).

В условиях горных работ фильтрационный выпор наиболее важен как вторая стадия прорыва подземных вод через водоупор (см. разд. 1.2.3), поскольку при отсутствии водоупорной перемычки между водоносным пластом и выработкой последняя неизбежно оказывает сильное дренирующее действие и снижает опасность выпора.

### 1.2.3. Прорыв подземных вод через водоупорную перемычку

Это один из важнейших видов деформаций, с которыми приходится сталкиваться в практике подземных разработок, и особенно при создании подготовительных выработок, которые часто проходятся в относительно водоупорных породах при несниженных напорах в соседних водоносных горизонтах. В результате подчас оказываются затопленными или заполненными песками километры подземных выработок.

<sup>1</sup> При непосредственном вскрытии выработкой водопроницающей зоны эта стадия процесса, естественно, исключается (см. разд. 1.2.5).

Прорыв начинается нарушением сплошности водоупорной перемычки<sup>1</sup> под влиянием гидростатических и гидродинамических сил, после чего в выработку поступают вода и механическая взвесь (последняя часто образуется вследствие фильтрационного выпора водоносных пород в образовавшуюся при прорыве водопрводящую зону). При этом первоначальная деформация перемычки (до нарушения ее сплошности), практически не зависящая от водообильности напорного пласта, может развиваться в виде: 1) поперечного сдвига — при небольшой ширине выработки, соизмеримой с мощностью водоупорной перемычки, что характерно для подготовительных выработок; 2) прогиба — при больших размерах, характерных для очистных (добычных) выработок.

Во втором случае силовое воздействие воды обычно не является определяющим на фоне других горно-геологических факторов (в первую очередь таких, как перераспределение напряжений от веса пород вблизи выработки и образование техногенной трещиноватости), особенно с учетом интенсивного защитного дренажа, предваряющего очистные работы (см. гл. 3). Рассмотрим первый из упомянутых случаев.

Штрек 1 отделен водоупорным слоем 2 от водоносного напорного пласта 3 (рис. 1.6). Прорыв в штрек произойдет, если давление воды на "водоупорную пробку"  $ABDC$  превысит давление призмы  $ABDC$  и силы сопротивления сдвигу по поверхностям  $AC$  и  $BD$ . Из условия предельного равновесия легко получаем избыточный напор  $H_{пр}$ , приводящий к образованию прорыва [10]:

$$H_{пр} = \frac{m}{\gamma_0} \left( \gamma_0 + \frac{2c}{b - \xi m \operatorname{tg} \rho} \right) \approx \frac{im}{\gamma_0} \left( \gamma_0 + \frac{2\tau_c}{b} \right), \quad (1.10)$$

где  $\gamma_0 = \rho_n g$  — удельный вес пород водоупорного слоя (здесь  $\rho_n$  — плотность пород);  $c$  — сцепление;  $\xi$  — коэффициент бокового давления;  $\rho$  — угол трения;  $\tau_c$  — общее сопротивление сдвигу.

Аналогично можно оценить опасность прорыва в шахтный ствол.

Отсюда видно, что для выработок больших размеров можно с некоторым запасом ориентироваться на соотношение

$$H_{пр} = \frac{m}{\gamma_0} \gamma_0 \approx 2m, \quad (1.11)$$

однако для реальных подготовительных выработок недоучет второго слагаемого в выражении (1.10) будет приводить к совершенно неверным представлениям о возможности прорыва.

Для оценки условий ведения открытых горных работ этот вид деформаций представляет ограниченный интерес, хотя при наличии мощных и водообильных горизонтов иногда приходится считаться с возможностью распространения зоны деформированных водоносных пород в глубь основания нерабочего борта, поскольку это может привести к его проседанию.

<sup>1</sup> При непосредственном вскрытии выработкой водопрводящей зоны эта стадия процесса, естественно, исключается (см. разд. 1.2.5).

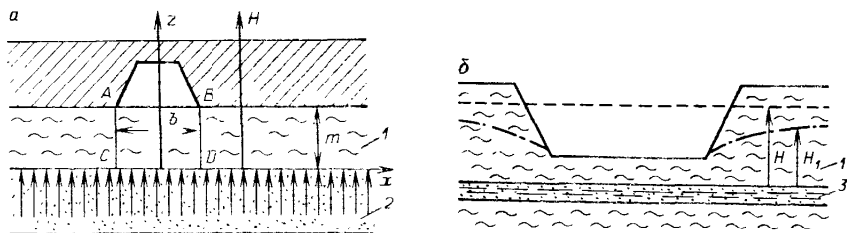


Рис. 1.6. Схема к оценке гидродинамической ситуации на участке возможного прорыва подземных вод в штрек (а) и котлован (б):

1 — водоупорные породы (глины); 2 — пески; 3 — алевролиты, содержащие напорные воды.  $H$  и  $H_1$  — напоры в пласте алевролитов до и после строительства котлована

Кроме того, в слабопроницаемых водоносных породах одна лишь выемка вышележащих пород в карьере (котловане) может приводить к снижению напоров и устранению возможности прорыва. В качестве примера рассмотрим котлован Саратовской ГЭС. Здесь напорный водоносный горизонт был приурочен к прослою алевроитов в толще глин (см. рис. 1.6, б). При выемке котлована полное давление на алевроиты снизилось, эффективное напряжение в них соответственно упало [см. формулу (1.1)], пористость вследствие декомпрессии возросла и напоры существенно снизились. Увеличение свободного для воды объема порового пространства не компенсировалось боковым притоком, который был замедлен из-за низкой проницаемости пород. В конечном счете это сделало ненужным предварительное водопонижение в период, предшествующий возведению в котловане тяжелого гидротехнического сооружения.

#### 1.2.4. Опыливание

Под опыливанием понимается поверхностный перенос песчаных частиц подземными водами, вытекающими на откос в пределах промежуточного высачивания. При этом зона опыливающего песка (рис. 1.7) может захватить весьма широкую полосу (десяtkи метров), что может привести к нарушению общей устойчивости откоса. Меньшее значение имеет опыливание на подтопленных откосах, так как в этом случае большая часть воды фильтруется через подводную зону. В целом важно отметить, что в реальных условиях влияние стекающей по откосу воды нередко весьма существенно. Так, в котлованах для гидротехнических сооружений зафиксированы значения уклонов фильтрующего откоса порядка 0,07–0,09, что в 3–4 раза меньше уклонов откоса без учета стекающей воды.

Методика оценки деформаций опыливания дана в работе [10] (см. разд. 4.5). Сравнение результатов расчетов по приведенной методике с данными наблюдений в котловане Волгоградской ГЭС им. XXII съезда КПСС и на Лебединском карьере КМА показывает ее надежность при исследовании несцементированных средних и мелкозернистых песков. Для неоднородных песков ( $\eta_n > 15-20$ ) такой расчет дает завышенные величины языков опыливания, так как он не учитывает явление естественной "отмостки", возникающей вследствие постепенного накопления в пределах зоны опыливания крупнозернистого материала. Отметим также, что если



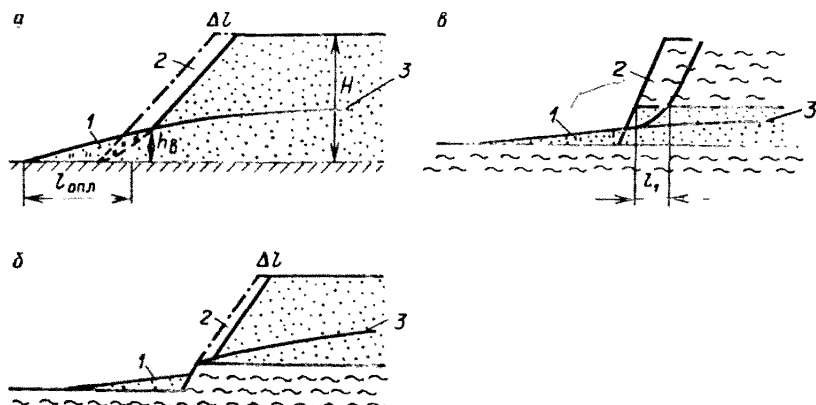


Рис. 1.7. Схема оплывающего откоса:

*а* — водоупор не "подрезан"; *б* — водоупор "подрезан"; *в* — обрушение глин при оплывании песков. 1 — оплывший песок; 2 — зона обрушения; 3 — депрессионная кривая

пески обладают некоторым сцеплением и песчаный откос имеет угол более  $35^\circ$ , то оплывание вызывает обрушение песчаного уступа и увеличение массы оплывающего песка, в результате чего величины языков оплывания оказываются больше расчетных. Отсюда следует, что для сокращения языков оплывания в этом случае целесообразно по возможности уменьшать высоту фильтрующего уступа.

Процесс оплывания происходит относительно равномерно, лишь когда перед откосом имеется площадка для размещения оплывающих масс песка. Если водоупор "подрезан", так что поверхность его кровли пересекает линию откоса в точке, лежащей выше основания уступа (см. рис. 1.7, *б*), то оплывание характеризуется резко выраженной неравномерностью и приводит к деформациям более сложного типа: процесс локализуется на отдельных участках, где он протекает весьма интенсивно (образуются промоины, а при устойчивых сводах в песках, обладающих сцеплением — пещеры), в то время как на остальной части откоса он развивается сравнительно слабо. Естественно, что в таких случаях какие-либо расчеты неприменимы и приходится ориентироваться лишь на данные наблюдений, а для проектируемых объектов — принимать решение по аналогии.

Оплывание песчаных откосов легко предотвращается путем пригрузки их в пределах промежутка высачивания слоем крупнозернистого материала.

## 1.2.5. Фильтрационный вынос вдоль трещин

В слабосцементированных породах, обладающих естественной трещиноватостью, может наблюдаться фильтрационный размыв и вынос частиц вдоль трещин. Этот процесс носит эрозионный характер и напоминает размыв русла открытым потоком. При определенных условиях он может привести к образованию подземных пустот и провалных воронок (так называемый песчаный карст).

Ввиду большой сложности процесса математическая интерпретация его затруднена. Ясно, однако, что чем меньше угол откоса, тем быстрее вырабатывается профиль эрозионного равновесия и затухает процесс выноса. Так, наблюдения на Лебединском карьере КМА показали, что на тех участках борта, где угол наклона не превышал  $25^\circ$ , вынос частиц вдоль трещин в сцементированных железистым цементом разностях песков быстро прекращался и нарушений не отмечалось. Наоборот, при крутых углах вынос быстро прогрессировал, в процесс вовлекались все новые массы песка и в конечном счете возникали подземные пустоты, сопровождавшиеся провальными воронками на поверхности.

Этот вид деформаций встречается редко и может получать заметное развитие лишь в слабосцементированных (сцепление меньше 0,03 МПа) песчаниках с низким содержанием глинистого материала. Борьба с фильтрационным выносом по трещинам может вестись с помощью дренажных работ или пригрузки фильтрующего откоса дренажным материалом.

В твердых породах действие фильтрационных сил может привести к выносу рыхлого заполнителя трещин. Обычно этот процесс протекает в ограниченных масштабах и не влияет на устойчивость массивов, что подтверждается наблюдениями на многих карьерах и гидротехнических сооружениях. Например, натурные исследования в котлованах Каховской и Чарвакской ГЭС показали, что заметный вынос рыхлого заполнителя происходит лишь при очень высоких градиентах ( $I > 2$ ). С возможностью такого выноса следует, однако, считаться, оценивая вероятные изменения проницаемости пород при строительстве и эксплуатации того или иного сооружения.

Кроме того, он может приводить к образованию каверн и провалных воронок в вышележащих песчаных породах, если они вовлечены в процесс выноса. Конечно, особенно опасен такой вынос при подземной разработке, поскольку может приводить к катастрофическим прорывам воды в горные выработки. Так, на одном из полиметаллических месторождений Средней Азии, приуроченном к трещиноватым известнякам, нередко прорывы с начальными водопитоками в несколько тысяч, а иногда до 20 тыс. м<sup>3</sup>/ч и более.

Возникновение эрозионного размыва наиболее вероятно в закарстованных породах, на участках коротких путей фильтрации из водохранилищ, каналов и т.п. Прогнозирование этого процесса с количественными оценками практически

невозможно, поэтому приходится ограничиваться установлением возможности и масштабов его развития, исходя из положения в массиве, состава, состояния и распределения заполнителя. Поскольку эрозионный размыв изменяет гидравлические условия и режим движения подземных вод, данный процесс имеет неустановившийся во времени характер развития, который следует учитывать при их изучении.

Особым видом деформаций является "соляной" карст, связанный с быстрым растворением некоторых минералов (галит, гипс, ангидрит и др.) на контакте с водоносными породами. Он может стать причиной нарушения оснований гидротехнических сооружений и откосов бортов карьеров, так как происходит быстро вследствие роста градиентов фильтрации или опреснения воды после вскрытия соляных отложений. Такие явления наблюдались, например, на Калушском соляном карьере, где в результате растворения солей образовались многочисленные воронки, нередко на значительном (до 200 м) удалении от откоса.

Процессы растворения и выноса солей (выщелачивания) могут происходить не только на контакте с водоносными породами, но и вдоль естественных или техногенных нарушений сплошности соленосной толщи (которая в ненарушенном состоянии практически непроницаема), а также из плохо затампонированных скважин (известны, например, случаи катастрофического затопления соляных рудников через старые скважины). Принципы и методы прогнозирования этих процессов разработаны недостаточно.

### 1.3. ТЕХНОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ВЛИЯНИЕМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В настоящем разделе рассматриваются лишь техногенные изменения прочности горных пород под влиянием подземных вод в процессе строительства и эксплуатации горного предприятия. При этом будут анализироваться три основные группы пород: 1) скальные и полускальные (твердые); 2) раздельнозернистые (пески); 3) мягкие связные (глинистые). Особо будут рассмотрены изменения прочности засоленных пород.

В этом плане изменения прочности *пород первой группы* обусловлены главным образом процессами физического и химического выветривания, которые оказывают интенсивное воздействие на горные породы после вскрытия их карьером.

В результате выветривания происходит "измельчение" блоков твердых пород: средние размеры блоков таких пород, как алевролиты или глинистые песчаники, уменьшаются в 10–20 раз. Процесс этот протекает весьма интенсивно, захватывая в течение года приповерхностную зону мощностью до 20 см. В этой зоне прочность некоторых пород (аргиллиты, алевролиты) снижается на 70–100 %, а за несколько лет может уменьшиться в 5–15 раз и более. Продукты выветривания непрерывно удаляются с поверхности откоса под действием гравитационных сил и поверхностного смыва, что приводит к полной эрозии первоначально заданной формы откоса.

Кроме того, некоторые твердые породы, обладающие высокой влажностью, при больших динамических нагрузках склонны к изменениям, внешне сходным с тиксотропными. Однако эти изменения захватывают лишь небольшую зону вблизи точки приложения нагрузки (например, призабойную зону скважины при ее проходке), так что при оценке устойчивости массивов их обычно можно не учитывать.

Параметры прочности *пород второй группы*, представленных песчано-гравелистыми отложениями без существенной примеси пылеватых и глинистых частиц, под воздействием воды практически не меняются. В частности, уменьшение сил внутреннего трения в песках при наличии восходящих потоков, приводящее к образованию так называемых пылунов, а точнее — псевдопылунов, связано с изменением не свойств (угол внутреннего трения) песков, а их напряженного состояния за счет действия гидродинамических сил. Поэтому следует очень внимательно относиться к утверждениям о "пылуночной" природе тех или иных пород, столь часто встречающимся в отчетах по результатам изысканий, где к пылунам обычно относят широкий круг пород — от чистых мелко- и среднезернистых песков до плотных песчаных глин. Нередко при оценке устойчивости откосов единственным основанием для такого рода выводов служит появление "пробки" разжиженных пород в скважинах или прорыв пылунов в подземные выработки. При этом не учитывается тот очевидный факт, что различие напряженного состояния пород (в первую очередь гидростатического давления) вблизи скважин и подземных выработок, с одной стороны, и вблизи фильтрующих откосов, с другой, делает совершенно неправомерными такого рода аналогии.

Сопоставим, например, значения гидродинамического давления вблизи скважины  $f_{0c}$  и карьера  $f_{0k}$ , вскрывающих один и тот же водоносный горизонт с водопроницаемостью  $T$  [см. формулу (1.4)]:

$$\frac{f_{0k}}{f_{0c}} = \frac{\gamma_0 I_k}{\gamma_0 I_c} = \frac{Q_k}{T 2 \pi r_k} \frac{T 2 \pi r_c}{Q_c} = \frac{Q_k}{Q_c} \frac{r_c}{r_k}, \quad (1.12)$$

где  $Q_k$  и  $Q_c$  — расходы откачки карьера и скважины;  $r_k$  и  $r_c$  — расчетные радиусы карьера и скважины.

При  $Q_k/Q_c \approx 10 - 100$  и  $r_k/r_c \approx 10^3 - 10^4$  получаем, что гидродинамическое давление на контуре карьера примерно на два порядка меньше, чем вблизи скважины.

Явления "разжижения" песков (см. разд. 1.1.6) следует воспринимать не как результат изменения их "истинного угла внутреннего трения" под влиянием воды, а как следствие действия гидродинамических сил, возникающих при динамических нагрузках.

Очевидно, что свойства истинных пылунов, т.е. пород, угол внутреннего трения которых близок к нулю, могут проявлять лишь некоторые водноносные пылеватые пески и супеси, залегающие около земной поверхности. По последним данным, эти свойства могут быть обусловлены деятельностью бактерий.

Особого рассмотрения заслуживает вопрос о возможном снижении прочности песков в результате механической суффозии (см. разд. 1.2.1). С увеличением содержания глинистых частиц механические свойства раздельнозернистых пород все в большей степени зависят от количества поровой воды, так что поведение их в этом плане становится во многом аналогичным поведению глинистых пород.

Влияние подземных и поверхностных вод на прочность водонасыщенных пород третьей группы проявляется в основном в их набухании в результате выемки пород и уменьшения давления на слой глин. Как показывают компрессионные испытания [10], интенсивное набухание начинается чаще всего при разгрузке глин до достаточно малого напряжения, которое называют силой эффективного набухания. Так, для каолиновых глин оно обычно не превышает 0,05 МПа, а для монтмориллоновых может достигать 0,6 МПа; это означает, что в первом случае набухание захватит лишь зону, непосредственно примыкающую к поверхности вскрытого грунта (до глубин порядка первых метров), а во втором глубина набухания будет измеряться десятками метров.

Набуханию также способствует осмотическое всасывание, в значительной степени вызванное тем, что под влиянием осушительных систем в водоносных слоях нередко заметно снижается минерализация воды (по сравнению с природной). В глинах, обладающих сцеплением упрочнения, эти процессы развиваются, лишь когда сила набухания превышает прочность жестких структурных связей, обусловленных цементирующими соединениями. При этом наиболее активно процесс набухания протекает вдоль трещин и особенно вдоль плоскостей напластования: интенсивное набухание нередко происходит лишь на контактах глинистого пласта с водоносными породами и быстро затухает с удалением от них. Одна из причин этого явления заключается в том, что во многих случаях (особенно в плотных глинах, обладающих сцеплением упрочнения) контактная зона глинистого пласта нарушена многочисленными микротрещинами, по которым вода поступает в породу. Кроме того, значение осмотического градиента максимально именно на контактах глинистых и водоносных пород. Наконец, в контактном слое, который набухает в первую очередь, происходит выделение газа, растворенного в поровой воде, в результате чего проникновение воды во внутренние зоны пласта существенно затрудняется.

Вследствие набухания контактная зона глинистого пласта часто оказывается в мягкопластичном состоянии, что является одной из причин возникновения "контактных оползней".

Уменьшение давления на глинистый пласт, приводящее к набуханию, может быть обусловлено не только выемкой вышележащих пород, но и другими факторами. Например, эффективное давление может уменьшаться под действием гидростатического взвешивания или гидродинамических сил, возникающих при восходящей фильтрации через глины (см. разд. 1.1.4). Под влиянием гидродинамического давления пористость глинистых пород увеличивается, причем набухание максимально в нижней части слоя. Поэтому основание глинистого водопора, в том числе и сложенного такими плотными породами, как аргиллиты или

алевролиты, часто оказывается в мягкопластичном или даже текучем состоянии (см. разд. 1.1.4).

Супеси и легкие суглинки подвергаются интенсивному набуханию лишь вблизи поверхности фильтрующих откосов вследствие малых величин максимального напряжения набухания. Процесс набухания таких пород на поверхности откосов обычно завершается полной потерей ими связности и переходом в текучее состояние, что приводит к оплыванию набухших пород слоями 15–20 см даже при пологих углах откосов ( $18\text{--}20^\circ$ ); такими циклическими деформациями в конечном счете откос может быть охвачен на глубины в десятки метров.

Ввиду того, что набухание связано с фильтрацией воды через глинистые породы, скорость его зависит от фильтрационных свойств пород: наиболее быстро оно протекает в песчаных и пылеватых глинах, наиболее медленно — в “жирных” глинах. Понятно также, что скорость набухания будет возрастать при увеличении градиентов фильтрации воды через толщину набухающих пород. Поэтому, в частности, набухание весьма интенсивно при стекании воды по поверхности откоса глинистых пород, если до этого вся вода в них находилась в капиллярно-натяженном состоянии. Под влиянием поверхностных вод капиллярные силы (“обжимающие” глинистую породу) исчезают и начинается фильтрация этих вод в глины под большим градиентом; по мере движения жидкости влажность глин повышается, градиент уменьшается и в конце концов фильтрация почти полностью прекращается.

Для оценки степени снижения прочности глин при набухании предварительно проводят испытания на сдвиг глинистых образцов, выдержанных под водой при различных нормальных напряжениях. По результатам испытаний строят график сопротивления сдвигу, который используют при расчете устойчивости откоса (рис. 1.8). Ценный материал для изучения набухания, особенно для учета скорости набухания, которую в лабораторных условиях можно оценить лишь сугубо ориентировочно, дают полевые наблюдения.

В глинистых породах, залегающих выше уровня подземных вод, дополнительное увлажнение почти всегда приводит к ухудшению прочностных свойств вследствие увеличения толщины гидратных оболочек, набухания и растворения цементирующих соединений. Наблюдения показывают, что увлажнение пород в зоне аэрации и обусловленные им изменения количества связанной воды оказывают весьма ощутимое влияние на сопротивление сдвигу при влажности, меньшей максимальной молекулярной влагоемкости; при дальнейшем увеличении влажности значительные изменения прочности отмечаются лишь по достижении водонасыщенного состояния, т.е. при возможности набухания.

Именно с увеличением влажности связаны своеобразные деформации, возникающие на некоторых старых отвалах пылеватых пород при их обильном водонасыщении. В качестве примера можно привести оползни-оплывины внутренних отвалов Янгартного карьера, где за короткий период (порядка нескольких минут)

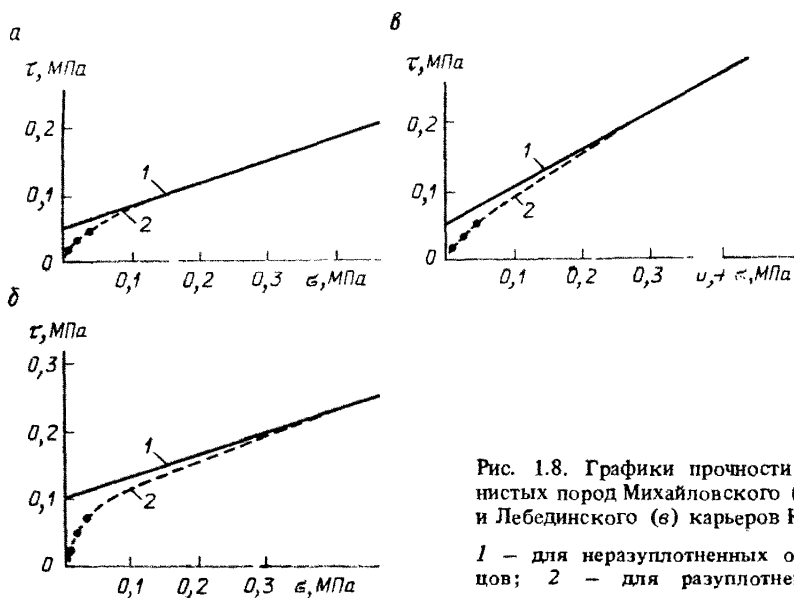


Рис. 1.8. Графики прочности глинистых пород Михайловского (а, б) и Лебединского (в) карьеров КМА:

1 — для неразуплотненных образцов; 2 — для уплотненных

деформациями были охвачены значительные массы пород (около 300 тыс. м<sup>3</sup>), полностью перекрывшие обычную траншею. Аналогичные деформации отмечались на бурогольном карьере Шпресталь в ГДР. Механизм образования оплывин старых отвалов пылеватых песков, супесей и суглинков представляется следующим образом [16]. После отсыпки в отвалы породы находятся в неводонасыщенном состоянии, имеют рыхлое сложение и располагаются под углом естественного откоса (34–36°). При постоянном поступлении воды в их нижней части образуется зона водонасыщенных пород, начинается высачивание воды у основания откоса отвалов и возникают небольшие сплывы на участке высачивания. При обильном выпадении осадков уровень воды в отвалах быстро повышается и оплывание захватывает все большую часть откоса. Условия для возникновения массового оплывания появляются при таком уровне воды в отвалах, при котором средняя влажность пород достигает предела текучести. Как известно, влажность пылеватых грунтов на пределе текучести составляет 20–25 %. Если пористость пылеватых пород в отвалах 30–35 %, то для достижения средней влажности пород, соответствующей пределу текучести, необходимо, чтобы уровень воды поднялся не более, чем на половину высоты отвала.

В глинистых породах, обладающих сцеплением упрочнения, природные воды могут вызывать растворение или выщелачивание цементирующих соединений. Наиболее характерны такие процессы для загипсованных, карбонатизированных и засоленных пород (лессовидные суглинки, мергельные глины и т.п.), приуроченных к зоне аэрации, когда они испытывают дополнительное увлажнение (например, техническими водами). При строительстве инженерных сооружений скорости фильтрации подземных вод нередко резко возрастают, кроме того, в ряде случаев воды заметно опресняются за счет подпитки из поверхностных водоемов, поэтому растворение и выщелачивание цементирую-

щих соединений возможно в породах, обладающих сцеплением упрочнения и залегających ниже уровня грунтовых вод. Это обстоятельство особенно важно учитывать при проектировании плотин.

В принципе, выщелачивание, т.е. растворение и вынос солей, как правило, цементирующих исходную горную породу, могут происходить и при отсутствии гидравлического градиента; последний, однако, может заметно активизировать этот процесс за счет подтока новых порций воды, препятствующих установлению гидрохимического равновесия в системе "порода – подземный раствор". В результате выщелачивания пористость (трещиноватость) и проницаемость увеличиваются, а прочность породы снижается – падает ее сопротивление сдвигу (исчезает структурное сцепление), увеличивается сжимаемость. Наиболее типичное и практически важное последствие такого рода процессов – просадка лессовых пород, приводящая к многочисленным деформациям поверхностных сооружений.

#### **1.4. ВЛИЯНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ТЕХНОЛОГИЮ ГОРНЫХ РАБОТ**

##### **1.4.1. Влияние подземных вод на условия эксплуатации горнотранспортного оборудования и буровзрывные работы**

Поступление подземных вод в горные выработки часто оказывает очень сильное влияние на условия труда рабочего персонала и производительность оборудования. В особенности это относится к забоям подземных горных выработок, где люди и высокопроизводительные механизмы сконцентрированы на ограниченном пространстве. В частности, скорость проходки шахтных стволов при обводнении забоев может снижаться во много раз. Катастрофические последствия могут иметь прорывы воды в подземные выработки с интенсивностью, измеряемой тысячами кубических метров в час, при этом происходит затопление или заливание многокилометровых горных выработок (иногда – десятки километров). Известно много случаев, когда вследствие затопления выходили из строя целые рудники, в частности соляные шахты.

Во избежание подобных последствий часто приходится идти на коренное изменение проекта горнопроходческих работ или принимать специальные дорогостоящие меры по водоподавлению, например отказываться от высокопроизводительной системы выемки полезного ископаемого с полным обрушением кровли в пользу менее экономичной, но сравнительно безопасной системы с закладкой выработанного пространства, или проходить шахтные стволы с предварительным замораживанием или тампонажем водоносных пород.

Кроме того, поступление воды в рабочие забои и высокая влажность пород нередко приводят к дополнительным осложнениям при вскрышных и добычных работах. Так, на некоторых месторождениях меди вследствие высокой кислотности



сти воды происходит интенси́вная коррозия металлических частей. На месторождениях самородной серы поступление в карьер воды с большим содержанием сероводорода существенно загрязняет атмосферу.

Особенно большое влияние на ведение открытых горных работ оказывают деформации откосов бортов и уступов (за исключением случаев использования средств гидромеханизации, когда вода обычно, наоборот, способствует улучшению условий горных работ). Так, наряду с оползнями серьезные затруднения в работе горного оборудования вызывают оплывание песчаных пород (см. разд. 1.2) и циклические деформации песчано-глинистых пород (см. разд. 1.3).

Степень влияния этих процессов зависит от типа вскрышного или добычного оборудования. Так, для экскаваторов типа мехлопат, работающих в условиях крутых уступов, и для многочерпаковых экскаваторов развитие циклических обрушений в опесчаненных глинах, вызванное действием подземных вод, нередко приводит к необходимости отказа от ранее запроектированного оборудования: указанные экскаваторы заменяют драглайнами или гидромониторными установками, на работу которых эти процессы влияют в меньшей степени. Например, на Роздольском серном карьере из-за многочисленных циклических деформаций откосов четвертичных суглинков было принято решение о замене экскаваторов гидромониторами. Дренаж в таких случаях обычно не может существенно улучшить условия работ, так как циклическим обрушениям подвергаются уступы глинистых пород, плохо отдающих воду.

С точки зрения развития процессов оплывания, наибольшие ограничения налагаются на применение многочерпаковых экскаваторов верхнего черпания и экскаваторов типа мехлопат: длина языков оплывания в этом случае не должна превышать 8 м. При работе роторных экскаваторов длина языка оплывания лимитируется параметрами экскаваторов, в частности, удалением путей или ходовых частей от основания уступа. Для драглайнов максимально допустимая длина языка оплывания определяется в каждом конкретном случае шириной заходки и длиной стрелы экскаватора (обычно она превышает 15 м). Особенно большие языки оплывания допускаются при отработке пород гидромониторными установками: в этом случае их длина (порядка 30–40 м) лимитируется только шириной вышерасположенной рабочей бермы.

В зимнее время условия ведения открытых горных работ из-за влияния подземных вод также ухудшаются. При наблюдениях за работой карьеров, вскрывающих песчано-глинистые породы, установлено резкое снижение в зимнее время объемов вскрыши (до 50 % по сравнению с летними месяцами) и производительности вскрышных и добычных экскаваторов (на 20–30 %), увеличение себестоимости полезного ископаемого (на 3–8 % на угольных карьерах) и себестоимости вскрыши (до 50 % по сравнению с летним периодом).

Не вдаваясь в подробный анализ всех факторов, ухудшающих условия разработки в связи с низкими температурами, рассмотрим лишь те из них, которые связаны с наличием воды в грунте. К ним в первую очередь относятся снижение производительности экскаваторов и транспорта вследствие промерзания пород, образование наледей и намерзания пород на зубья и стенки ковша, а также на стенки и днище транспортных сосудов.

Порода, намерзающая на поддерживающие ролики конвейеров, нередко разрушает конвейерную ленту. Намерзание породы на ходовые части экскаваторов требует постоянного ухода за ними, а намерзание породы на стенки думпкаров и кузовов приводит к снижению объема перевозимого грунта и требует систематической очистки.

Важно отметить, что для промерзания пород обычно достаточно воды, поступающей из атмосферы, и той части подземных вод, которая остается в порах после снижения первоначального уровня. Практика открытых горных работ показывает, что наледи развиваются в заметных масштабах лишь в районах с достаточно низкими зимними температурами (средняя температура трех наиболее холодных месяцев  $-25 \dots -30^{\circ}\text{C}$ ).

Производительность многих видов горного и транспортного оборудования резко падает при работе с липкими грунтами, особенно при их конвейерной транспортировке. Налипание породы на стенки и днище ковша или вагона уменьшает их вместимость, а следовательно, и производительность оборудования иногда на 15–20 %, вызывает перегрузку привода и нарушение устойчивости экскаватора. Оно крайне усложняет использование вагонов карьерного транспорта и автосамосвалов, поскольку удаление налипших масс отнимает много времени. Процесс налипания чаще всего прекращается при таких значениях влажности пород, которые не могут быть достигнуты экономически оправданными методами дренажа.

Наряду с налипанием существенное влияние на эффективность работы горного и транспортного оборудования оказывают процессы размокания и тиксотропного разжижения глинистых и некоторых других пород под ходовыми частями автомашин и экскаваторов.

Увеличение веса пород, связанное с обводненностью, приводит к снижению эффективности их перевозки.

Наконец, обводнение скважин и шпуров усложняет проведение буровзрывных работ и вызывает необходимость выбора более трудоемких и дорогостоящих их методов.

Из сказанного ясно, что влияние подземных и поверхностных вод на условия работы горного и транспортного оборудования должно в ряде случаев определять выбор технологической схемы вскрытия и отработки месторождения. Понятно, что это влияние необходимо всесторонне учитывать при проектировании горных работ. Сложность такого учета заключается в том, что возможное влияние подземных и поверхностных вод на условия работы горного и транспортного оборудования подчас трудно заранее охарактеризовать количественными оценками. В связи с этим большое значение имеет разработка таких оценок по данным специально организованных наблюдений при вскрытии и эксплуатации месторождения.

В целом же необходимо подчеркнуть, что большая группа рассмотренных выше процессов очень мало зависит от интенсивности работ по осушению месторождения.

## 1.4.2. Влияние подземных вод на качество и полноту выемки полезного ископаемого

Обводненность полезного ископаемого нередко оказывает большое влияние на его качественную характеристику. Например, уменьшение влажности бурых углей на 1 % сокращает затраты на их брикетирование на 5–6 %. Чаще всего при разработке месторождений влажность добываемого полезного ископаемого оказывается выше природной. Это объясняется тем, что в результате выемки полезное ископаемое набухает или частично разрыхляется в процессе экскавации и под влиянием буровзрывных работ и впитывает дополнительную влагу. Источником влаги могут быть подземные воды, приуроченные к пласту полезного ископаемого или к граничащим с ним слоям, атмосферные осадки, технические воды, а также воды, стекающие с расположенных выше уступов.

Максимально возможное снижение влажности полезного ископаемого, а также зависимость влажности от набухания следует определять по образцам пород естественного сложения уже в период детальной разведки месторождения. Нередки случаи, когда несмотря на высокую влажность полезное ископаемое практически не содержит гравитационной воды. В качестве примера можно привести бурые угли Ермолаевского месторождения, природная влажность которых составляет 55–56 %. Невнимательное отношение к вопросу о возможных пределах снижения влажности полезного ископаемого нередко приводит к неоправданным нареканиям на работу дренажной системы карьера: считается, что повышенная влажность является следствием недостаточно интенсивной работы осушительных устройств, в то время как она обусловлена самим характером поровой воды.

Подземные и поверхностные воды могут стать причиной разубоживания полезного ископаемого породами, находящимися в текучем состоянии. Для устранения таких явлений необходимо проводить мероприятия по ограничению фильтрационных деформаций пород, вмещающих полезные ископаемые.

Наконец, подземные воды могут оказаться одной из главных причин больших потерь полезного ископаемого при подземной его выемке под водными бассейнами, реками или мощными водоносными горизонтами: во избежание прорывов воды приходится оставлять крупные или частые целики продуктивных пород, что в ряде случаев (например, в соляных шахтах) приводит к снижению степени выемки полезного ископаемого на десятки процентов.

### Контрольные вопросы

1. Объясните взаимосвязь между эффективными и нейтральными напряжениями. Почему при откачке воды из глубоких скважин их фильтровая колонна может механически разрушаться?
2. Объясните механизм образования оползней при затоплении отработанных карьеров. Эффективен ли дренаж водоносных горизонтов, вскрытых карьером (на полную мощность), с точки зрения общей устойчивости борта?
3. Объясните механизм образования оползней пород лежащего бока под влиянием напорных вод. Эффективен ли дренаж в борьбе с такими оползнями?

4. Что такое избыточное поровое давление? Приведите примеры его проявления при открытых горных разработках. Как учитывается избыточное поровое давление при оценке устойчивости откосов?

5. Чем обусловлены фильтрационные деформации и каковы их виды вам известны?

6. Объясните механизмы суффозионного выноса в раздельнозернистых грунтах и фильтрационного выноса в трещиноватых породах. Насколько распространен и опасен каждый из этих процессов при подземной разработке?

7. Как происходит прорыв воды и грунта в подземные выработки? В каких условиях следует считать с возможными последствиями прорыва воды и грунта при открытых разработках?

8. В чем главная причина оплывания песчаных откосов? Когда оно особенно интенсивно? Характерен ли процесс оплывания для подземных разработок?

9. Какие данные необходимы, чтобы оценить способность песков проявлять плавунные свойства? Зависит ли эта способность от характера и размеров горной выработки, вскрывающей пески?

10. Чем вызывается и от каких факторов зависит набухание глинистых пород вблизи горных выработок? Каков механизм циклических деформаций фильтрующих глинистых пород вблизи откосов? Приведите пример, иллюстрирующий связь набухания глинистых пород с гидродинамическим давлением.

11. Какие процессы приводят к снижению прочности недонасыщенных глинистых пород при поступлении в них воды?

12. В каких процессах проявляется отрицательное воздействие подземных вод на технологию горных работ и качество полезного ископаемого? Всегда ли эффективен дренаж в борьбе с этими процессами?

## ГЛАВА 2

### **ДРЕНАЖ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ**

---

При открытой разработке месторождений в подавляющем большинстве случаев горный дренаж является основным методом защиты от подземных вод, поэтому принципы и схемы осушения (дренажа) при горных разработках наиболее удобно рассмотреть на примере именно карьерных полей.

#### **2.1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ДРЕНАЖЕ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ**

Из анализа (см. гл.1) влияния подземных и поверхностных вод на условия ведения горных работ следует, что дренаж карьеров позволяет решить следующие задачи: 1) обеспечить устойчивость бортов, откосов уступов и отвалов; 2) повысить качество и полноту выемки полезного ископаемого; 3) обеспечить нормальные условия работы горного и транспортного оборудования.

### 2.1.1. Обеспечение устойчивости бортов и откосов уступов

С точки зрения повышения *степени устойчивости бортов* основная задача дренажа — снижение гидростатических и гидродинамических сил. Поэтому во всех случаях, когда влияние этих сил на общую устойчивость борта оказывается существенным, дренаж будет достаточно эффективным, если вызовет заметное снижение уровней (напоров) в пределах "призмы возможного оползания". Прежде всего к этим случаям следует отнести такие, когда в бортах или в подошве карьера залегают напорные водоносные горизонты, отделенные от выработки водоупорным (глинистым) слоем. В этих условиях дренаж напорного горизонта уменьшает не только гидростатические и гидродинамические силы, но и набухание глинистых пород. Дренаж оказывает заметное влияние на общую устойчивость борта и при наличии в толще трещиноватых твердых пород водо-непроницаемых зон, сохраняющих высокие напоры в области возможного обрушения. Если влияние гидростатических и гидродинамических сил на общую устойчивость борта невелико, то уменьшение этих сил посредством дренажных работ лишено смысла.

Необходимо особо выделить карьеры, борта которых сложены слабофильтрующими опесчаненными глинами или глинистыми песками при отсутствии хорошо проницаемых прослоев. В этих условиях допустимый угол сдренированного борта может быть значительно больше, чем несдренированного. Современная техника дренажа пока не позволяет эффективно осушать указанные породы.

Для обеспечения *устойчивости откосов нерабочих уступов песчано-глинистых пород* первостепенное значение имеет организация стока воды с площадок уступов, поскольку устранение скоплений воды на них уменьшает гидродинамические и гидростатические силы, ограничивает процессы набухания пород и выщелачивания в зоне аэрации, а также размывания и поверхностного размыва откосов уступов.

Рассмотрим, как влияют дренажные работы на предупреждение процессов набухания — разупрочнения глинистых пород. Известно, что набухающие породы обычно настолько слабо отдают воду, что практически их можно считать недренируемыми.

Наиболее эффективный способ борьбы с набуханием — осушение контактирующих с глинами водоносных пород. Выше мы уже подчеркивали значение дренажа напорного водоносного горизонта в подошве карьера для предотвращения развития этого процесса. Если водоносный горизонт вскрывается карьером, то дренаж окажется эффективным средством борьбы с набуханием, лишь когда он устранил возможность дополнительного увлажнения глинистых пород. Очевидно, это возможно в двух случаях: 1) когда глинистые породы залегают в подошве водоносного горизонта, а падение слоев направлено в сторону от откоса; 2) когда вода может поступать в глинистые породы только из водоносного горизонта, непосредственно подстилающего глинистый слой.

В первом случае благодаря обратному уклону водоупора (от выработки) нередко появляется возможность полностью удалить воду с кровли глинистого слоя и тем самым предотвратить набухание, вызываемое уменьшением давления на этот слой при выемке вышележащих пород.

Во втором случае дренаж нижележащего водоносного горизонта иногда приводит к ограничению дополнительного поступления воды в глинистые породы. Для этого необходимо, чтобы в результате дренажа уровень водоносного горизонта оказался ниже подошвы глинистого слоя (с учетом высоты капиллярного поднятия в водоносных породах).

В других условиях дренажные работы обычно не могут существенно улучшить прочностные свойства глинистых пород, поскольку в условиях горизонтального залегания или при падении слоев в сторону выработки не может быть достигнуто полное осушение водоносных пород. Оставшееся в водоносном слое количество воды (малое по сравнению с водопритоками) оказывается достаточным для того, чтобы набухание нижележащих глин проявилось в полной мере.

Например, исследования, проведенные на Лебединском карьере КМА, показали, что даже на тех участках, где подземные воды были перехвачены на удалении от откоса (с помощью дренажной траншеи) и отсутствовало видимое высачивание, в подошве песков, перекрывающих глины, сохранялась высокая влажность, обеспечивающая полное водонасыщение глин. При наклонном залегании пластов такое же влияние оказывает даже слабое инфильтрационное питание водоносного горизонта. Таким образом, в подобных случаях ни одно дренажное устройство не может устранить набухание глин.

Отметим, что для борьбы с набуханием песчаных глин, в которых сила эффективного набухания не превышает 0,1 МПа, можно использовать пригрузку откоса слоем песка, щебня или крупноглыбового материала, мощность которого обеспечивает развитие в глинах напряжений, превышающих силы эффективного набухания (см. разд. 1.3).

Таким образом, к оценке роли дренажа в улучшении прочностных свойств глинистых пород следует подходить дифференцированно: в одних случаях улучшение может быть весьма существенным, в других — неощутимым.

В *песчаных породах* дренаж водоносных горизонтов и организация внутрикарьерного стока способствуют ограничению или устранению фильтрационных деформаций и эрозионного размыва поверхности откосов уступов.

Для *повышения устойчивости уступов, сложенных твердыми, но склонными к размоканию породами*, также необходимо обеспечить сток воды с площадок уступов. Особые требования предъявляются к уступам соляных пород: система дренажа здесь должна обеспечить барражирование подземных вод на удалении от откоса и эффективный отвод атмосферных вод с площадок уступов.

Для *повышения устойчивости отвалов* дренаж должен свести до минимума или вообще устранить поступление воды в отвал из вскрышных

пород и пород основания. Для этого уровень в водоносных породах основания в пределах "призмы возможного оползания" должен быть ниже подошвы отвалов на величину, превышающую высоту капиллярного поднятия в водоносных породах. Необходимо по возможности осуществлять также мероприятия, ограничивающие поступление атмосферных вод в породы отвала, особенно в отвалы, сложенные пылеватыми породами, склонными к внезапным оползням-оплывинам и разжижению.

На высоких отвалах, сложенных глинистыми породами, а также на гидроотвалах, в которых развивается избыточное поровое давление (см. разд. 1.1), может возникнуть необходимость в проведении специальных дренажных мероприятий, направленных на увеличение скорости его рассеивания. Кроме того, на гидроотвалах иногда требуется проводить дренаж откоса с целью ограничения его фильтрационных деформаций.

### **2.1.2. Повышение качества и полноты выемки полезного ископаемого**

Во многих случаях эффективным средством для удаления влаги из полезного ископаемого или предотвращения дополнительного его увлажнения является дренаж полезного ископаемого и граничащих с ним водоносных пород, а также организация внутрикарьерного стока. Например, на ряде угольных карьеров ГДР влажность угля была понижена дренажными работами на несколько процентов, что привело к сокращению затрат на брикетирование углей на 20—30 %.

В тех случаях, когда гравитационная вода в породах продуктивной толщи отсутствует, обычные способы дренажа оказываются неэффективными для снижения их влажности. Так, на Лебединском карьере КМА, несмотря на наличие мощной системы дренажа, влажность рыхлых глиноподобных разностей железной руды остается практически неизменной. По этой причине уже в период детальной разведки месторождения должно оцениваться максимально возможное снижение влажности полезного ископаемого как разность между природной влажностью и максимальной молекулярной влагоемкостью.

### **2.1.3. Улучшение условий работы горного и транспортного оборудования**

Известно, что на многих карьерах дренаж способствует улучшению условий работы горного и транспортного оборудования: устраняет или ограничивает обводненность экскаваторных забоев и фильтрационные деформации обрабатываемых уступов, помогает бороться с образованием наледей на откосах и с обводнением взрывных скважин. Ввиду того, что при использовании разных типов оборудования допускаются различные масштабы фильтрационных деформаций уступов, требуемая

степень дренажа водоносных пород зависит от типа применяемого горного оборудования. Например, при отработке водоносных песков мехлопатами необходим более интенсивный дренаж, чем при использовании драглайнов. Требования, предъявляемые к дренажу, существенно зависят от принятой схемы отработки месторождения. Так, транспортная схема при отсутствии внутренних отвалов позволяет наиболее широко использовать открытый дренаж пород, а также применять дренажные скважины, штольни и колодцы, проходимые из карьера. Наоборот, транспортно-отвальная и бестранспортная схемы накладывают значительные ограничения на дренаж, особенно при работе многочерпаковых экскаваторов в условиях транспортно-отвальной схемы, а также при работах по бестранспортной схеме с подвалкой обводненных добычных или вскрышных уступов.

Следует подчеркнуть, что глубинный дренаж не может рассматриваться как эффективное средство борьбы с такими явлениями, как промерзание песчано-глинистых пород в уступах, налипание и примерзание отбираемых и транспортируемых пород, разжижение глинистых пород под действием динамических нагрузок от оборудования. В этом отношении некоторый эффект может быть достигнут лишь организацией внутрикарьерного стока.

Высачивание подземных вод на уступах, обрабатываемых гидромониторными установками, а также на откосах котлованов, разрабатываемых плавучими земснарядами не мешает работе горного оборудования. Поэтому основная задача дренажа в этих условиях сводится к ограничению деформаций откосов с таким расчетом, чтобы ими не были захвачены вышележащие нерабочие или обрабатываемые экскаваторами уступы. Кроме того, система отвода технических вод должна быть организована так, чтобы не допустить дополнительного увлажнения пород, которые предназначены для экскаваторной отработки. В связи с этим требования к дренажу пород, обрабатываемых средствами гидромеханизации, менее жесткие, чем при работе экскаваторов. Применение гидромеханизации позволяет резко уменьшить объемы дренажных работ и широко использовать открытый дренаж пород, слагающих борта карьеров.

#### **2.1.4. Требования к обоснованию систем дренажа**

При проектировании дренажа карьерного поля необходимо учитывать следующие принципиальные положения:

1) система дренажа должна обеспечивать нормальные условия работы горного и транспортного оборудования, устойчивость откосов бортов и уступов, а также (в некоторых случаях) уменьшение влажности полезного ископаемого;

2) должны быть обоснованы необходимость и целесообразность дренажирования каждого водоносного горизонта и намечены пределы необходимого осушения. Между тем во многих проектах дренажные мероприя-



тия принимаются без достаточного обоснования: часто сложные и дорогостоящие системы дренажа проектируются только на основании наличия на месторождении водоносных горизонтов. Однако в некоторых случаях в таком дренаже нет никакой необходимости, а в других он не может обеспечить решения тех задач, которые перед ним ставятся. Кроме того, для решения поставленных задач иногда целесообразнее отказаться от глубокого дренажа и изменить порядок отработки уступов, уменьшить угол наклона борта, произвести пригрузку откоса фильтрующим материалом и т.д.;

3) проектирование дренажа должно быть многовариантным: решение систем дренажа, принимаемых для технико-экономического сопоставления, должен включать все возможные рациональные системы для данных гидрогеологических, инженерно-геологических и горно-технических условий. Оптимальная система дренажа карьерного поля должна выбираться из нескольких сопоставляемых систем на основании экономического расчета;

4) для месторождений со сложными гидрогеологическими условиями дренаж должен обеспечиваться взаимная увязка горной и дренажной частей проекта: обычно схемы вскрытия и система разработки месторождения принимаются без достаточного учета гидрогеологической обстановки, вследствие чего проект дренажной системы привязывается к заранее выбранным системам горных работ. В результате системы дренажа месторождений со сложными гидрогеологическими условиями нередко оказываются неоправданно громоздкими, а иногда дренаж не может обеспечить нормальных условий вскрытия и эксплуатации при выбранном способе ведения горных работ;

5) все рассматриваемые системы дренажа должны базироваться на достаточно надежных результатах разведочных работ;

6) каждая рассматриваемая система дренажа должна подкрепляться фильтрационным расчетом, причем особое внимание следует обращать на обоснование исходных фильтрационных параметров; нередки случаи, когда деформации откосов необоснованно приписываются действию подземных вод, что приводит к откayке больших объемов воды без какого-либо ощутимого повышения устойчивости пород. При этом многие проекты дренажа не учитывают изменений условий дренирования карьеров во времени. Между тем, после разработки карьеров в течение нескольких лет притоки к ним нередко снижаются вследствие сработки естественных запасов, а из-за увеличения периметра карьера существенно уменьшаются удельные (на 1 м откоса) притоки и соответственно масштабы возможных фильтрационных деформаций. Поэтому проект должен предусматривать постепенное снижение интенсивности глубинного дренажа, причем в ряде случаев это связано с полным изменением принципиальной схемы дренажа в процессе эксплуатации карьера;

7) по данным наблюдений за осуществлением карьера на первых этапах в случае необходимости должны вноситься коррективы в первоначально

запроектированную систему. Таким наблюдениям во многих случаях не уделяется должного внимания, а на некоторых карьерах наблюдательные гидрогеологические скважины вообще отсутствуют;

8) система дренажа и водоотвода должна быть увязана с требованиями водоснабжения и охраны гидросферы в прилежащем к карьере регионе (см. гл. 6).

### **2.1.5. Типизация месторождений по условиям дренажа**

Ввиду того, что набор систем дренажа, выбираемых для технико-экономического сравнения, должен включать все возможные рациональные варианты для условий данного месторождения, целесообразно рассмотреть используемые на практике системы, наметив границы их применимости в зависимости от гидрогеологических, инженерно-геологических и горнотехнических условий. В этих целях месторождения полезных ископаемых, разрабатываемые открытым способом, могут быть разделены на три группы [16].

К группе А относятся месторождения, сложенные главным образом комплексами слабых глинистых и несвязных пород, устойчивость которых в откосах во многом обусловлена влиянием подземных вод (в том числе месторождения, горно-геологические условия которых определяются в основном комплексами перекрывающих, а не вмещающих полезное ископаемое пород). К группе Б относятся месторождения, сложенные преимущественно комплексами трещиноватых, достаточно хорошо фильтрующих и водоустойчивых пород. Месторождения, в сложении которых примерно в одинаковой степени участвуют комплексы пород, характерные для групп А и Б, включены в группу В.

В зависимости от условий залегания пород месторождения группы А разделяются на два типа: А-1 - сложенные горизонтально залегающими слоями пород; А-2 - сложенные наклонно залегающими слоями пород.

### **2.2. ВЛИЯНИЕ ТЕХНИКИ ДРЕНАЖА НА ВЫБОР СИСТЕМЫ ОСУШЕНИЯ**

Дренаж карьеров в СССР осуществляется с помощью систем водопонижающих скважин, оборудованных глубинными насосами; подземных систем - дренажных штретков с фильтрами и колодцами; самоизливающих и поглощающих скважин; иглофильтровых установок; бортового дренажа; дренажных зумпфов, траншей, канав (в том числе, закрытых) и т.п. Каждое из перечисленных средств дренажа, обладая определенными достоинствами, в то же время имеет те или иные технико-экономические недостатки, которые ограничивают сферу его применения в конкретных гидрогеологических и горнотехнических условиях. Такие ограничения во многом определяют выбор системы дренажа.

Достоинства систем водопонижающих (оборудованных погружными насосами) скважин сводятся к следующему: их сооружение не требует больших капитальных затрат и отличается технической простотой; скважины могут быть введены в действие сравнительно быстро; они позволяют оперативно реагировать на изменение условий дренирования месторождения, например, путем уменьшения числа работающих насосов при снижении во времени притоков к карьерному полю.

Вместе с тем системы водопонижающих скважин имеют свои недостатки: 1) малую эффективность при использовании в сравнительно слабопроницаемых породах (при коэффициентах фильтрации менее 5 м/сут в несвязных породах и менее 1 м/сут в трещиноватых); 2) необходимость откачки вод, поступающих в карьер, самостоятельными средствами (хотя и при шахтном дренаже эта необходимость в известной степени сохраняется); 3) содержание большого числа насосов, часто выходящих из строя, требует значительного обслуживающего персонала и затрудняет централизацию водоотвода, в связи с чем расходы на эксплуатацию системы оказываются сравнительно высокими.

Однако системы водопонижающих скважин обладают большими резервами для снижения стоимости их эксплуатации. В настоящее время сравнительно высокие расходы на эксплуатацию этих систем обусловлены главным образом ограниченностью парка надежных высоконапорных насосов. Внедрение таких насосов в практику водопонижения позволит резко сократить эти затраты. Имеются и другие пути повышения эффективности этих систем: внедрение автоматического централизованного регулирования работы насосов, совершенствование конструкций фильтров (например, создание фильтров с уширенным основанием), использование скважин большого диаметра и многозабойных водопонижающих скважин.

Так, создание скважин большого (0,5–1 м) диаметра позволяет проще решить проблему выбора насосного оборудования. Такие скважины имеют высокую водозахватную способность, что дает возможность во многих случаях увеличить расстояние между ними и тем самым сократить число действующих насосов. В практике осушения карьеров в ГДР и ФРГ, например, скважины большого диаметра (до 1 м) при глубине 200–300 м получили в последние годы большое распространение [2], хотя в свое время на бурогольных карьерах этих стран использовались с максимальным эффектом подземные системы дренажа.

Для дренажа трещиноватых пород (в первую очередь карбонатных) начинают применяться многозабойные водопонижающие скважины (ряд скважин, "ответвляющихся" от общего ствола). Такими скважинами вскрывается большое число трещин или карстовых полостей, в результате чего дебиты возрастают во много раз. Многозабойные скважины используются, например, в практике осушения рудников Северо-Уральского бокситорудного района (СУБР).

Следует обратить внимание на необходимость широкого внедрения методов увеличения производительности (интенсификации) дренажных скважин, таких как гидравлический разрыв пласта, гидравлический удар, кислотная обработка призабойной зоны, взрывание зарядов ВВ, вакуумирование и др.

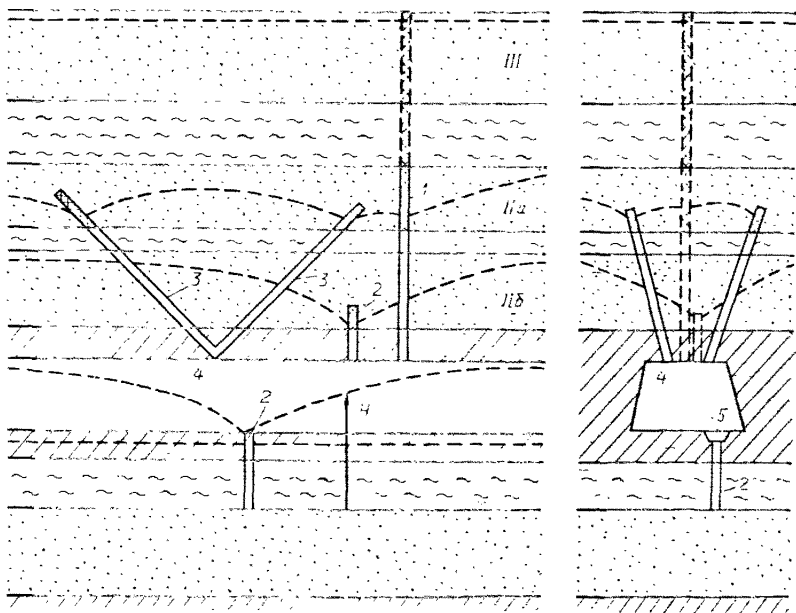


Рис. 2.1. Подземная система дренажа:

1 — сквозной фильтр; 2 — забивной фильтр; 3 — восстающая скважина; 4 — штрек; 5 — отводная канава. I, II, III — водоносные пласты

К достоинствам *подземных систем дренажа* (рис. 2.1) следует отнести высокую степень централизации водоотлива; возможность использования как в хорошо проницаемых, так и в сравнительно слабо проницаемых породах (коэффициент фильтрации порядка 1–5 м/сут); упрощение организации внутрикарьерного водоотлива и относительно низкую стоимость эксплуатации.

Подземные системы дренажа обладают существенными недостатками, резко снижающими их эффективность: 1) устройство подземной системы дренажа требует больших капитальных затрат; 2) проходка дренажных штретков в сложных гидрогеологических условиях сопряжена с большими техническими трудностями и требует предварительного снижения напоров, для чего проходится большое число специальных водопонижающих скважин; 3) прорыв воды нередко приводит к выходу из строя всей системы дренажа на длительные сроки; 4) продолжительность создания подземной системы дренажа измеряется несколькими годами, поэтому в период строительства и на первых этапах эксплуатации карьера чаще всего используются системы водопонижающих скважин и средства открытого водоотлива; 5) затраты на поддержание штретков часто оказываются очень высокими (например, на Стрижевском угольном и Шевченковском марганцевом карьерах они были иногда

соизмеримы со стоимостью откачки); 6) подземная система не позволяет быстро реагировать на те или иные изменения гидрогеологических условий карьерного поля; 7) штреки во избежание прорывов во многих случаях проходятся в практически непроницаемых породах и не оказывают никакого дренажного эффекта, выполняя лишь функции магистрального водоприемника (например, карьеры Днепровского угольного бассейна). По этой причине их часто располагают на несколько десятков метров ниже подошвы осушаемого пласта (например, на Лебединском и Соколовском железорудных карьерах), что резко увеличивает глубину откачки и, следовательно, расходы на дренаж.

Эффективность подземных систем дренажа может быть повышена путем повсеместного внедрения комплексной механизации проходки дренажных выработок и бурения из дренажных штреков горизонтальных, наклонных и восстающих скважин большой длины (до 100 м и более), усовершенствования конструкции фильтрующей части скважины или забивного фильтра, бурения скважинных фильтров без обсадки (в относительно устойчивых породах) и широкого применения методов интенсификации процесса осушения. Однако в целом перспективы их использования при открытой разработке гораздо уже, чем у водопонижающих скважин.

Например, в ГДР до середины 1960-х гг. основу систем осушения большинства буроугольных карьеров составляли дренажные штреки со сквозными и забивными фильтрами. К этому моменту в условиях возросшего потребления нефти и газа в стране задача сохранения рентабельности угольной промышленности могла быть решена лишь путем резкого повышения производительности труда на карьерах и снижения себестоимости бурого угля. В связи с этим перед специалистами по осушению, стоимость которого подчас достигала 25 % себестоимости угля, была поставлена задача снизить затраты на дренаж в 2–3 раза за 5–10 лет. Решить эту задачу можно было лишь путем коренного пересмотра принципов осушения, а именно путем повсеместной замены подземных систем осушения системами водопонижающих скважин. К концу 1960-х гг. более 50 % объемов дренажных работ на карьерах уже осуществлялось водопонижающими скважинами, а к концу 1970-х гг. всеобщий переход к водопонижающим скважинам был практически завершен. Проведенные специалистами ГДР экономические сопоставления показали, что затраты на дренаж карьеров водопонижающими скважинами и дренажными штреками относятся примерно как 1 : 3 (2).

Важно заметить, что практика подземного осушения на буроугольных карьерах ГДР имеет богатые традиции и эффективность подземного осушения здесь достаточно высока. В этих условиях широкое внедрение водопонижающих скважин стало возможным лишь благодаря использованию прогрессивного метода их бурения с обратной всасывающей промывкой, обеспечивающего высокое качество гидрогеологических скважин (т.е. отсутствие глинизации стенок скважин буровым раствором), большие скорости бурения и относительно низкую стоимость работ.

Как показывает опыт осушения буроугольных карьеров ГДР, определенный резерв повышения экономической эффективности осушения имеется и в части оборудования водопонижающих скважин. Здесь прежде всего следует отметить использование неметаллических (бетонных, гравийных, клеевых и керамических) фильтров. Такие фильтры в условиях ГДР дешевле металлических и, кроме того, обеспечивают высокое качество водопонижающих скважин. Другим резервом является повышение качества гравийной засыпки, используемой для оборудова-

ния водопонижающих скважин: материал для нее изготавливают централизованно на специальном заводе.

Наконец, важнейшим моментом оказывается повышение качества насосов. В ГДР в этих целях созданы специализированные управления по учету, распределению и ремонту глубинных насосов. Весь насосный парк отдельных угольных бассейнов является собственностью таких управлений, которым подчинены и ремонтные заводы. Насосы выдаются предприятиям на условиях проката, на каждый насос управление дает гарантию на определенный срок безаварийной работы, равный периоду его полной амортизации. При превышении этого срока предприятие эксплуатирует насос бесплатно. Все насосы, вышедшие из строя, возвращаются управлению, которое решает вопрос о возможности и необходимости их ремонта. Централизованное распределение позволило удовлетворить потребности предприятий без существенного увеличения парка насосов и привело к резкому увеличению срока их безаварийной работы (до 6000 ч и более) благодаря повышению качества ремонта и более полному соответствию используемых типов насосов конкретным условиям.

Таким образом, не отрицая целесообразности применения подземных систем осушения в определенных горно-геологических условиях, можно утверждать, что для открытых горных работ использование этих систем далеко не всегда оправданно.

*Самоизливающие скважины* применяются для снятия напоров в подошве карьера и в прибортовой зоне, а также в почве дренажной выработки. Однако при сравнительно невысоких напорах самоизливающие скважины, пройденные в мелкозернистых и пылеватых породах, быстро выходят из строя вследствие колюматации. В этих случаях эффективность их может быть повышена путем увеличения диаметра и усовершенствования методов оборудования гравийной засыпкой.

*Поглощающие скважины*, перепускающие воду из одного горизонта (с большими напорами) в другой, могут использоваться только при соблюдении определенных соотношений параметров дренируемого горизонта и поглощающего пласта (проводимость первого намного меньше, чем второго). При их сооружении во избежание колюматации требуются особенно тщательный подбор фильтров и длительная прокачка. Эти требования часто не соблюдаются, о чем свидетельствует, например, опыт применения поглощающих скважин на карьерах Днепровского угольного бассейна.

*Иглофильтровые установки* — ряд фильтров, подключенных к общему вакуумному насосу — используются обычно в качестве временного локального средства дренажа. Преимущества их заключаются в их высокой мобильности, простоте и быстроте установки, в достижении высокого коэффициента заслона, в возможности использования в породах со сравнительно малыми коэффициентами фильтрации. Однако возможная глубина откачки (для легких иглофильтров) не превышает 6 м. Широкому применению на карьерах иглофильтровых установок наряду с ограничениями горнотехнологического характера препятствует относительно высокая стоимость их эксплуатации.

*Прибортовой дренаж* в виде дренажной пригрузки с водоотводной канавой является эффективным средством предотвращения фильтрационных деформаций на нерабочих откосах. Однако для качественного его выполнения необходимо применение ручного труда. Кроме того, для устройства дренажных призм требуются местные строительные материа-

лы определенного гранулометрического состава. Условия использования приборного дренажа могут быть расширены путем внедрения специальных сборных конструкций из фильтрующих плит.

*Открытый дренаж* (водоотлив) из дренажных зумпфов и траншей широко используется для осушения карьерного поля. Ограничения на его применение обусловлены требованиями горнотехнологического характера и степенью устойчивости пород (в первую очередь, песков) по отношению к фильтрационным деформациям. Область использования этих устройств может быть расширена благодаря внедрению различных типов фильтрующих блоков для крепления дренирующих откосов выработок в песчаных породах.

В последнее время на карьерах проводились опытные и опытно-эксплуатационные работы по внедрению новых способов защиты от обводнения — горизонтальных скважин, водонепроницаемых барражей (завес), электроосмотического осушения и глубинного вакуумирования.

*Самотечные горизонтальные скважины*, пройденные из карьера, широко используются на бурогольных карьерах ГДР и ФРГ [2] для дренажа как нерабочего, так и рабочего бортов. Кроме того, их можно проходить из подземных дренажных выработок. Первым опытом промышленного использования горизонтальных скважин в СССР является успешное их внедрение на Лебединском карьере КМА. Осушительный эффект горизонтальных скважин оказывается гораздо выше, чем вертикальных: при расстоянии между дренами равном их длине коэффициент "заслона" составляет более 90 %.

Созданию *водонепроницаемых завес* (глинистых и цементационных) для уменьшения водопритоков к открытым выработкам или полной изоляции карьерного поля уделяется сейчас повышенное внимание. Поскольку осушение месторождения обычными средствами в большинстве случаев экономически более выгодно, чем создание завес, пока (до усовершенствования технологии) этот метод применяется лишь при сравнительно неглубоко (до 30 м) залегающих водообильных породах.

Использование водонепроницаемых завес весьма перспективно, особенно для предотвращения поступления воды из близлежащих водотоков (водоемов). Применение любых дренажных устройств, расположенных между бортом карьера и рекой (водоемом), может привести к увеличению объема откачиваемой воды, так как приток к линии дренажа из-за значительного сокращения длины пути фильтрации в этом случае будет значительно превышать возможный приток в карьер. Поэтому при близком расположении реки или водоема целесообразно использовать завесу.

Внедрение водонепроницаемых завес особенно важно в тех случаях, когда использование обычных методов осушения приводит к региональному истощению водоносных пластов, нарушению нормальных условий водоснабжения прилегающего района или загрязнению подземных вод.

В экологическом плане это — наиболее перспективное средство защиты карьеров и шахт от подземных вод.

Кратко остановимся на дренировании водоносных пород супесчаного и суглинистого состава. Опыт показывает, что обычные средства дренажа, за исключением сплошных горизонтальных дрен (например, траншей), в этих случаях не дают необходимого эффекта. Вместе с тем такие породы могут быть осушены путем глубинного вакуумирования и электроосмоса.

Однако глубинное вакуумирование может применяться лишь на сравнительно небольших по протяженности участках — в связи с малым КПД оборудования. Например, глубинное вакуумирование хорошо себя зарекомендовало при опытной проверке возможности укрепления (уплотнения) супесей в котлованах Плявиньской ГЭС. Несмотря на это широкое внедрение его было признано нецелесообразным по экономическим соображениям.

Электроосмос, так же как и глубинное вакуумирование, способствует увеличению водоотдачи и скорости дренирования, что улучшает прочностные свойства глинистых пород и способствует повышению устойчивости откосов в тонкозернистых и глинистых песках. Например, на угольном карьере Эсперхейм (ГДР) электроосмос был успешно использован для закрепления откоса глинистых песков. Однако и этот способ может применяться лишь на небольших участках: использование электроосмоса на откосах большой протяженности пока экономически не оправдывается.

Рассмотрим схемы осушения карьерных полей на месторождениях выделенных выше (см. разд. 2.1) типов.

### **2.3. РАЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ДРЕНАЖА КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТИПА А-1)**

К типу А-1 относятся месторождения, в строении которых основную роль (с точки зрения влияния подземных вод и дренажа) играют слабые горизонтально залегающие песчано-глинистые породы (например, месторождения богатых руд КМА, Никопольского марганцеворудного и Днепровского угольного бассейнов).

#### **2.3.1. Целесообразные пределы дренажа**

При горизонтальном залегании перемежающихся водоносных и водоупорных слоев горных пород полный дренаж гравитационной воды практически невозможен, поэтому при проектных проработках необходимо прежде всего установить пределы допустимого высачивания вод на поверхность откосов по основным водоносным горизонтам и определить необходимый коэффициент перехвата (заслона) подземного потока дренажной системой.

В общем случае может быть намечена такая последовательность выбора целесообразных пределов дренажа:

- а) определяются притоки к откосам и понижения уровней подземных вод в



условиях открытого дренажа (т.е. при отсутствии глубинного дренажа), а также оцениваются их изменения с течением времени;

б) оценивается влияние подземных и поверхностных вод на устойчивость бортов, откосов уступов и отвалов, на работу горного оборудования и влажность полезного ископаемого;

в) намечаются и рассматриваются возможные системы дренажа, для каждой из которых подсчитываются величины понижения уровней в характерных точках, а также объемы воды, вытекающей в карьер и перехватываемой средствами глубинного дренажа. Кроме того, для каждой системы дренажа проводятся оценки, аналогичные перечисленным в предыдущем пункте;

г) если после проведенных оценок вопрос о целесообразности глубинного дренажа не решен, то определяются затраты на дренажные работы по вариантам и производится их экономическое сравнение. Для этого ожидаемые затраты на дренаж сопоставляются с тем снижением затрат на вскрышные и добычные работы, которое достигается при данном варианте глубинного дренажа (по сравнению с открытым); кроме того, учитывается возможность более эффективного понижения влажности полезного ископаемого в условиях глубинного дренажа.

Проведение такого рода количественных оценок позволило [16] выявить оптимальные схемы дренажа для различных участков карьерного поля в тех или иных типовых горно-геологических условиях. Подобного рода схемы, рассматриваемые далее, базируются на следующих основных положениях:

на месторождениях рассматриваемого типа водоносные породы склонны к фильтрационным деформациям (исключение составляют лишь гравийно-галечные отложения). Этими деформациями в основном и определяются необходимые пределы дренажа песчаных пород, если эти деформации не могут быть предотвращены другими мероприятиями при меньших затратах;

для водоносных горизонтов, вскрытых карьером на полную мощность, горизонтальное залегание предопределяет возможность проскока подземных вод в карьер между дренажными устройствами. Исключения могут представлять отдельные участки, приуроченные к повышенной части кровли водоупорного ложа. Однако и на этих участках в нижней части песчаной толщи из-за наличия капиллярной или гравитационной воды всегда остается водонасыщенная зона. Отсюда следует невозможность устранения набухания глинистых пород, подстилающих водоносный горизонт;

в большинстве случаев желательно снижение влажности полезного ископаемого или предотвращение дополнительного его увлажнения;

на месторождениях рассматриваемого типа часто залегают водоносные породы, практически не поддающиеся осушению обычными средствами (например, опесчаненные глины, глинистые пески, многие разновидности бурого угля с коэффициентами фильтрации менее 0,5 м/сут); в этих породах ощутимый эффект можно получить лишь при использовании горизонтальных открытых дрен или при дренаже непосредственно открытыми горными выработками.

### 2.3.2. Дренаж нерабочего борта карьера

Основная задача дренажа нерабочего борта при горизонтальном залегании пластов — устранение фильтрационных деформаций в пределах промежутков высачивания подземных вод и обеспечение стока с предохранительных и транспортных берм. Универсальным способом сохранения устойчивости нерабочих уступов является горизонтальный прибортовой дренаж (рис. 2, 2,а,б,д) — гравийно-щебеночная призма в сочетании с водоприемной канавой, проходимой с уклоном к местному внутрикарьерному водосборнику. В канаве укладываются дренажные трубы. В районах с низкими зимними температурами дренаж дополнительно утепляется слоем песка.

Дренажный материал должен укладываться на предварительно зачищенный откос. Зачистка может производиться под защитой легких иглофильтровых установок или водопонижающих скважин, работающих в период строительства.

Если среди вскрышных пород имеются средние- или крупнозернистые пески, то их также можно использовать в качестве пригрузочного материала. В этом случае пригрузка устраивается несколько иначе (см. рис. 2, 2,в,г). Такая форма пригрузки целесообразна в следующих случаях: 1) когда трудно зачистить откос и пригрузочный материал отсыпается непосредственно на оплывший откос; 2) когда откос в пределах промежутка высачивания пригружается отвалами; 3) когда необходимо увеличить проезжую часть бермы.

При наличии пород с низкой водопроницаемостью типа супесей и легких суглинков схема прибортового дренажа упрощается: уступ пригружается слоем песка или щебня толщиной 1–2 м, предохраняющим

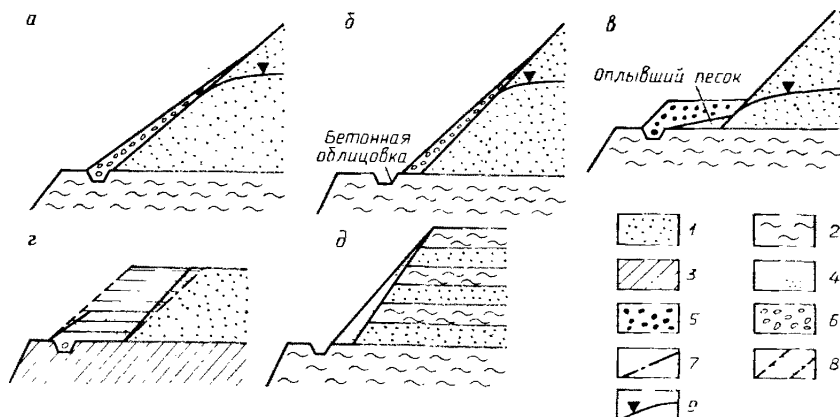


Рис. 2.2. Схемы дренажных пригрузок:

1 — пригружаемый грунт; 2 — водоупор; 3 — полезное ископаемое; 4 — песок пригрузочной призмы; 5 — гравийно-щебеночный материал; 6 — грубообломочный материал; 7 — генеральная линия борта; 8 — прирост объема земляных работ за счет пригрузки; 9 — уровень подземных вод

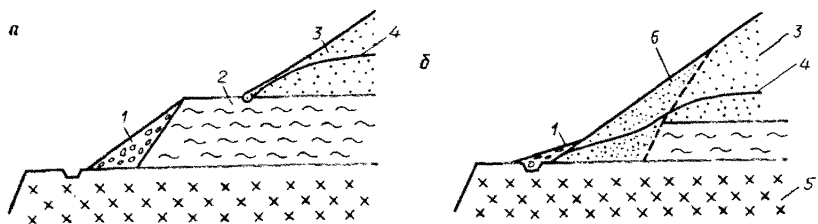


Рис. 2.3. Схема пригрузки нерабочих уступов, сложенных породами с низкой проницаемостью:

*a* – пригрузка щебнем; *б* – пригрузка песком. 1 – пригрузочная призма из щебня; 2 – супесчаные породы; 3 – пески; 4 – уровень подземных вод; 5 – кристаллические породы; 6 – пригрузочная призма из песка

породы от оплыwania и оползания (рис. 2. 3, *a*). При малой мощности слабопроницаемых пород пригрузка может осуществляться за счет вышележащих песков (см. рис. 2. 3, *б*).

При отсутствии на месте материала для устройства дренажной призмы, а также при больших колебаниях отметок кровли водоупора, затрудняющих самотечный водоотвод, прибортовой дренаж может быть заменен горизонтальными скважинами. Скважины глубиной 30–40 м и более можно бурить как перпендикулярно к линии простирания борта, так и под углом к ней. Расстояние между скважинами примерно равно их глубине. Для водообильных водоносных горизонтов, когда из-за больших притоков к откосу его трудно зачищать, наиболее рационально сочетание прибортового дренажа с горизонтальными скважинами.

Однако при необходимости дренирования многослойной толщи неустойчивых водоносных пород, когда ожидается высачивание вод на нескольких горизонтах борта, прибортовые дренажи могут оказаться неэффективными. В этом случае целесообразно применять подземную систему осушения, которая позволяет наиболее просто организовать централизованный водоотлив.

Подчеркнем еще два важных момента, связанных с проектированием горных работ: 1) ввиду того, что на нерабочем борту надежный дренаж создать обычно проще и дешевле, чем на рабочем, следует по возможности располагать нерабочий борт со стороны основного потока вод; 2) организация дренажа и водоотвода на нерабочем борту существенно упрощается, когда отметка подошвы водоносного горизонта совпадает с отметкой нерабочей бермы.

### 2.3.3. Дренаж рабочего борта карьера

Со стороны рабочего борта дренаж должен наряду с устойчивостью откосов обеспечить нормальные условия для работы горнотранспортного оборудования. Кроме того, нередко возникает необходимость в снижении влажности полезного ископаемого.

Основой для выбора системы дренажа рабочего борта служат расчетные удельные притоки  $q$  на 1 м его протяженности. Их величину можно ориентировочно определить по формулам, приведенным в разд. 4.3.

Если удельный приток не превышает критической величины  $q_0$  для данного типа оборудования, то наиболее эффективен открытый дренаж: вода может поступать в канавы непосредственно на рабочих площадках. Под критической понимается такая величина притока на 1 м протяженности фронта работ, при которой масштабы фильтрационных деформаций (длины языков оплывания) оказываются предельно допустимыми для данного типа горного оборудования и выбранной схемы отработки уступов. Так, если почва водоносного горизонта совпадает с рабочей площадкой, то критический приток определяют расчетным путем [10], исходя из допустимой длины языка оплывания  $l_0$ .

В качестве первого ориентира при использовании мехлопат и многоковшовых экскаваторов рекомендуются [16] следующие величины предельных притоков  $q_0$  (м<sup>3</sup>/сут на 100 м откоса): пылеватые пески 20, тонкозернистые 40, мелкозернистые 100, среднезернистые 150–200, крупнозернистые 300–400. Для драглайнов и роторных экскаваторов допустимые притоки воды существенно выше и зависят от параметров машин.

Если почва водоносного горизонта "подрезана" уступом (см. рис. 1.8, б), то приведенные выше значения критических расходов воды должны быть уменьшены в 1,5–2 раза. Наоборот, если в фильтрующих породах подземные воды принимаются не непосредственно забоем, а дренажной траншеей (канавой), то с учетом требований устойчивости откосов траншеи указанные критические расходы могут быть увеличены в 2–3 раза. Схема осушения дренажной траншеей, пройденной на площадке рабочего уступа, приведена на рис. 2.4 (на примере Лебединского карьера КМА). По мере продвижения забоя проходят новые траншеи, расстояние между которыми определяется шириной заходки экскаватора, а также расчетным положением депрессионной кривой. Особенно эффективна эта схема дренажа при отработке слабопроницаемых ( $k < 1$  м/сут) пород.

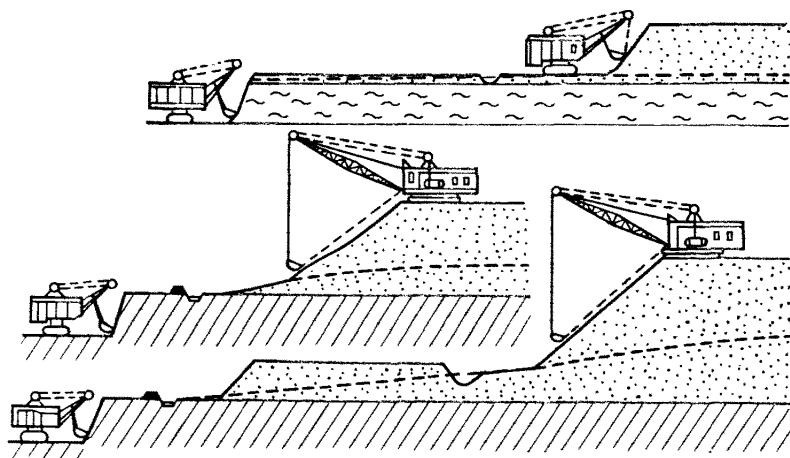


Рис. 2.4. Схема открытого дренажа песков на рабочем борту карьера

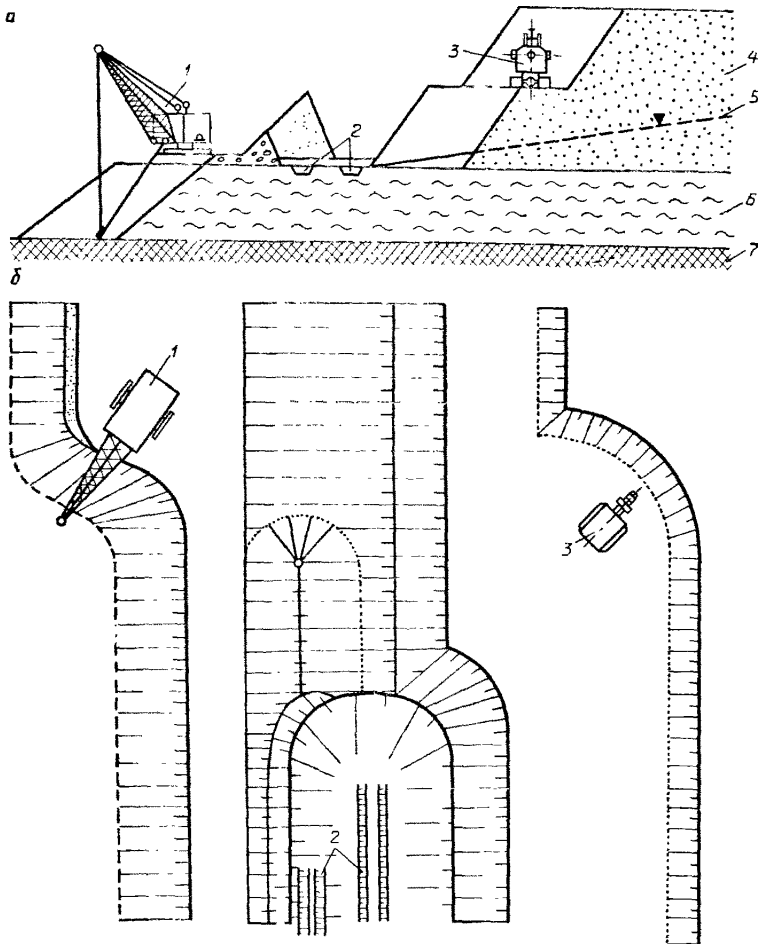


Рис. 2.5. Схема отработки сеноман-альбских и юрских отложений гидромонитором на Лебединском карьере КМА:

*a* – разрез; *б* – план. 1 – экскаватор; 2 – дренажные траншеи; 3 – гидромонитор; 4 – сеноман-альбские пески; 5 – уровень подземных вод; 6 – юрские глины; 7 – рудно-кристаллическая толща

В тех случаях, когда открытый дренаж слабопроницаемых пород не обеспечивает нормальных условий работы экскаваторов (рогаторных, цепных и т.п.), следует рассмотреть возможность применения гидромониторов или драглайнов (рис. 2.5). При работе гидромониторов критические пригои определяются, главным образом, требованиями организации водоотвода. Для ориентира рекомендуется, чтобы водопритоки не превышали следующих величин ( $\text{м}^3/\text{сут}$  на 100 м борта карьера): тонкозернистые пески 200, мелкозернистые 400, среднезернистые 1000, крупнозернистые 2000.

Перечисленные случаи возможного применения открытого дренажа относятся к месторождениям, расположенным в районах с умеренными зимними температурами. Если средняя температура трех наиболее холодных месяцев оказывается  $-25 \dots -30^\circ\text{C}$  и ниже, то возможности использования открытого водоотлива несколько сокращаются. Это объясняется тем, что при низких температурах свободное высачивание воды на откос приводит к образованию наледей.

Нужно заметить, что в практике проектирования открытых горных работ нередко стараются полностью отказаться от использования открытого дренажа на карьерах, вскрывающих обводненные толщи песчано-глинистых пород. Между тем, из сказанного выше следует, что такого рода тенденции совершенно необоснованны: требование предотвращения выхода подземных вод на откосы приводит к излишним экономическим затратам, не говоря уже о том, что в большинстве случаев оно практически недостижимо. В настоящее время открытый дренаж неустойчивых рыхлых пород весьма широко применяется в практике открытых горных работ. В качестве примера можно привести такие карьеры, как Лебединский, Сарбайский и др. На бурогольных карьерах ГДР и ФРГ открытый водоотлив используется очень широко и иногда достигает 2 тыс.  $\text{м}^3/\text{ч}$  (карьеры Профен, Шлеенхайн и др.). При правильной организации открытый дренаж в несколько раз дешевле, чем глубинный.

Если прогнозные притоки в карьер превышают критические значения, то для их уменьшения необходим глубинный дренаж. Наиболее часто конкурирующими при технико-экономическом сопоставлении вариантов глубинного дренажа пород рабочего борта являются системы водопонижающих скважин и подземные системы осушения. С учетом перечисленных выше (см. разд. 2.2.2) достоинств и недостатков этих систем для предварительной их оценки можно дать следующие общие рекомендации:

водопонижающие скважины целесообразно использовать для длительной эксплуатационной откачки вод из песчаных пород при глубине откачки не более 200 м и коэффициентах фильтрации более 3 м/сут (если требуется лишь снижение пьезометрических уровней напорного пласта без его осушения, то скважинный дренаж эффективен и при меньших значениях коэффициента фильтрации);

в остальных случаях более экономична подземная система осушения (в том числе и при малых коэффициентах фильтрации порядка 1–5 м/сут).

Дренажные выработки должны располагаться в виде контурных систем, параллельных фронту работ. Первоначальное расстояние от дренажного контура до борта определяют с учетом скорости продвижения фронта работ, чтобы обеспечить нормальные условия для эксплуатации оборудования в течение нескольких лет. Для водопонижающих скважин это расстояние равно четырех-пятикратной величине годового продвижения фронта работ (исходя из среднего срока службы водопонижающих скважин); для подземной системы осушения это расстояние может быть увеличено в 1,2–1,5 раза.

Водопонижающие системы необходимо закладывать после тщательного изучения гидрогеологической обстановки. Это позволит расположить дренажные выработки на участках, где водоносный пласт имеет максимальную проводимость или понижена кровля подстилающего водоупора.

При благоприятных для поглощения условиях, когда горизонт с максимальной проводимостью находится в нижней части осушаемой толщи, для осушения верхних горизонтов предпочтительнее использовать поглощающие скважины.

Расстояние между скважинами (фильтрами) определяется с учетом расчетного удельного притока  $q$  и допустимого (критического) удельного притока к откосу  $q_0$ . Так как с развитием фронта работ периметр карьера постепенно увеличивается, а удельный приток уменьшается (иногда в несколько раз), количество воды, попадающей в карьер извне, возрастает, а число скважин внешнего контура соответственно уменьшается.

Вода, профильтровавшаяся к откосу между скважинами дренажного контура, может приниматься открытыми дренами, а временно — иглофильтровыми установками, которые удобны при дренаже наиболее обводненных участков, расположенных в зоне с пониженным водоупором, с повышенной проводимостью и т.п.

#### 2.3.4. Дренаж пласта полезного ископаемого

Своеобразие подхода к этому вопросу обусловлено дополнительными требованиями снижения влажности полезного ископаемого.

Если *продуктивный пласт перекрыт выдержанным водоупором или его проводимость больше, чем проводимости вышележащего водоносного пласта*, то полезное ископаемое может быть существенно осушено. При достаточной проницаемости пород почвы пласта полезного ископаемого для этого можно использовать открытые дренажные траншеи в основании добычного уступа или водопонижающие скважины и колодцы, пройденные в подошве карьера. Наоборот, при наличии водоупорных пород в почве продуктивного пласта для его дренажа используются контурные системы дренажа, пройденные на рабочем борту для осушения вскрышных пород (см. разд. 2.3.3), причем в условиях подземной системы дренажа штрек целесообразнее проходить по продуктивному пласту (рис. 2.6,а). И хотя в этом случае осушить полностью добычные забои обычно не удастся, следует стремиться к сокращению удельных притоков к откосу по сравнению с приведенными выше (см. разд. 2.3.3) критическими величинами. Последнее особенно важно при ведении работ с временной подвалкой обводненного пласта полезного ископаемого (см. рис. 2.6,б), когда необходимо попутно обеспечивать устойчивость отвалов, а организация водоотвода в подошве карьера существенно затруднена из-за ограниченности свободного пространства.

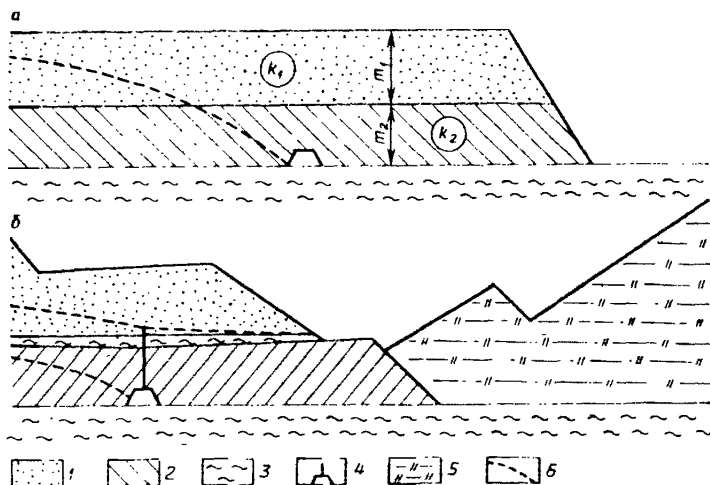


Рис. 2.6. Схема к оценке эффективности дренажных штретков при осушении пласта полезного ископаемого (а) и при работах с временной подвалкой (б):

1 – породы вскрыши; 2 – полезное ископаемое; 3 – водоупорные породы почвы; 4 – забивной фильтр; 5 – породы отвала; 6 – депрессионная кривая

При транспортной схеме работ целесообразно оставлять "недобор" в основании продуктивного пласта, что позволит применять открытый дренаж аналогично тому, как это описано в разд. 2.3.3 (см. рис. 2.4). В районах с низкими зимними температурами такая схема позволяет обрабатывать нижнюю, обводненную, часть продуктивного пласта в летний период.

Если *проводимость пласта полезного ископаемого существенно ниже, чем проводимость перекрывающих его водоносных пород*, то осушительные устройства следует использовать лишь для дренажа контактирующих с полезным ископаемым водоносных слоев, сочетая глубокий дренаж с открытым. При резко выраженной волнистости кровли пласта полезного ископаемого надо сократить объем открытого водоотлива, заложив на пониженных участках дополнительные ряды скважин, сквозных или забивных фильтров; в частности, дренажные выработки на таких участках можно проходить непосредственно из карьера. Следует отметить, что во многих случаях, несмотря на проходку большого объема дополнительных дренажных выработок, над полезным ископаемым повсеместно остается зона водонасыщенных пород.

Отметим в связи с этим, что очень часто сам карьер оказывает на пласт, перекрывающий полезное ископаемое, гораздо больший дренажный эффект, чем системы глубокого дренажа. Роль дренажа водоносных пород, контактирующих с полезным ископаемым, сводится в этих условиях к тому, что во многих случаях он позволяет предотвратить дополнительное увлажнение пласта полезного ископаемого,



обусловленное уменьшением нагрузки на него в связи с выемкой перекрывающих пород и последующим набуханием. Максимальный эффект достигается снижением напоров в водоносном горизонте, подстилающем пласт полезного ископаемого, а также полным осушением повышенных участков кровли этого пласта.

В заключение следует подчеркнуть, что все дренажные мероприятия, направленные на уменьшение влажности полезного ископаемого, эффективны лишь при условии правильно организованного внутри-карьерного стока.

### **2.3.5. Дренаж разрезной траншеи**

При проходке разрезной траншеи подземные воды особенно сильно влияют на устойчивость откосов и условия работы горно-транспортного оборудования из-за высоких удельных (на 1 м откоса) притоков и соответственно заметного развития фильтрационных деформаций. Поэтому дренажные работы в период строительства карьера следует проводить с максимальной интенсивностью.

Так как системы дренажа разрезной траншеи определяются схемой вскрышных работ, рассмотрим два основных случая: дренаж при вскрытии экскаваторами и дренаж при вскрытии средствами гидромеханизации.

**Вскрытие с помощью экскаваторов.** Если расчет притоков воды в разрезную траншею показывает, что удельные притоки превышают критические величины (см. разд. 2.3.3) по крайней мере в течение 1,5–2 лет (считая от момента вскрытия водоносного горизонта карьером), то целесообразнее проводить предварительное осушение с помощью контурных систем водопонижающих скважин. Если удельные притоки не превышают критических значений, то для откачки поступающих к откосу вод могут использоваться средства открытого водоотлива. В противном случае следует дополнительно использовать иглофильтровые установки.

Отметим, что для водоносных горизонтов большой мощности (30–40 м и более) на первых этапах вскрытия можно ориентироваться на условие полного устранения высачивания воды в карьере путем поддержания уровня воды ниже дна разрезной траншеи. В тех случаях, когда породы всячего и лежащего боков образуют единый водоносный горизонт, это условие обычно выполняется в течение всего строительного периода.

После вскрытия водоносного горизонта осуществляется постепенный переход к дренажным системам, предусмотренным на период эксплуатации (см. разд. 2.3.2 и 2.3.3). При этом следует учитывать, что в первые годы эксплуатации (особенно со стороны рабочего борта) можно использовать те же дренажные системы, что и в период строительства.

Вместе с тем анализ работы многих карьеров показывает, что при экскаваторной выемке пород часто возможна их отработка и без предварительного дренажа

с использованием только открытого водоотлива. Это относится к тем случаям, когда породы, подлежащие дренированию, характеризуются малыми коэффициентами фильтрации (обычно менее 3 м/сут) или образуют единый водоносный горизонт без разделяющих водоупорных слоев.

Вскрытие обводненных толщ экскаваторами без предварительного дренирования может осуществляться с помощью передовых дренажных траншей, создаваемых драглайнами в подошве (углубляющегося) карьера. При этом минимальные размеры траншей выбирают с таким расчетом, чтобы на каждом этапе строительства развитие фильтрационных деформаций не превышало допустимых (по условиям горных работ) пределов (например, таким образом успешно проводилось вскрытие водоносных песков на ряде карьеров Тихвинского месторождения бокситов). Тем самым дренируется значительная часть естественных запасов подземных вод, тяготеющих к карьере, что дает большую экономию электроэнергии, оборудования и денежных средств [16].

**Использование средств гидромеханизации.** В этом случае единственная цель дренажа состоит в ограничении деформаций бортов и откосов в допустимых пределах. Применение этих средств целесообразнее всего при вскрытии обводненных рыхлых пород, образующих один мощный водоносный горизонт. Так, опыт вскрытия Лебединского карьера КМА (см. разд. 2.5.1) показывает, что в этих условиях они позволяют вообще отказаться от глубинного дренажа или существенно его сократить.

**Особенности вскрытия высоконапорных водоносных горизонтов.** Понятно, что для создания карьера, вскрывающего мощный и водообильный напорный горизонт, напоры должны быть предварительно снижены до величин, исключающих прорыв. Однако если мощность горизонта сравнительно невелика, то можно отказаться от длительного предварительного дренажа. Для водоносных горизонтов, приуроченных к сравнительно слабо проницаемым ( $k < 1-2$  м/сут) породам, в которых дренаж с помощью обычных технических средств малоэффективен, устранение опасности прорыва путем предварительного водопонижения нецелесообразно при любой их мощности.

В первый момент после вскрытия притоки в карьер могут быть довольно значительными, однако пьезометрическая воронка быстро распространяется на большие расстояния, в результате чего расходы резко убывают в течение короткого промежутка времени. Если объем водоприемного зумпфа в подошве разрезной траншеи соответствует величине ожидаемого суммарного притока и насосное оборудование подобрано правильно, то вскрытие напорного горизонта карьером не вызывает опасений.

## **2.4. ОСОБЕННОСТИ ДРЕНАЖА И ВОДООТВОДА В РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВЫХ УСЛОВИЯХ**

### **2.4.1. Дренаж месторождения типа А-2**

К этому типу прежде всего относятся угольные месторождения Урала, Сибири и Дальнего Востока, характеризующиеся наклонным

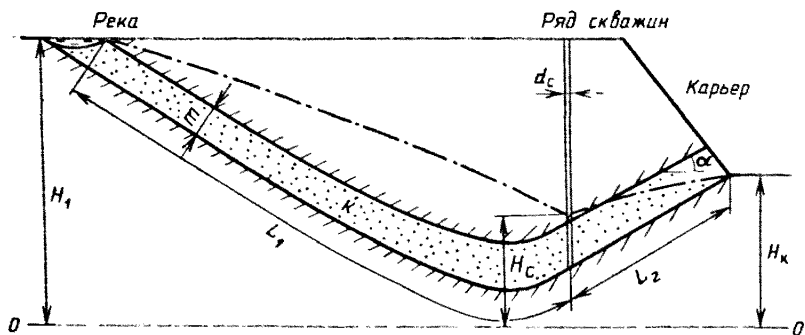


Рис. 2.7. Осушение карьера в условиях наклонного залегания водоносных слоев

залеганием угленосных толщ умеренно метаморфизованных осадочных пород — песчаников, алевролитов, аргиллитов, углей и др.

Основная особенность осушения месторождений с таким залеганием слоев — возможность полного стока к дренажам подземных вод по наклонному водоупору и, как следствие этого, устранение высачивания воды в откосах рабочих уступов (рис. 2.7) при перемещении фронта работ по падению пластов; при прочих равных условиях скорость дренирования тем выше, чем больше угол падения.

В то же время под влиянием напорных вод в лежащем боку происходят крупные глубинные оползни нерабочих бортов и внутренних отвалов (см. разд. 2.1.1), причем решающее влияние на возникновение оползней такого рода оказывает не водообильность горизонта, а величина напора в нем. Допустимое значение остаточного напора определяют расчетным путем по условию устойчивости пород лежащего бока.

Исходя из сказанного можно сделать вывод, что в породах висячего бока и в пласте полезного ископаемого обычно эффективен опережающий дренаж со стороны рабочего борта. Для этого чаще всего целесообразна линейная система водопонижающих скважин. Первоначальное расстояние от ряда скважин до карьера следует принимать равным пяти—семилетнему продвижению фронта работ. При синклинальном залегании пород и сравнительно малых размерах угленосной мульды (до 2 км в поперечнике) скважины следует располагать по ее оси. Число скважин, необходимое для полного устранения выхода воды в карьер, примерно обратно пропорционально углу падения слоев.

При малых углах падения ( $3-5^\circ$  и менее), а также при работах по восстанью пласта полезного ископаемого более эффективной может оказаться подземная система осушения — линейный штрек, пройденный по продуктивной толще и при наличии в ней водоупорных прослоев сочетающийся со сквозными фильтрами или восстающими и горизонтальными скважинами. Первоначальное удаление дренажного штрека от борта может приниматься равным восьми—десятилетнему продвижению фронта работ.

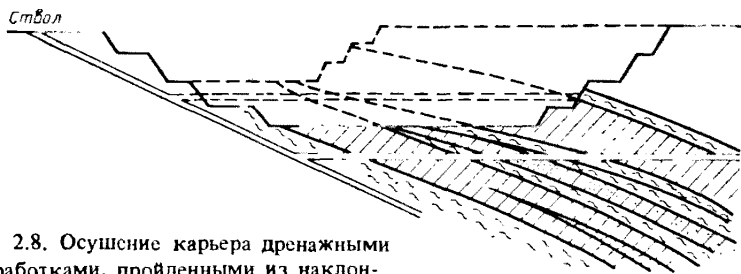


Рис. 2.8. Осушение карьера дренажными выработками, пройденными из наклонного ствола

Для дополнительного осушения продуктивного пласта могут использоваться дренажные шпуреки и горизонтальные скважины, пройденные из карьера.

Применение в широких масштабах открытого дренажа пород висячего бока рекомендуется лишь при работах по восстановлению пласта или крутом падении водоносных слоев. Он осуществляется, как правило, непосредственно откосами открытых горных выработок.

*В породах лежачего бока* целесообразно предварительное снижение напора уже на первых этапах строительства карьера, что связано с обеспечением устойчивости борта и внутренних отвалов. Для снижения напоров в породах лежачего бока можно использовать те же скважины, что и для снижения напора в породах висячего бока, а также обособленные системы самоизливающихся или водопонижающих скважин, пробуренных параллельно фронту работ с подошвы карьера. Для дренажа водоносных пород, залегающих непосредственно в почве отрабатываемого пласта, можно использовать открытые траншеи.

В целом при наклонном и крутом падении слоев по мере углубления и расширения карьера можно успешно использовать водопонижающие и наклонные самоизливающие скважины, проходимые с площадок уступов и с подошвы карьера. В сочетании с открытыми водосборниками в карьере они позволяют наиболее четко увязать систему осушения с локальными гидрогеологическими структурами и отказаться от проходки подземных дренажных выработок. Нужно, однако, отметить, что в условиях крутого падения вертикальные скважины оказываются достаточно эффективными лишь в мощных водоносных слоях, не имеющих промежуточных водоупорных пропластков. В противном случае осушение пород лежачего бока должно базироваться на самоизливающихся наклонных скважинах, пройденных из карьера, а пород висячего бока — на открытом дренаже (если он допустим по условиям выемки полезного ископаемого) или на системах подземных дренажных выработок, так как при проходке их вкрест простирания может быть пересечено большое число водоносных слоев (рис. 2.8). В тех же целях целесообразно из дренажных выработок, ориентированных по простиранию слоев, проходить горизонтальные и наклонные скважины.

## 2.4.2. Дренаж месторождений группы Б

К группе Б относятся месторождения, приуроченные к водоустойчивым скальным и полускальным породам, например многочисленные рудные месторождения Урала, Казахстана и Средней Азии.

Основная особенность крепких и средней прочности трещиноватых пород — их слабая изменчивость в откосах под влиянием воды, и связи с чем допустимо ее свободное высачивание в открытые горные выработки. Другая важная особенность — сильная неоднородность трещиноватости (проницаемости) пород даже в пределах одного геолого-структурного комплекса.

Существует множество примеров, характеризующих сильную неоднородность водообильности и проницаемости трещиноватых пород различного литологического состава. Иногда на протяжении сотен метров подземные горные выработки проходят по породам, почти не содержащим гравитационную воду, и лишь при встрече закарстованных известняков и участков с интенсивной трещиноватостью, приуроченных чаще всего к зонам тектонических нарушений и контактам различных литологических разностей пород, наблюдается значительная обводненность. Характерны случаи обводненности отдельных взрывных скважин при наличии рядом совершенно сухих.

Перечисленные особенности комплексов твердых трещиноватых пород значительно ограничивают эффективность глубинного дренажа на месторождениях этого типа; чаще всего здесь технически и экономически целесообразен открытый дренаж.

Практика открытых разработок показывает, что применение открытого дренажа, как правило, не вызывает в этих условиях каких-либо существенных осложнений. Во-первых, водоносные породы в большинстве случаев вскрываются карьером при отсутствии высоких напоров в породах всякого бока, а во-вторых, прорыв при правильной организации работ редко приводит к катастрофическим последствиям, так как в карьере имеется большое водонеприемное пространство. Влияние воды на ведение буровзрывных работ также не может считаться определяющим показателем для отказа от открытого дренажа: оно может быть устранено некоторым применением технологии этих работ.

Нужно сказать, что на многих месторождениях рассматриваемого типа величины притоков подземных вод в зависимости от количества атмосферных осадков резко изменяются во времени; основное значение на этих месторождениях имеют мероприятия по организации поверхностного стока, а глубинный дренаж, как правило, экономически нецелесообразен. Подобные условия характерны, например, для многих рудных карьеров Средней Азии и Казахстана.

Применение открытого дренажа (часто вместе с локальным глубинным) неизбежно при осушении пород, содержащих большое число водоносных зон, гидравлически слабо связанных друг с другом, когда невозможно заранее достаточно точно определить расположение обводненных

участков. Если в этом случае имеются весьма водообильные зоны, то открытый дренаж должен быть организован достаточно надежно. Так, объем водоприемников (зумпфов) следует выбирать со значительным запасом, а для более эффективного прогноза притоков необходимо бурение опережающих скважин непосредственно из забоя.

При встрече участков повышенной обводненности следует проводить локальное глубинное водопонижение скважинами, проходимыми с подошвы карьера. Такой локальный дренаж целесообразен в следующих случаях: а) при наличии выявленных предварительными изысканиями зон с резко повышенной обводненностью или проницаемостью (зоны тектонического дробления, закарстованных пород и т.д.); б) когда в прибортовой зоне концентрируются высокие напоры, обусловленные наличием вертикальных или наклонных относительно водоупорных образований (для снижения напоров проходят самоизливающие скважины непосредственно из карьера); в) при возможности полного осушения вскрышной толщи и полезного ископаемого малым числом водопонижающих скважин, пробуренных в подошву карьера.

В качестве примера можно привести Высокогорский железорудный карьер, который полностью осушался одной-двумя водопонижающими скважинами. Высокая эффективность водопонижения на этом карьере объяснялась особенностями геологического строения месторождения. Карьер приурочен к узкой полосе хорошо проницаемых известняков, ограниченной с обеих сторон комплексом слабо проницаемых пород, поэтому откачка воды из скважин, пройденных на известняки, позволила просто и эффективно решить проблему осушения месторождения.

Специфичными являются условия дренажа разрезной траншеи. Ввиду того, что притоки в карьеры, вскрывающие комплексы трещиноватых пород, в первые годы обусловлены главным образом естественными запасами вод, величины притоков часто максимальны в период строительства карьера. Учитывая, кроме того, что трещиноватые породы чаще всего отличаются небольшими естественными запасами вод и хорошо дренируются, во многих случаях следует ориентироваться на глубинный дренаж разрезной траншеи, осуществляемый параллельно с ее проходкой. Для этого могут использоваться водопонижающие скважины, пройденные на участке разрезной траншеи (с поверхности или с борма), причем можно ограничиться небольшим числом скважин — порядка трех—пяти, а иногда и меньше. Необходимое число скважин можно определить расчетным путем, задавая положение уровней ниже дна траншеи.

Особое место среди твердых водоносных пород занимают карбонатные, которые во многих случаях характеризуются повышенной трещиноватостью и закарстованностью, большими ресурсами подземных вод. Поэтому комплексы карбонатных пород нередко целесообразно дренировать системами водопонижающих скважин и в эксплуатационный период.

Наоборот, в породах, обладающих сравнительно слабой трещиноватостью (ориентировочно с водоотдачей менее 0,5%), разрезную траншею

можно проходить без глубинного дренажа. В этом случае откачка воды ведется из открытых водоприемников, расположенных в подошве разрезной траншеи.

### 2.4.3. Дренаж внутренних отвалов и подошвы карьера

Основные мероприятия по обеспечению устойчивости внутренних отвалов песчано-глинистых пород — это организация водоотвода в подошве карьера и дренаж основания отвалов (для предупреждения дополнительного увлажнения отсыпаемых пород) или снижение напоров в подошве карьера.

Если *водоносный пласт* залегает непосредственно в подошве карьера, то наиболее целесообразен систематический дренаж: в выработанном пространстве проходятся канавы-осушители (рис. 2.9) вдоль фронта работ с уклоном к канавам-собираателям, которые располагаются перпендикулярно к фронту на наиболее низких участках выработанного пространства и обеспечивают сток воды к водосборникам. Глубина канав-осушителей зависит от требуемого снижения уровней и принятого расстояния между ними; обычно она не превышает 3 м. Расстояние между канавами-осушителями  $\sigma$  чаще всего принимается равным ширине экскаваторной заходки. Для сохранности канавы заполняют фильтрующим материалом или в них укладывают трубы; во избежание заиливания их прикрывают слоем песка мощностью 0,5–1 м.

Организация систематического дренажа заметно осложняется при бестранспортной системе разработки с частичной подвалкой нижней, наиболее обводненной части разрабатываемого пласта полезного ископаемого (см. рис. 2.6, б). В этом случае дренажные канавы следует проводить сразу вслед за экскаватором и засыпать дренажным материалом (рис. 2.10).

При отсыпке отвалов на *водоупорное основание* дренажные мероприятия в подошве карьера необходимы лишь при наличии под водопором напорного горизонта, заметно влияющего на устойчивость отвалов. Дренаж осуществляется трубчатыми водопонижающими колодцами (самоизливающими или оборудованными насосами), которые располагаются в выработанном пространстве параллельно линии отвалов и обновляются по мере продвижения фронта работ.

Если снижение напоров не требуется, то ограничиваются организацией водоотвода в подошве карьера с помощью неглубоких канав, которые перед засыпкой отвалами заполняют дренажным материалом.

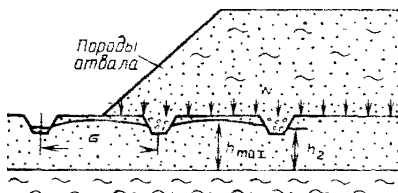


Рис. 2.9. Схема систематического дренажа основания отвалов:

$h_2$  — уровень воды в канаве;  
 $h_{max}$  — максимальный уровень грунтовых вод после проведения дренажных работ;  $w$  — инфильтрация

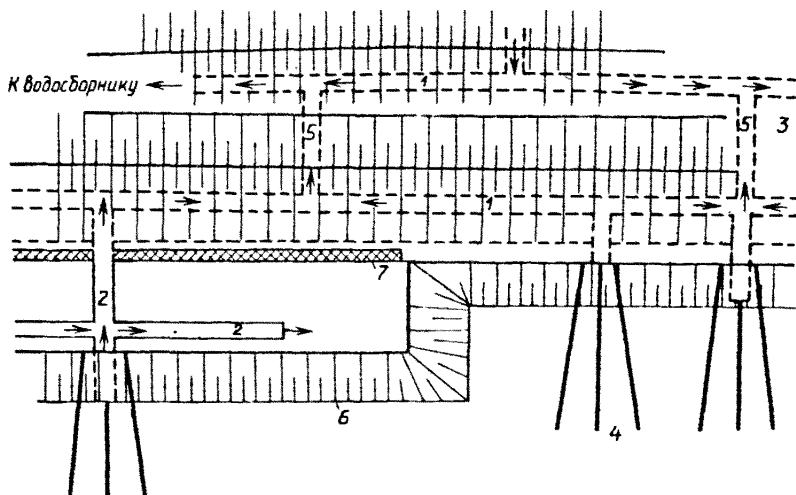


Рис. 2.10. Схема дренажа основания отвалов:

1 — продольные каналы; 2 — штретки; 3 — угольный целик; 4 — горизонтальные скважины; 5 — поперечные каналы; 6 — рабочий уступ; 7 — угольный пласт

Следует, однако, иметь в виду, что для ускорения консолидации основания и глинистых пород отвалов нередко необходимы специальные мероприятия, снижающие избыточное поровое давление: селективная отсыпка вскрышных пород (для создания в отвале отдельных фильтрующих (песчаных) прослоев), устройство дренажных насыпей из гравия (щебня) или сплошных песчаных подушек в основании отвалов (мощность песчаного слоя может приниматься относительно небольшой — 50–80 см). При отсыпке отвалов на скальных или полускальных породах дренирующий слой может быть создан путем рыхления основания буровзрывным способом.

Для уменьшения инфильтрации атмосферных осадков следует выравнивать поверхность отвалов на участках, прилегающих к откосу.

#### 2.4.4. Организация поверхностного и внутрикарьерного стока

Регулирование поверхностного стока дождевых, талых и технических вод должно производиться в пределах карьера и прилегающей к нему полосы на расстоянии не менее 200 м при наличии слабо проницаемых покровных отложений и 400–300 м при отсутствии таковых.

При наклонном залегании пород мероприятия по регулированию поверхностного стока должны с максимальной интенсивностью проводиться на прилегающих к карьере участках выходов водоносных пластов на поверхность. На месторождениях групп Б, при малой мощности покровных отложений глинистого состава, регулирование поверхностного стока приобретает особое значение, так как поступление атмосферных или та-



лых вод может привести к быстрому подъему уровней в трещиноватых породах.

Мероприятия по регулированию поверхностного стока включают устройство нагорных и водоспускных канав, планировку территории вокруг карьера (с приданием поверхности уклона в сторону нагорных канав) и площадок уступов. Уклоны, придаваемые канавам, должны гарантировать отсутствие эрозионного размыва. На откосах уступов через каждые 200–300 м необходимо предусматривать ливнестоки.

Система отвода дождевых, талых и технических вод должна увязываться со всей системой дренажа и внутрикарьерного водоотлива. При этом в ряде случаев целесообразно применение единых водоотливных средств путем использования общих водосборников и насосов, устройства перенусковых скважин из карьера (на подземные дренажные выработки) и т.д.

Мероприятия по организации внутрикарьерного стока должны, в первую очередь, предотвращать свободное стекание высачивающихся вод по откосам бортов карьера. Несоблюдение этого требования приводит к развитию различного рода деформаций, начиная с размыва откосов и кончая оползнями уступов набухающих глинистых пород. Кроме того, стекающая вода, скапливаясь на площадках добычных уступов и в основании, дополнительно увлажняет полезное ископаемое.

Вытекающие на откос воды должны поступать в водосборники по специальным отводным устройствам (закрытые и открытые канавы, трубопроводы и т.п.). Для централизации водоотлива иногда целесообразно создание специальных водоотводных выработок под подошвой карьера, на которые из отдельных открытых водосборников бурят водосбросные скважины. Особенно часто необходимость в этом возникает при наличии внутренних отвалов (в частности, при работах с подвалкой обводненных пород), когда из-за сложной гипсометрии водоупорных пород в подошве карьера самотечный водоотвод невозможен. В частности, при отработке месторождений по восстановлению почвы пласта обводненного полезного ископаемого применение бестранспортных систем разработки с подвалкой откоса добычного уступа (см. рис. 2, 6, в) вообще крайне нежелательно: в этом случае создание приемлемой схемы водоотвода весьма затруднительно.

Откачиваемые на поверхности подземные воды, не используемые для водоснабжения, должны сбрасываться в реки или водоемы, если это допустимо по санитарным условиям. В прочих случаях (при отсутствии рек и водоемов или при опасности их загрязнения) следует устраивать пруды-аккумуляторы, приуроченные к естественным впадинам или оконтуренные ограждающими дамбами. Для снижения до минимума вторичного поглощения воды пруды-аккумуляторы необходимо располагать на слабопроницаемых покровных отложениях. Аналогично, при отводе и осушении рек и водных коллекторов (озера, пруды, болота) следует тщательно изолировать русла отводных каналов, которые являются дополнительным источником питания подземных вод и нередко вызывают в связи с этим оползневые деформации.

В целом следует уделять особое внимание мероприятиям по отводу

поверхностных вод и организации внутрикарьерного стока: пренебрежение этими мероприятиями часто сводит на нет работу мощных и дорогих дренажных устройств, предназначенных для борьбы с подземными водами.

## 2.5. ПРИМЕРЫ ОСУШЕНИЯ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ

### 2.5.1. Дренаж Лебединского месторождения КМА

В качестве примера осушения месторождений типа А-1 рассмотрим дренаж Лебединского месторождения КМА [16].

В *геологическом строении* района принимают участие докембрийские кристаллические породы и перекрывающие их осадочные отложения в основном мезокайнозойского возраста (рис. 2.11). Железные руды, приуроченные к верхней части докембрийских кристаллических образований, залегают на глубине 70–130 м. Рудно-кристаллическая толща перекрывается отложениями юрского возраста, представленными опесчаненными глинами и глинистыми песками мощностью от 0,2 до 25 м. Выше по разрезу залегают кварцевые пески сеноман-альбского возраста и мергельно-меловая толща. Пески – от гравелистых в основании толщи до средне- и мелкозернистых в верхней части; мощность их 23–28 м. Мергельно-меловая толща мощностью 5–60 м характеризуется достаточно интенсивной трещиноватостью. На размытой поверхности мергельно-меловых пород залегают палеоген-неогеновые и четвертичные отложения, представленные глинами и лессовидными суглинками мощностью 10–20 м.

*Гидрогеологические условия* участка месторождения характеризуются развитием двух водоносных горизонтов – безнапорного, связанного с отложениями мелового возраста (пески, мела и мергели) и напорного, приуроченного к трещиноватым рудно-кристаллическим породам.

Мощность основного – безнапорного – водоносного горизонта в районе месторождения порядка 45 м. Коэффициент фильтрации колеблется в пределах 10–20 м/сут, коэффициент уровняспроводности составляет около  $10^{-4}$  м<sup>2</sup>/сут. Водоотдача мелов примерно 0,03, песков – 0,25 – 0,3. Коэффициент фильтрации руды составляет в среднем 0,5 м/сут.

Обработка вскрышных пород до уровня подземных вод производилась экскаваторами ЭКГ-4 (мехлопата) и гидромониторами, а обработка обводненных сеноман-альбских песков – плавучими земснарядами. В период эксплуатации карьера вскрышные работы производятся экскаваторами ЭКГ-4 и ЖШ-14/75 (драглайн). Доставка пород в отвалы осуществляется железнодорожным и автомобильным транспортом. Добыча ведется с применением буровзрывных работ, с погрузкой руды на самосвалы экскаваторами ЭКГ-4.

*В период строительства карьера* проходка разрезной траншеи в мергельно-меловых породах осуществлялась под защитой системы из 45 водопонижающих скважин, фильтры которых оборудованы на пески.

В условиях работы земснарядов, как показали специальные исследования, подтвержденные позже опытом строительства карьера [11], можно было проводить откачку подземных вод, в основном, открытым водоотливом из котлована. Общая устойчивость частично подтопленного песчаного откоса в данном случае является обеспеченной при угле наклона порядка 26–28°; расчетная длина языков отмыывания не превышает 15 м.

Учитывая эти соображения, строители значительно увеличили открытый водоотлив из котлована земснарядов. При строительстве карьера первой очереди земснарядами непосредственно из котлована откачивалось до 40 % общего количества воды, поступающей к котловану, второй очереди – более 50 %, на третьей оче-

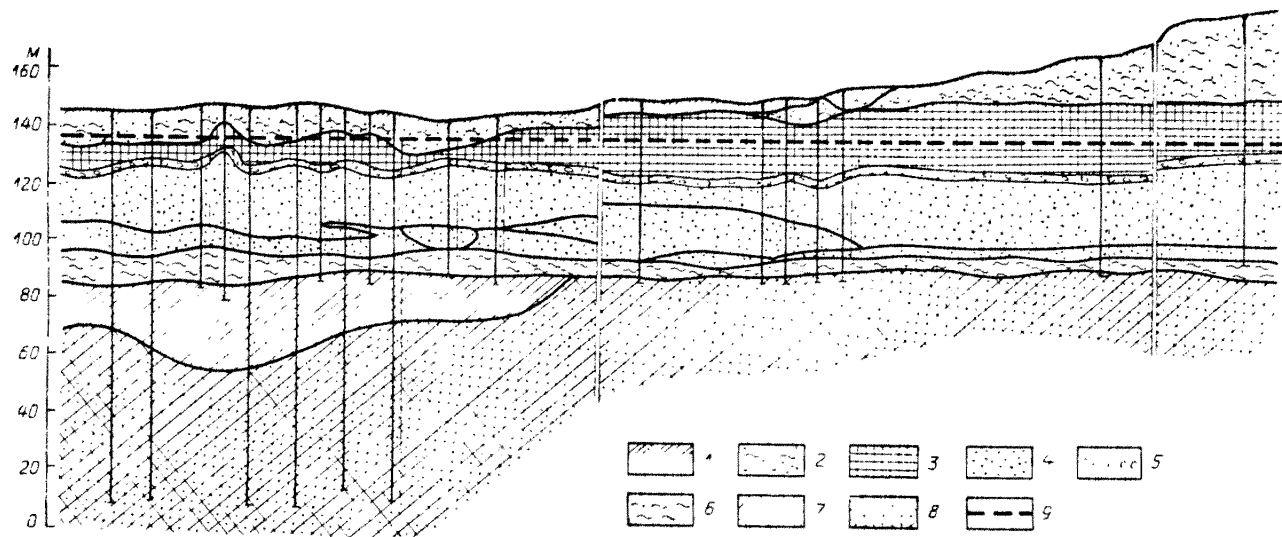


Рис. 2.11. Геолого-литологический разрез Лебединского месторождения:

1 — почвенно-растительный слой; 2 — суглинок; 3 — мел; 4 — песок; 5 — фосфорит; 6 — глина; 7 — железная руда; 8 — кварцит; 9 — естественный уровень подземных вод

ди работы велись длительное время вообще без глубинного дренажа; притоки воды достигали  $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

При открытом водоотливе наблюдалось повсеместное оплывание откосов, которое захватывало прибрежную полосу шириной до 14 м. Суффозионные явления практического значения не имели: сравнение плотности и прочности песков до начала работы земснарядов и после ее окончания не выявило сколько-нибудь существенных изменений этих показателей, несмотря на то, что на отдельных участках выносилось до 3 % частиц мелких фракций песка.

В процессе разработки первой очереди карьера выяснилось, что железные шнеки, сцементированные в песок, характеризуются наличием трещин, вдоль которых может происходить фильтрационный вынос песка. Этот вынос происходил сравнительно интенсивно при больших углах подводного откоса ( $35-40^\circ$  и более) и быстро затухал при малых (до  $30^\circ$ ). На участках крутого подводного откоса вынос приводит к образованию провалных воронок на некотором удалении от откоса коглована. Борьба с локальными деформациями фильтрующего откоса, вызванными выносом песка, велась путем пригрузки откоса в пределах промежутка высачивания щебеночным материалом. В карьере второй и третьей очереди деформаций описанного типа не отмечалось.

Анализ работы карьера подтверждает, что широкое применение открытого водоотлива при работе земснарядов было вполне обоснованным и позволило добиться значительной экономии средств при отсутствии опасных деформаций бортов.

Величина водопритокков из рудной толщи оказалась незначительной ( $20-30 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и специальных дренажных мероприятий для снижения напоров в рудной толще не потребовалось, что подтвердило безусловную целесообразность открытого дренажа пород рудной толщи.

*Дренаж нерабочего борта в период эксплуатации* заключается в следующем. После ввода карьера в эксплуатацию водопонижающие скважины со стороны нерабочего борта были переоборудованы в сквозные фильтры, пройденные на контурный дренажный штрек в рудной толще (рис. 2.12). Для перехвата воды, выходящей на откос, вначале использовались иглофильтровые установки, которые затем были заменены другими системами — горизонтальным прибортовым дренажем и горизонтальными скважинами.

Подробное рассмотрение вопроса показывает, что в условиях Лебединского карьера дренажную систему, сооруженную со стороны нерабочего борта (дренажные штреки общей длиной около 14 км со сквозными фильтрами и внутренний дренажный контур), можно заменить самостоятельной дренажной системой, состоящей из горизонтальных скважин и прибортового дренажа (глубина скважин 40–50 м, расстояние между ними 50 м). Проведенная опытная проверка этой системы (при отключенных сквозных фильтрах) подтвердила ее надежность.

Водопонижающие скважины *рабочего борта в период эксплуатации* переоборудовались в сквозные фильтры, пройденные на дренажный штрек. Перехват потока, выходящего на откос, осуществлялся легкими иглофильтровыми установками; однако в дальнейшем было признано целесообразным заменить эти установки совершенными канавами, пройденными по "недобору" в сеноман-альбских песках (см. рис. 2.4). Мощность "недобора" составляла около 2,5 м при ширине канавы поверху 3–4 м. Канавы принимала удельный приток порядка  $25 \text{ м}^3/\text{ч}$  на 100 м борта и обеспечивала "сухую" отработку нижнего участка песков на расстоянии до 50 м от канавы.

В целом система дренажа рабочего борта обеспечивает необходимую степень осушения пород вскрыши, ее работа обходится сравнительно дешево и требует относительно малого числа рабочих. Она удобна в эксплуатации и обеспечивает высокую степень централизации водоотлива.

Вместе с тем проведенный анализ показывает, что подземную систему осушения, на строительство которой было затрачено около 30 млн руб., можно было

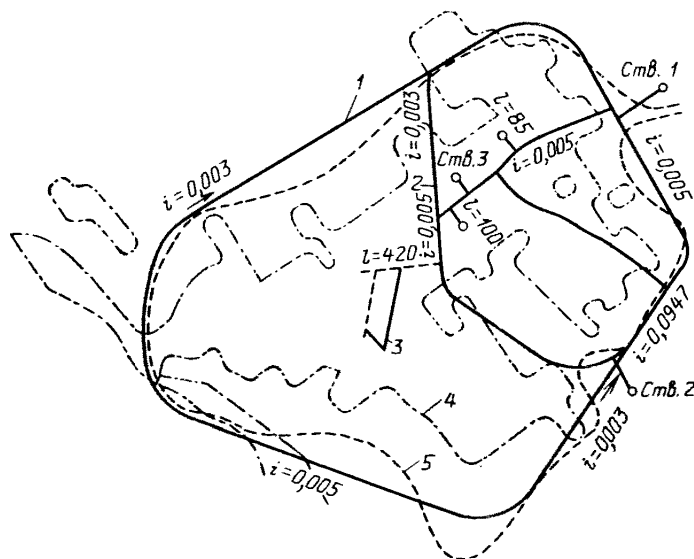


Рис. 2.12. План Лебединского карьера:

1, 2 — дренажные штреки карьера первой и второй очереди; 3 — сбоочные выработки; 4 — контур рудной залежи; 5 — контур карьера на конец отработки

заменить более дешевой системой водоупоняющих скважин в сочетании с самоотечными канавами [16]. На рабочем борту Лебединского карьера водоупоняющие скважины начали эффективно использоваться с 1965 г. Расчеты показали, что к моменту включения дренажного кольца, расположенного на предельном контуре карьера, на южном и юго-западном участках можно было пропустить к внутреннему дренажному контуру (дренажные траншеи) около 50 % внешнего притока. Подземная система осушения на участке внешнего дренажного контура длиной около 6 км была с успехом заменена системой водоупоняющих скважин, расположенных на расстоянии порядка 120 м друг от друга.

Для дренажа рудно-кристаллической толщи в период эксплуатации, с целью устранения высачивания подземных вод на добычные уступы и снижения влажности руды, были использованы те же водоупоняющие скважины и сквозные фильтры, а также сквозные фильтры и восстающие скважины из дополнительных диагональных штреков.

Однако влажность руды, поступающей на фабрику, снизить дренажем не удалось, она составляла примерно 10 %. Объясняется это высоким содержанием в руде связанной воды, не удаляемой при гравитационном стекании.

Таким образом, основным способом дренажа рудной толщи на месторождении должен быть открытый водоотлив из карьера. При необходимости (при встрече зон повышенной трещиноватости и обводненности) его можно сочетать с неглубокими (до 8 м) водоупоняющими трубчатыми колодцами, проходными у основания добычных уступов или с берм по руде.

Мероприятия по осушению рудной толщи оказываются достаточно эффективными лишь при организации внутрикарьерного стока. Для этого вода с подошвы карьера сбрасывается вниз на диагональный штрек по специальным сбросным скважинам. Особое внимание обращается на то, чтобы не было прорыва подземных вод из вышележащих пород на рудные уступы.

## 2.5.2. Дренаж Северо-Уральских буроугольных месторождений

В качестве примера осушения месторождений типа А-2 рассмотрим дренаж Северо-Уральских буроугольных месторождений, причем наиболее подробно остановимся на анализе дренажа разрезов Волчанского месторождения [16].

Эти разрезы приурочены к тектонической депрессии, выявленной в меридиональном направлении. Дно и борта депрессии сложены палеозойскими породами – известняками, глинистыми сланцами, песчаниками и конгломератами. На периферийных частях месторождения известняки выходят над четвертичными отложениями. Мезозойские отложения, заполняющие депрессию, представлены переслаивающимися аргиллитами, алевролитами, углями, песчаниками, глинами и конгломератами: мощность этой толщи достигает 300 м и более. Продуктивная толща образована трещиноватыми углями, переслаивающимися с аргиллитами, алевролитами и песчаниками, общая мощность этих пород достигает 250 м.

Мезозойские отложения образуют синклиналичную складку меридионального простирания, осложненную вторичными складчатыми формами. Падение слоев на восточном крыле достигает  $80^\circ$ , а на западном составляет  $10-40^\circ$ . Они повсеместно перекрыты четвертичными породами – торфом, глинами и песками, мощностью от 2 до 25 м.

Схематический типовый разрез для одного из участков Волчанского месторождения приведен на рис. 2.13.

На месторождении выделяются следующие водоносные горизонты: четвертичный, верхний угленосный, промежуточный, нижний угленосный, подугольный и горизонт известняков.

Водоносность четвертичных отложений в основном невелика. Верхняя угленосная толща вместе с неперекрывающими ее песчаниками образует единый напорный горизонт, естественный уровень которого совпадал (до начала горных работ) с поверхностью земли. Угли более трещиноваты, чем песчаники. Средний коэффициент фильтрации пород 13 м/сут. Воды промежуточного горизонта приурочены к прослоям и линзам песчаников в продуктивной толще; горизонт характеризуется слабой обводненностью. Трещиноватые угли нижнего угленосного горизонта имеют коэффициенты фильтрации от 0,45 до 2,7 м/сут. Подугольный горизонт связан с песчаниками, отделенными от угольного пласта аргиллитами и алевролитами мощностью 15–20 м и более; коэффициент фильтрации песчаников изменяется от 0,3 до 3 м/сут.

Обводненность известняков связана с зонами трещиноватости и карстовыми полостями. В связи с этим водообильность их неравномерна, местами они безводны.

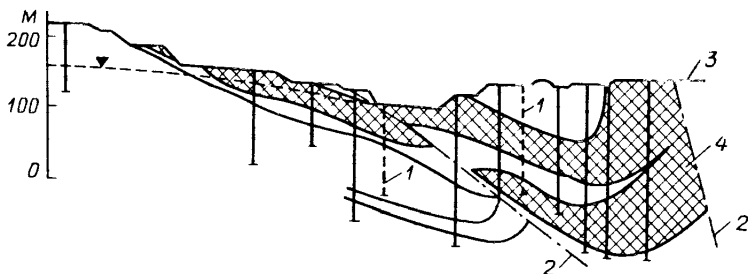


Рис. 2.13. Схематический разрез Волчанского месторождения в районе третьего карьерного поля:

1 – водопонижающие скважины; 2 – тектонические нарушения; 3 – начальный контур горных работ; 4 – продуктивная толща

Наиболее обводнены известняки в юго-восточной части месторождения (разрез 5), в зоне надвига их на мезозойские отложения, где отмечается повышенная трещиноватость и карстовые проявления. Карстовые полосы вскрываются в интервале глубин 10–20 м, размеры полостей достигают 10 м. Водопроницаемость известняков здесь максимальная (до 27 м/сут), а коэффициенты фильтрации обычно колеблются от 0,01 до 0,1 м/сут.

На месторождении применяется экскаваторная отработка системой параллельных заходок с погрузкой вскрышных пород на железнодорожный транспорт; транспортировка угля – конвейерная. Разрез 3 на юге обрабатывает шахтное поле, к которому с востока примыкает разрез 5.

Дренажное Волчанского разреза 4 осуществлялось открытым водоотливом и системой водоупонигающих скважин. При отработке верхнего угленосного горизонта осушение углей и надугольных песчаников проводилось четырьмя водоупонигающими скважинами, пробуренными по оси синклинальной складки на расстоянии 250 м друг от друга. Скважины вскрывали верхнюю обводненную толщу до подошвы угольного пласта и оборудовались фильтрами на этот пласт, так как благодаря гидравлической взаимосвязи осушение всей толщи пород можно было осуществить откачкой из наиболее проницаемых пород – углей.

Скважины вводились в эксплуатацию не одновременно, тем не менее уже при работе только двух скважин с суммарным расходом  $120 \text{ м}^3/\text{ч}$  через 50–60 сут уровень подземных вод снизился более чем на 14 м. После введения в эксплуатацию еще двух скважин и увеличения суммарного дебита установки до  $240 \text{ м}^3/\text{ч}$  снижение уровня подземных вод шло очень интенсивно: на 40 м за 9 мес. Столь быстрое осушение объясняется прежде всего затрудненным питанием водоносных горизонтов и синклинальным залеганием пород: расположение скважин по оси складки позволило вести осушение при максимальных понижениях. В условиях "обратного" уклона пластов (от откоса) было достигнуто полное осушение забоев карьера. Снижению уровней способствовало также наличие хорошей связи углей с песчаниками.

Отметим попутно, что на соседнем Богословском месторождении осушение сначала велось сетью горизонтальных выработок, пройденных по углю, и шахтными стволами. Анализ опыта эксплуатации подземной системы дренажа показал, однако, ее малую эффективность, что объясняется рядом причин:

1) дренаж штреками без сквозных и забивных фильтров неэффективен вследствие слоистого строения угольной толщи и наличия водоупорных прослоев аргиллитов;

2) шахты и горизонтальные выработки быстро срабатываются карьером, так как удаление их на большее расстояние от карьерного поля невозможно по условиям залегания угленосной толщи, а также ввиду наличия сильнообводненных вмещающих известняков, создающих угрозу прорыва;

3) с помощью подземных выработок трудно осуществить дренаж известняков, сохранение напоров в которых может повлечь за собой нарушение устойчивости бортов. Попытка пройти дренажный штрек в известняках не увенчалась успехом в силу значительных водопритоков.

На долю открытого водоотлива при работе подземной системы осушения приходилось более половины общего притока подземных вод к карьеру. При одинаковых эксплуатационных затратах капитальные затраты по подземному дренажу были неизмеримо выше, чем по открытому.

Интенсивное осушение Волчанского разреза 4 с помощью водоупонигающих скважин подтвердило эффективность поверхностного способа осушения и показало нецелесообразность применения подземного дренажа в аналогичных условиях.

Однако проектная схема дренажа на Волчанском разрезе 4 имела важный недостаток. Дело в том, что скважинами дренировались лишь породы всячего бока и полезное ископаемое, а в породах лежащего бока, не вскрытых карьером, сохранялись высокие напоры вод. Вследствие этого по всему разрезу начали развиваться крупные оползни. Их появление объясняется тем, что гидростатическое давление

и гидродинамическое давление, обусловленное напорами в водоносных горизонтах лежащего бока, уменьшают эффективное давление в глинистых породах, залегающих в подошве карьера, и способствуют их разуплотнению (см. разд. 1.4). На указанном разрезе при отработке верхнего угольного уступа оползни происходили в основном по кровле нижнего угленосного пласта в результате разуплотнения прослоев аргиллитов.

Для предотвращения оползней необходимо дренировать породы лежащего бока. Водопонижающие скважины на разрезе 4 следовало пробурить в нижний угленосный пласт и тем самым снизить напоры в лежащем боку, что подтверждается опытом водопонижения на разрезе 3 Волчанского месторождения: по западному борту этого разреза работали три-четыре скважины, оборудованные на подугольный горизонт, с дебитами  $30-90 \text{ м}^3/\text{ч}$  (суммарный дебит  $100-230 \text{ м}^3/\text{ч}$ ). Дренаживание песчаников в лежащем боку способствовало повышению устойчивости пород западного борта.

В целом для осушения угольного горизонта на разрезах 3 и 5 одновременно работали шесть-семь скважин с дебитами от 13 до  $60 \text{ м}^3/\text{ч}$  при суммарном дебите  $200-350 \text{ м}^3/\text{ч}$ . В результате работы скважин снижение уровней в угленосных отложениях в пределах разреза 3 обеспечивало отработку углей в основном при сухих забоях. На большей части разреза 5 уровни также устанавливались ниже отметок рабочих забоев.

На южном крыле мулды, в зоне надвига, работало шесть скважин, оборудованных на закарстованные известняки, с суммарным дебитом  $1300 \text{ м}^3/\text{ч}$ , дебиты отдельных скважин изменялись от 100 до  $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Откачка велась с целью предотвращения прорыва вод в выработанное пространство, а также для водоснабжения. Однако эти скважины не обеспечивали достаточного снижения напоров в прибортной зоне (восточный борт разреза 5) за пределами зоны надвига. Уже при высоте борта 80 м в условиях высоких напоров в известняках, а также неблагоприятного мулдыобразного залегания угленосных пород на этом участке борт находился в оползневом состоянии.

В заключение упомянем оползни южной части западного борта в пределах разрезов 3 и 4, захватывавших четвертичные и угленосные отложения. Эти деформации были обусловлены принципиально иными причинами, нежели упомянутые выше оползни на разрезе 4: они в значительной мере были вызваны плохим состоянием водоотводных канав. В результате в южной части западного борта возник источник подпитки угольных и подугольных водоносных горизонтов: в основании борта наблюдалось постоянное высачивание подземных вод, в то время как уровни в подугольных песчанниках и в угольном пласте находились ниже отметок высачивания. Развитие оползневых явлений способствовали также особенности залегания угленосных отложений (падение пластов в сторону выработанного пространства под углом  $30^\circ$ ) и способ ведения горных работ (подрезка борта с образованием сдвоенного уступа).

### 2.5.3. Дренаж Уфалейских никелевых месторождений

В качестве примера дренажа месторождений группы Б рассмотрим осушение Черноозерского карьера Уфалейского никелевого месторождения [16].

В геологическом строении Черноозерского участка выделяются палеозойские (сланцы, мраморизованные известняки, интрузивные породы) и мезо-кайнозойские породы (рис. 2.14).

Породы лежащего бока представлены сланцами, на которых залегают дезинтегрированные серпентиниты и сильно выветрелые сланцы. Серпентиниты на площади месторождения подстилаются мраморами, залегающими в виде полосы северо-западного простирания на глубине 50–120 м. На небольшом участке в северной части месторождения мраморы выходят на поверхность. Распространение мраморов по простиранию ограничено: примерно в 1 км к северу полоса мраморов пре-



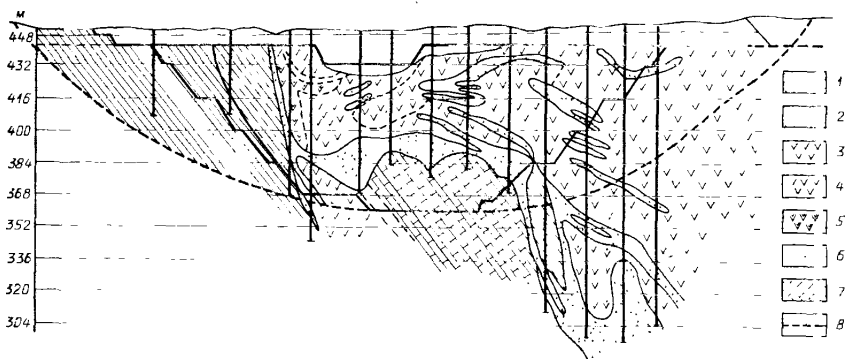


Рис. 2.14. Геологический разрез Черноозерского карьера:

1, 2 — хлоритовый сланец (1 — ненарушенный, 2 — разложившийся); 3–5 — серпентинит (3 — плотный, 4 — дезинтегрированный, 5 — окремненный выщелоченный и ожелезненный); 6 — карстовый алевроит; 7 — мрамор; 8 — возможная кривая скольжения

рывается тектоническим разломом; здесь мраморы контактируют со сланцами, на востоке — с серпентинитами, на западе — со сланцами. С поверхности мраморы сильно закарстованы. Карстовые полости часто выполнены рыхлым обломочным материалом, образовавшимся из коренных пород и слабо сцементированным глинистыми продуктами.

Оруденение приурочено к дезинтегрированным серпентинитам, карстовым образованиям и сильно выветрелым сланцам. Породы висчего бока представлены в основном крепкими и дезинтегрированными серпентинитами, частично — сильно выветрелыми сланцами.

Палеозойские породы перекрыты комплексом мезо-кайнозойских пород, представленных продуктами древней коры выветривания, мощностью от нескольких до 150 м и более, и четвертичными отложениями — суглинками и глинами незначительной мощности (несколько метров).

Наиболее обводненными на месторождении являются мраморы, закарстованные участки которых характеризуются высокой водообильностью. Значение коэффициента фильтрации для мраморов составляет примерно 10 м/сут. Мраморы благодаря повышенной трещиноватости и гидравлической связи с другими водоносными породами играют роль аккумуляторов подземных вод на месторождении. Отдельные закарстованные зоны, очевидно, гидравлически связаны между собой, так как при откачке из мраморов депрессионная воронка быстро развивалась по всей площади карьера.

Водообильность серпентинитов невысокая: средний коэффициент фильтрации составляет 0,7 м/сут, водоотдача — около 1 %; водообильность сланцев еще ниже и в большинстве случаев они практически водоупорны.

Воды рыхлых мезо-кайнозойских отложений, представленных продуктами коры выветривания, приурочены к маломощным песчаным линзам и обломочным скоплениям среди глинистых пород. Водообильность этих пород незначительна: коэффициент фильтрации порядка 0,1 м/сут.

В целом все водоносные образования гидравлически связаны между собой и могут рассматриваться как единый водоносный комплекс.

Разработка Черноозерского карьера осуществлялась экскаваторами ЭКГ-2 и ЭКГ-4 с погрузкой на автотранспорт.

Так как основные запасы руд, представленных сильно выветрелыми породами

(склонными к увеличению влажности), залегают ниже уровня подземных вод, целесообразно провести глубинное дренирование месторождения. Это определяется не столько устойчивостью бортов и уступов (рыхлые породы, способные разуплотняться, встречаются лишь на отдельных участках), сколько условиями экскавации пород и необходимостью снижения влажности руды.

В проекте рассматривались два способа осушения Черноозерского месторождения: подземный — системой горных выработок протяженностью около 25 км со сквозными фильтрами и поглощающими скважинами, и поверхностный, предполагавший работу 20 водопонижающих и 100 поглощающих скважин. Оба варианта были отвергнуты горно-геологической службой предприятия, и дренирование месторождения велось всего двумя водопонижающими скважинами.

Такое решение диктовалось гидрогеологическими условиями — хорошей взаимосвязью водоносных зон, слабой водообильностью пород, подлежащих осушению (серпентиниты), наличием в основании разреза хорошо фильтрующих пород (мраморы). В этих условиях можно было использовать глубинный дренаж месторождения весьма ограниченными средствами.

Первоначально была введена в эксплуатацию одна водопонижающая скважина, оборудованная на мраморы. За 5 мес ее эксплуатации уровень подземных вод в серпентинитах снизился на 45–50 м. Максимальный дебит при этом составлял  $220 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Снижение уровня подземных вод происходило почти равномерно по всей площади зоны осушения, что свидетельствует о наличии хорошей гидравлической связи между отдельными закарстованными зонами в мраморах и ограниченности питания бассейна подземных вод.

Если на тех или иных участках карьерного поля вследствие ослабления взаимосвязи обводненных зон или отсутствия хорошо проницаемых зон в мраморах глубинный дренаж описанного выше типа не дает требуемого осушительного эффекта, то можно провести местный дренаж открытым водоотливом из карьера. В этом случае при встрече зон повышенной обводненности дополнительное осушение забоев может быть достигнуто бурением неглубоких водопонижающих скважин с площадок уступов. Об этом свидетельствует опыт водопонижения на соседнем Шелейнском карьере, где закарстованные участки мраморов в северной и южной частях карьера изолированы: водопонижение успешно велось неглубокими скважинами, пробуренными в карстовые полости мраморов с низовых берм.

## Контрольные вопросы

1. Перечислите основные типичные ситуации, в которых дренаж пород помогает существенно увеличить общий угол борта карьера; приведите примеры противоположного характера.
2. В каких условиях дренаж способствует ограничению набухания глинистых пород? Приведите примеры противоположного характера.
3. Приведите примеры зависимости эффективности дренажа от принятых технологий и схемы открытых горных работ, от требований к качеству полезного ископаемого.
4. Сформулируйте основные требования к обоснованию систем дренажа карьеров. Дайте примеры возможной "обратной связи" между этими требованиями и обоснованием технологий горных работ.
5. Перечислите основные типы месторождений, осваиваемых открытым способом, по условиям дренажа; приведите примеры конкретных месторождений.
6. Дайте сопоставительный анализ эффективности систем водопонижающих скважин и подземных систем дренажа.
7. С чем вы связываете основные перспективы развития техники осушения на карьерах?

8. Чем в основном определяются критерии целесообразного осушения на месторождениях с горизонтальным залеганием водоносных пластов?

9. Как организуется приоткосный дренаж нерабочих уступов в водоносных песках? В каких условиях следует отдавать предпочтение заградительному дренажу?

10. По каким критериям определяется необходимая степень осушения рабочих откосов в водоносных песках? Как вы оцениваете возможности применения открытого дренажа? Каковы целесообразные условия применения водопонижающих скважин и подземных систем осушения?

11. Как зависит выбор схемы дренажа добычных уступов от гидродинамической характеристики продуктивного пласта и вмещающих пород, от принятой схемы горных работ?

12. К чему сводятся основные принципы дренажа на участке проходки разрезной траншеи? Как они изменяются при вскрытии месторождения средствами гидромеханизации?

13. В чем заключаются основные особенности осушения месторождений с наклонным залеганием водоносных пластов? Чем различаются требования к осушению пород лежащего и вышележащего боков?

14. Каковы главные ограничения на применение открытого дренажа карьеров, вскрывающих водоустойчивые скальные и полускальные породы? Приведите примеры эффективного локального дренажа таких пород.

15. В каких условиях организуется систематический дренаж основания отвала? Когда и какими средствами стимулируется осушение грунтов отвалов?

16. Определите принципиальные подходы к регулированию поверхностного и внутрикарьерного стока, к увязке его с системой дренажа карьера.

## ГЛАВА 3

# ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

---

### 3.1. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ

Месторождения вскрывают шахтными (чаще всего вертикальными) стволами и отходящими от них подготовительными (как правило, горизонтальными или пологонаклонными) выработками — квершлагами, штреками и т.п. В водоносных неустойчивых породах (пески) такие выработки обычно проходят с применением специальных способов (например, замораживание пород), после чего их обустраивают сплошной непроницаемой крепью, рассчитанной на соответствующее давление пород и воды. В устойчивых водоносных породах стволы обычно проходят с предварительным водопонижением или с тампонажем основных водопроводящих трещин и карстопроявлений<sup>1</sup>, однако проходка горизонтальных выработок часто сопровождается ощутимыми водопритоками в них.

---

<sup>1</sup> Допустимый максимальный приток в ствол  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$  при использовании специальной "щитовой" проходки может быть увеличен на порядок.

Выемка (добыча) полезного ископаемого обычно ведется различными системами: 1) очистных выработок с полным обрушением кровли, когда выработанное пространство по мере продвижения очистных забоев заполняется свободно или принудительно обрушающимися и оседающими вышележащими породами; 2) с закладкой выработанного пространства инертным, быстротвердеющим материалом; 3) камерно-столбовыми, когда между выработками (камерами) остаются целики полезного ископаемого, в той или иной мере предохраняющие от обрушения и оседания кровли.

Таким образом, первая из этих систем связана с максимальным нарушением пород кровли (в том числе и водоупорных, защищающих горные выработки от обводнения при прорывах воды из смежных горизонтов), вторая сводит такие нарушения к минимуму, а третья занимает в этом смысле промежуточное положение — в зависимости от параметров системы и податливости целиков. (Важно, однако, заметить, что даже весьма податливые целики, сложенные достаточно пластичными породами (например, солями), резко снижают отрицательные последствия деформаций пород кровли ввиду растянутости деформационных процессов во времени). Необходимо подчеркнуть, что выбор системы часто определяется гидрогеологической ситуацией, так как даже ограниченное поступление воды в добычные выработки, как правило, резко снижает их производительность. Предельная ситуация наблюдается на соляных рудниках, где даже малые начальные поступления пресных вод через водозащитные толщи соленосных пород могут приводить в конечном счете к катастрофическим последствиям.

В последнее время все шире внедряются бесшахтные — технологические — способы добычи полезных ископаемых, в которых вода часто является важнейшим элементом технологического цикла; наиболее характерный пример — добыча солей и некоторых руд (в частности, урановых) способом подземного выщелачивания с помощью скважин.

Рассмотрим основные задачи и виды гидрогеологических работ в связи с проходкой выработок различного назначения (см. разд. 5.4). При этом будем иметь в виду, что во всех случаях первоочередными вопросами являются прогнозирование возможности прорыва подземных вод и "плывунов" (см. разд. 3.5 и 4.2), в также обоснование соответствующих критериев и мер безопасности. Напомним, что в условиях подземных горных работ эта проблема более актуальна, чем при открытой разработке, по ряду причин, среди которых сравнительно малый объем водонеприемного пространства; большие градиенты фильтрации при поступлении воды в выработку и соответственно повышенная возможность проявления раздельнозернистыми породами "плывунных" свойств или прогрессирующего выноса заполнителя из трещин в твердых породах; частое сохранение высоких напоров в породах не только лежащих, но и висячего бока; возможность резкого роста проницаемо-

сти, а иногда и водообильности пород за счет техногенной трещиноватости.

Для шахтных стволов, обычно последовательно пересекающих ряд водоносных горизонтов (зон), выбор способа проходки в основном определяется характером пород (на участке заложения ствола, как правило, бурится опорная структурная скважина, проходимая с отбором керна) и ожидаемыми водопритоками, которые не должны превышать нормативных величин (см. выше).

При проходке с предварительным водопонижением, осуществляемым чаще всего кольцевой системой скважин, должно обеспечиваться опережающее (по отношению к заглубляемому забою) снижение напоров. Если ствол пересекает водоносный комплекс на полную мощность (до нижнего водоупора), то полное осушение забоя невозможно, поэтому важно, чтобы в момент пересечения водоупора притоки в ствол не превысили максимальных нормативных величин. С учетом указанных ограничений фильтрационными расчетами обосновываются параметры системы водопонижения: расход, число и время работы скважин и т.п.

При проходке с предварительным тампонажем осуществляется специальный комплекс гидрогеологических исследований, направленных на обоснование параметров тампонажной завесы, а затем на оценку ее качества. Главное место в этих исследованиях занимают опытные нагнетания воды в изолированные интервалы скважин с параллельной расходомерией.

Специфику гидрогеологических проблем, возникающих при проходке шахтных стволов с предварительным тампонажем вмещающих водоносных пород, можно рассмотреть на конкретном примере [6] строительства вентиляционного ствола № 1 шахты "Ждановская-Капитальная" (Донбасс). Проектная глубина ствола 615 м, диаметр в проходке 6 м.

Тампонаж ("водоподавление") заключается в создании на определенном участке водоносного горизонта (в нашем примере – вокруг шахтного ствола) относительно водонепроницаемой зоны. Эта цель достигается путем нагнетания в заданный интервал специального тампонажного раствора, который распространяется по трещинам и, загустевая в них, образует слабопроницаемую завесу, препятствующую обводнению ствола при его проходке. Схема такой завесы в плане показана на рис. 3.1.

На *стадии проектирования* анализ результатов геолого-гидрогеологической разведки позволил установить, что участок проходки ствола сложен преимущественно песчаниками, песчаными, песчано-глинистыми и глинистыми сланцами; в нижней части разреза присутствуют известняки. Подземные воды с высокими напорами (до 570 м над кровлей водоносных слоев) приурочены в основном к трещиноватым песчаникам и известнякам. Всего было выделено восемь водоносных горизонтов мощностью от 10 до 50 м. Именно они и подлежали тампонажу, поскольку расчетные водопритоки в ствол из отдельных горизонтов ожидалось в пределах от 3 до 48 м<sup>3</sup>/ч при суммарном максимальном значении до 165 м<sup>3</sup>/ч.

Данные о напорах использованы для определения давления при закачке тампонажного раствора. Для подбора тампонажного раствора, устойчивого к воздействию подземных вод, исследовался их химический состав, особенно агрессивность.

Одновременно тщательно изучалась трещиноватость водоносных пород в горных выработках соседних действующих шахт. В результате были получены пара-

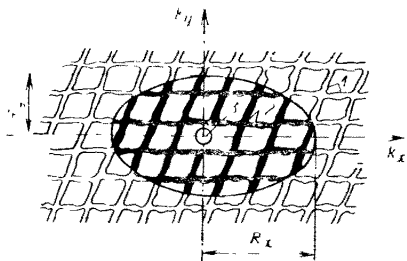


Рис. 3.1. Принципиальная схема гидроизоляционной завесы вокруг шахтного ствола в анизотропных трещиноватых породах [6]:

1 — основные системы трещин в плане; 2 — трещины, заполненные тампонажным раствором; 3 — шахтный ствол.  $k_x$  и  $k_y$  — проницаемость массива горных пород по основным направлениям трещиноватости;  $R_x$  и  $R_y$  — максимальный и минимальный размеры завесы,

$$R_y = \frac{k_y}{k_x} R_x$$

метры трещиноватости: элементы залегания основных систем трещин, густота и среднее раскрытие трещин, коэффициент трещинной анизотропии, представляющий собой отношение среднего раскрытия трещин второстепенной и основной систем [аналог коэффициента плановой анизотропии по водопроницаемости  $k_y/k_x$  (рис. 3.2)]. Данные о трещиноватости использованы для предварительных расчетов размеров и конфигурации тампонажной завесы, а также подлежащих закачке объемов тампонажного раствора.

На основе всех этих данных вблизи оси ствола было запроектировано и пройдено шесть разведочно-тампонажных скважин. До начала собственно тампонажных работ во всех скважинах были выполнены специальные гидрогеологические исследования: 1) расходометрический каротаж при трех различных режимах нагнетания воды в изолированные интервалы (в границах водоносных горизонтов), носившего кустовой характер: велись наблюдения за изменением уровней в тех же интервалах по соседним скважинам; 2) кратковременные неинтервальные откачки с последующими наблюдениями за восстановлением уровней воды.

Проведенные исследования позволили уточнить проницаемость, среднее раскрытие трещин, характер плановой анизотропии ( $k_y/k_x$ ), а также значения напоров и интервалы залегания водоносных горизонтов.

После *корректировочных расчетов* число тампонажных скважин оказалось возможным сократить с шести до четырех. В каждую из этих скважин (и в каждый интервал) был последовательно закачан расчетный объем тампонажного раствора. Схема формирования тампонажной завесы (в плане) на одном из горизонтов показана на рис. 3.2.

*Контроль качества тампонажных работ* осуществлялся по двум основным направлениям: 1) путем непрерывной (во времени) оценки проницаемости пород  $k$  в тампонируемых интервалах методом закачки в них чистой воды. Контрольным было условие  $k < k_{\min}$  (где  $k_{\min}$  — минимально допустимый для завесы коэффициент фильтрации, задаваемый из условия минимально допустимых водоприто-

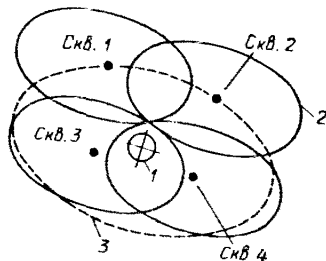


Рис. 3.2. Схема формирования изоляционной завесы (горизонт 502–608 м) вентиляционного ствола № 1 шахты "Ждановская-Капитальная" [6]:

1 — шахтный ствол; 2 — контур распространения тампонажного раствора от скважины; 3 — принятые границы завесы вокруг ствола ( $R_x = 31$  м;  $R_y = 19,7$  м)

ков); 2) непосредственными наблюдениями за формированием завесы по соседним скважинам.

Весь комплекс работ выполнялся параллельно с проходкой ствола в течение полугода. Суммарный остаточный приток воды в ствол составил всего  $1,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

При проходке с предварительным замораживанием пород гидрогеолог должен получить прогнозную оценку действительных скоростей фильтрационного потока на участке ствола (см. гл. 7), которыми определяется эффективность и возможность использования этого способа проходки. Если в дальнейшем на шахтном поле предполагается проведение интенсивного водоупонения, то должен быть дан прогноз ожидаемой осадки горных пород с целью учета ее в конструкции крепи ствола (см. разд. 1.1.2).

При создании субгоризонтальных *подготовительных и капитальных выработок* главным гидрогеологическим вопросом, наряду с эффективным дренажом, является предотвращение неожиданных прорывов подземных вод при пересечении забоем крутонадающих трещин и тектонических зон, участков с резко пониженной мощностью водоупорного защитного слоя (локальные "карманы" водоносных пород) и других аномальных участков<sup>1</sup>, которые трудно установить при бурении разведочных и контрольных скважин с поверхности. В этой связи важная роль отводится проходке горизонтальных или наклонных скважин, опережающих движущийся забой. Такие скважины выполняют и контрольную, и дренажную функцию: при необходимости их проходка может быть приостановлена до достижения требуемой степени сдренированности водообильной зоны. С этой целью бурят дополнительные скважины из самой выработки или с поверхности.

Специфические гидрогеологические задачи возникают при использовании нагнетанной воды в забоях подготовительных выработок для снижения удароопасности вскрываемых пластов (см. разд. 3.4).

При проходке *очистных (добычных) выработок* наиболее сложные вопросы возникают при полном обрушении кровли под водными объектами (см. разд. 3.2) или под обводненными толщами переслаивающихся песчано-глинистых пород, в которых могут возникать крупные обводненные полости вследствие процессов сдвижения (см. разд. 3.5). Наряду с использованием специальных способов проходки горных выработок их защита от подземных вод осуществляется дренажными мероприятиями (водопонижением), во многих случаях сочетающимися с ограниченным приемом воды самими горными выработками. Возможности последнего сильно ограничены (за исключением, конечно, специальных дренажных выработок); в частности, поступление воды непосредственно в рабочие забои чаще всего должно рассматриваться как неопор-

<sup>1</sup> Условия для возникновения прорывов могут создаваться и за счет гидрогеомеханических процессов, сопутствующих сдвигению горных пород над очистными выработками (см. разд. 3.5).

мальное явление. Соответственно иными оказываются и критерии целесообразности дренажа: если при открытых разработках пород вскрышной толщи часто исходят из допустимого притока в карьер, то при подземной разработке обычно ориентируются на допустимую величину напора  $H_d$ , отсчитываемого от защитного водоупорного слоя или (при его отсутствии) от контура выработки. Значение  $H_d$  определяют исходя из требований недопустимости прорыва через защитный водоупорный слой (см. разд. 1.2.3) или из полумпирических критериев безопасной и эффективной разработки, найденных опытно-эксплуатационным путем или по аналогии. В частных случаях отсутствия защитного водоупорного слоя иногда может ставиться и предельное условие  $H_d=0$ , что отвечает предварительному осушению пород по трассе горной выработки.

На практике применение приведенных критериев и оценки эффективности дренажа может сильно осложниться из-за изменения фильтрационных свойств пород над горными выработками в результате процессов сдвижения (см. разд. 3.2). Кроме того, для такого рода оценок характерен острый дефицит исходной информации. Это касается в первую очередь данных об упомянутых изменениях фильтрационных свойств, а также показателей профильной фильтрационной анизотропии: вблизи подземных горных выработок большую роль может играть вертикальная составляющая скорости<sup>1</sup>, определяемая вертикальной проницаемостью пород — показателем, обычно не оцениваемым при разведке месторождений.

Наконец, принципиально отличается и подход к выбору рациональных схем дренажа и водоотвода, что определяется рядом моментов:

1) ограниченность рабочего пространства, наряду с повышенной опасностью прорыва, требует повышенного запаса в мощностях дренажа и водоотлива, а часто и организации специальной системы водозащиты в самих горных выработках в виде быстро герметизируемых перемычек, способных при необходимости изолировать участок прорыва воды и плывуна от остальной части шахтного поля;

2) наличие разветвленной сети подземных горных выработок, как правило, делает технически и экономически оправданным ориентацию на подземный дренаж, для чего в условиях водообильных месторождений могут дополнительно проходить специальные дренажные выработки, гипсометрическое и плановое расположение которых обеспечивает сдренированность добычных и капитальных горных выработок;

3) для увеличения дренажного эффекта подземных выработок при одновременном снижении стоимости дренажа необходимо как можно шире использовать бурение из них (а не с поверхности!) дополнительных дренажных скважин — горизонтальных, наклонных, восстающих —

---

<sup>1</sup> В отличие от карьеров, вблизи которых фильтрация носит преимущественно плановый характер, так что учет вертикальной компоненты скорости требуется в сравнительно редких случаях.



большой длины (до 150 м и более), что технически вполне осуществимо;

4) водопонижающие скважины с поверхности следует использовать лишь для предварительного снижения напоров в строительный период, а также при необходимости эксплуатационного дренажа неглубоких (до 150 м) водоносных горизонтов в условиях значительно больших глубин разработки.

Рассмотрим специфику дренажных мероприятий при подземном способе разработки на примере осушения Южно-Белозерского железорудного месторождения [2]. Основные черты его геологического строения отражены на рис. 3.3. Гидрогеологические условия отработки здесь определяются наличием двух высоконапорных водоносных горизонтов — бучакского 5 и рудно-кристаллического 7. Первый приурочен к пескам со средней мощностью 15 м и коэффициентом фильтрации около 13 м/сут; второй связан с зоной повышенной трещиноватости докембрийских пород с невысокой водопроницаемостью; коэффициент фильтрации изменяется от сотых долей метра в сутки для сланцев и серпентинитов до 0,7 м/сут для кварцитов и железных руд. Исходные напоры достигали примерно 250 м над кровлей бучакских песков.

Месторождение отрабатывается подземным способом, камерной системой с закладкой выработанного пространства твердеющим материалом. Добычные работы были начаты на этаже  $-400 \div -480$  м с последующей отработкой верхнего этажа ( $-320 \div -400$  м).

Систематическое водопонижение на месторождении осуществлялось с момента его вскрытия, хотя шахтные стволы проходились с предварительным замораживанием водоносных пород, а подземные выработки на горизонтах  $-400$  и  $-480$  м были отделены от основного, бучакского, горизонта потолочиной из слабопроницаемых скальных пород мощностью 120–140 м. Тем не менее, проектом ставилось жесткое условие полного осушения бучакского и частичного осушения рудно-кристаллического водоносных горизонтов. Это мотивировалось как опасностью прорыва воды из этих горизонтов в добычные камеры, так и отсутствием опыта эксплуатации месторождений в таких гидрогеологических условиях. Сеть пройденных с поверхности водопонижающих скважин на бучакский горизонт постепенно наращивалась, так что производительность системы через 3,5 года эксплуатации превысила  $4000 \text{ м}^3/\text{ч}$  (рис. 3.4). На этом фоне притоки к водопонижающим скважинам на рудно-кристаллическую толщу 2, достигавшие временами  $700 \text{ м}^3/\text{ч}$ , играли подчиненную роль. Напоры в обоих горизонтах были снижены почти на 200 м.

Проходка горизонтальных подземных выработок (см. рис. 3.3) была начата после достижения максимума производительности дренажной системы скважин (см. рис. 3.4). В местах повышенных водопроявлений — вблизи рудного тела — из выработок дополнительно проходили горизонтальные и наклонные дренажные скважины (см. рис. 3.3) глубиной до 70 м, располагавшиеся в виде узлов (кустов) по 3–12 и более. Суммарный приток в подземные выработки (см. рис. 3.4, кривая Ж) постепенно нарастал и к десятому году от начала водопонижения достиг  $1400 \text{ м}^3/\text{ч}$ . К этому времени за счет перетекания значительной доли вод бучакского горизонта в рудно-кристаллический производительность скважин на бучакские пески снизилась до  $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Скважины, пройденные с поверхности на рудно-кристаллический горизонт, практически перестали функционировать из-за взаимодействия с подземными выработками. Попутно отмечалось перераспределение водопритоков и в пределах самих подземных выработок: так, при проходке более глубоких выработок горизонта — 480 м приток к ближайшим выработкам и скважинам на горизонте  $-400$  м существенно уменьшался, а иногда прекращался вообще.

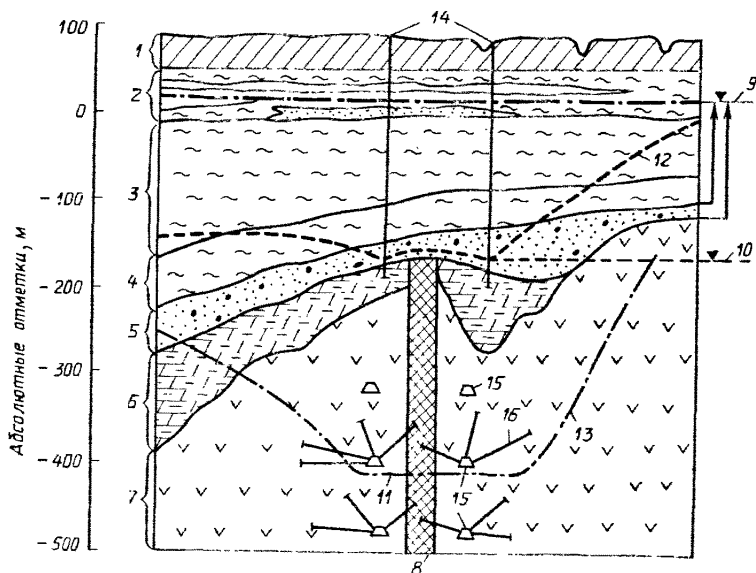


Рис. 3.3. Схематический геологический разрез района Южно-Белозерского желе-зородного месторождения и принципиальная схема дренажа в разрезе:

1 — глины, пески и суглинки четвертичного возраста ( $Q$ ); 2 — глины, мергелистые глины с прослоями известняков, мергелей и песков плиоцена ( $N_2$ ) и миоцена ( $N_1$ ); 3, 4 — глины, мергелистые глины с редкими прослоями песков харьковской ( $P_2ch$ ) и киевской ( $P_2ki$ ) свит; 5 — разнозернистые пески с мощными (до 15 м) прослоями глин буцакской свиты ( $P_2bu$ ); 6 — мелоподобные мергели с прослоями песков мелового возраста ( $K_{1-2}$ ); 7 — сланцы, метаморфизованные песчаники, серпентиниты, кварциты белозерской серии протерозоя (PR); 8 — железные руды; 9 — естественные пьезометрические уровни буцакского и рудно-кристаллического водоносного горизонтов; 10, 11 — сниженные за 10 лет дренирования уровни буцакского водоносного (в районе рудной залежи) и рудно-кристаллического горизонтов; 12, 13 — условные положения депрессионных поверхностей буцакского водоносного горизонта и рудно-кристаллического горизонта за пределами дренажного контура; 14 — водопонижающие скважины на буцакский водоносный горизонт (показаны условно); 15 — подземные горные выработки горизонтов — 320 м, — 400 м и — 480 м в рудно-кристаллической толще (показаны условно); 16 — дренажные скважины на рудно-кристаллический горизонт, пройденные из подземных выработок горизонтов — 400 м и — 480 м (показаны условно)

В результате активного подземного дренирования уровень воды в рудно-кристаллической толще 5 оторвался от уровня буцакского горизонта 4 в центральной части месторождения на 220–250 м (см. рис. 3.4). Поэтому дренажные скважины на буцакские пески постепенно отключались (см. рис. 3.4, кривая 1): осуществлялся переход исключительно на шахтный водоотлив (см. рис. 3.4, кривая 3). Производительность его позднее стабилизировалась на уровне около  $2000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что соответствовало текущим динамическим запасам буцакского и рудно-кристаллического водоносных горизонтов.

Рассмотренный пример подтверждает высокую эффективность дренажных мероприятий, приуроченных непосредственно к горным выработкам (большинство

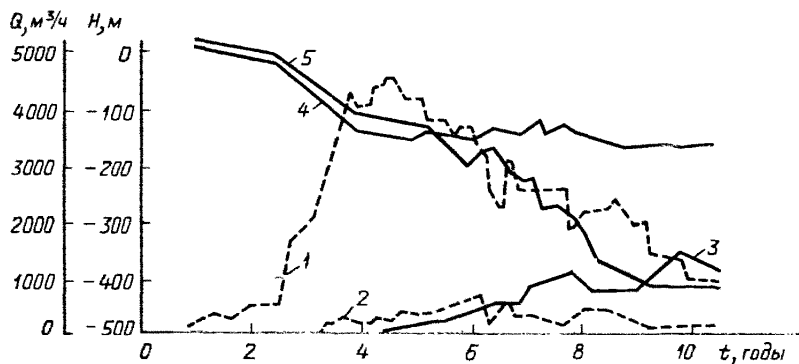


Рис. 3.4. Графики изменения водопритоков и напоров подземных вод при работе дренажной системы на Южно-Белозерском железорудном месторождении:

1, 2 — производительность  $Q$  систем водоупонижающих скважин соответственно на бучакский и рудно-кристаллический водоносные горизонты; 3 — приток в подземные горные выработки; 4, 5 — абсолютные отметки  $H$  уровней соответственно бучакского и рудно-кристаллического водоносных горизонтов

из отработанных камер оказались практически сухими). В данном случае дренажный эффект во многом был обусловлен наличием участков прямой гидравлической связи бучакского и рудно-кристаллического водоносных горизонтов: на таких участках водоупорные меломергельные породы 6 (см. рис. 3.3) в разрезе выклиниваются, образуя "гидрогеологические окна". Отсюда, кстати, понятно, насколько важную роль для проектирования эффективной системы дренажа при подземной разработке играет оценка вертикальной гидродинамической связи рудовмещающего комплекса с вышележащими комплексами; между тем, оценки такого рода при разведке месторождений, как правило, отсутствуют, поскольку они часто требуют проведения достаточно мощного и длительного водоупонения.

В заключение следует отметить, что при подземной разработке месторождений решение многих гидрогеологических задач исключительно тесно связано с решением инженерно-геологических проблем. Это обуславливает необходимость комплексного гидрогеомеханического [10] подхода к таким задачам.

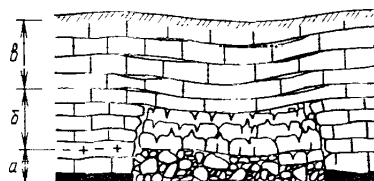
### 3.2. ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ВЫЕМКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ПОД ВОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Кровля, подошва и стенки выработок всегда смещаются в сторону выработанного пространства. Процесс такого смещения (сдвижения) сопровождается деформациями окружающих выработку пород. Характер деформаций определяется прежде всего размерами выработки,

Под водными объектами понимаются открытые водоемы на земной поверхности, поймы рек, мощные водоносные горизонты и затопленные выработки, угрожающие прорывом воды в горные выработки.

Рис. 3.5. Схематический разрез подработанной толщи осадочных горных пород.

Зоны: а — обрушения; б — трещин; в — прогиба



ступенью ее закладки, а также прочностью пород и материала закладки. Эти деформации приводят к возникновению в горных породах новых трещин и соответственно к увеличению их водопроницаемости. Наблюдения показывают, что трещины в подработанном массиве могут далеко уходить от кровли очистной выработки, пересекать все вышележащие водоупорные слои до границы водного объекта и вызывать приток в выработку в недопустимых по техническим условиям объемах. Для предупреждения этого нежелательного явления под водными объектами оставляют предохранительные целики, в которых консервируются громадные запасы полезных ископаемых.

Проблема выемки полезных ископаемых из таких целиков наиболее остро стоит на пластовых месторождениях с пологими углами падения, так как именно здесь потери полезных ископаемых в целиках наибольшие. Эти месторождения теперь по возможности разрабатывают длинными столбами с полным обрушением кровли и лишь в крайних случаях — с поддержанием кровли или с частичной закладкой выработанного пространства.

При обрушении или оседании кровли очистной выработки образование трещин в подработанном массиве горных пород прежде всего зависит от их физико-механических свойств и вынимаемой мощности пласта. Чем меньше относительные деформации, которые порода выдерживает без разрыва сплошности, и чем больше вынимаемая мощность полезного ископаемого, тем интенсивнее трещиноватость. При этом ближайшие к выработанному пространству слои обрушаются в беспорядке; мощность зоны беспорядочного обрушения (рис. 3.5) в твердых породах может в 3—4 раза превышать вынимаемую мощность пласта, но в достаточно пластичных мягких породах эта зона может вообще отсутствовать. Занимая после сдвижения больший объем, чем в естественном сложении, породы "зоны обрушения" поддерживают вышележащие слои и способствуют сохранению в них слоистой структуры. Нижняя группа этих слоев, в которых образуются дополнительные трещины расслоения, а также сквозные трещины, секущие слои перпендикулярно к напластованию, относятся ко второй зоне — "зоне трещин". Слои, залегающие над двумя первыми зонами, прогибаются без разрывов с образованием лишь трещин расслоения; они относятся к "зоне прогиба".

Трещины расслоения в плане могут измеряться десятками и сотнями метров. Ориентировочно их размеры могут быть определены из результатов наблюдений за сдвижением толщи. Расстояния между трещинами расслоения в подработанном

слоистом массиве уменьшаются с приближением к выработанному пространству и снижением прочности пород. Например, при выемке мощностью около 1,5 м и прочности пород на сжатие в образцах примерно 30 МПа расстояние между трещинами расслоения на высоте от 50 до 200 м над выработкой может изменяться соответственно от 5–6 до 10–12 м. Раскрытие этих трещин колеблется от нескольких до десятков миллиметров. Таким образом, трещины расслоения значительно увеличивают водопроницаемость вдоль слоистости.

Очевидно, что в зоне обрушения водопроницаемость будет практически неограниченной. В зоне трещин формируется комплекс водопроводящих полостей из новых и расширенных старых трещин, нормальных к напластованию, а также трещин расслоения. Благодаря этому проницаемость в зоне трещин увеличивается во много раз и устанавливается тесная гидравлическая связь всех слоев с зоной обрушения. В отличие от последней зона трещин обладает меньшей проницаемостью и ярко выраженной анизотропией.

Выше, в зоне прогиба, продольные деформации в слоях невелики и проницаемость по нормали к слоистости в них практически не отличается от естественной. Водоупорные образования здесь сравнительно надежно изолируют залегающие над ними водоносные слои. Так как градиенты напора между сдrenированными слоями зоны трещин и изолированными водоносными слоями зоны прогиба оказываются значительно большими, чем до их подработки, можно ожидать усиления перетекания из верхних слоев в нижние с соответствующим снижением напоров в верхних слоях. Практика, однако, показала, что в типичных угленосных толщах напоры в слоях зоны прогиба изменяются очень медленно и практически мало отличаются от естественных. Более того, если в пределах зоны трещин есть хотя бы один слой достаточно пластичных пород, способный выдержать возникающие здесь деформации без разрыва сплошности, то все расположенные над ними деформированные слои, независимо от степени их трещиноватости, не имеют тесной гидравлической связи с выработкой и практически не влияют на приток в нее. Участки слоев, гидравлически связанные между собой и с выработкой, вместе с зоной обрушения, называют зоной водопроводящих трещин (ЗВТ). Таким образом ЗВТ в общем случае не совпадает с зоной трещин.

Итак, можно разделить всю толщу подработанных слоистых пород на два комплекса: верхний, практически не имеющий гидравлической связи с выработкой, и нижний, имеющий такую связь. Определение границы между этими комплексами имеет большое практическое значение, так как позволяет, во-первых, найти глубину безопасной подработки водных объектов, а во-вторых, значительно повысить точность прогноза притока в лавы или шахты путем выделения из всей подработанной толщи только тех водоносных слоев, которые дренируются очистными выработками через ЗВТ. Этот момент следует особо подчеркнуть, поскольку до самого последнего времени в практике использовались расчетные схемы для оценки притоков в подземные очистные выработки

как в "глубокие ямы", вскрывающие все затронутые сдвижением слои. Такие расчетные схемы основаны на неправильном предположении, что за пределами целиков все водоупоры нарушены.

Точность оценки высоты и фильтрационного сопротивления ЗВТ прямо влияет на эффективность освоения месторождения, так как обоснованное снижение ее прогнозной высоты хотя бы на 5 м позволяет сократить потери промышленных руд и углей только на одном месторождении на сотни тысяч тонн.

Между тем, теоретически обоснованных количественных зависимостей между величинами деформаций в толще горных пород при сдвиге и трещиноватостью или проницаемостью до сих пор не получено. Поэтому самые надежные данные о высоте ЗВТ дают натурные гидрогеологические исследования в толщах, подработанных за пределами предохранительных целиков.

Все методы, используемые на практике для оценки высоты ЗВТ, можно разделить на гидродинамические и геофизические. К первым относятся наблюдения за напорами в открытых пьезометрах и за поровым давлением воды с помощью дистанционных малоинерционных манометров, сравнение удельных водопоглощений, расходометрический каротаж; ко вторым – сейсмическое прозвучивание и наблюдения за температурой подработанного массива.

Каждый из перечисленных методов характеризуется своими условиями применения и может быть использован как самостоятельно, так и в комплексе с другими. Оценка высоты ЗВТ на опытных участках над действующими очистными выработками проводится этими методами в период наиболее интенсивных деформаций в пределах максимальных искривлений подработанных слоев. Результаты таких натурных определений могут быть использованы для прогноза высоты ЗВТ на тех проектируемых участках горных работ, где горно-геологические условия идентичны условиям опытного участка.

*Метод наблюдений за напорами воды* в открытых пьезометрах основан на том, что при выемке пласта угля ближайшие к нему относительно водопроницаемые слои попадают в пределы ЗВТ, дренируются в выработанное пространство и напоры в них при этом существенно снижаются. Водоупорные слои, расположенные выше ЗВТ, остаются практически водонепроницаемыми, в водоносных слоях над ними сохраняется естественный режим. Следовательно, наблюдая за напорами водоносных горизонтов над выработанным пространством, можно определить высоту зоны трещин, сообщающихся с ним.

Для определения высоты ЗВТ с помощью открытых пьезометров последние устанавливаются на участке предстоящих очистных работ в нескольких водоносных слоях. При этом нижний пьезометр должен быть оборудован в водоносном слое, заведомо попадающем в ЗВТ, а самый верхний – в водоносном слое, заведомо сохраняющем естественный режим. Несколько пьезометров оборудуются в водоносных слоях, занимающих промежуточное положение; чем меньше расстояние между пьезометрами, тем выше точность определения высоты ЗВТ (рис. 3.6).

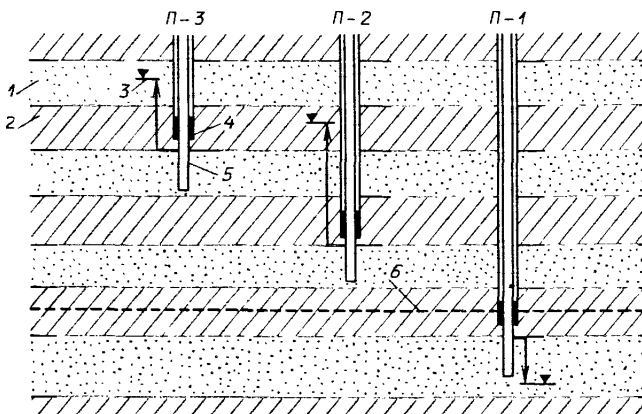


Рис. 3.6. Схема расположения пьезометров:

1 — наблюдаемые водоносные слои; 2 — водоупорные слои; 3 — уровень воды в интервале; 4 и 5 — изолированный и наблюдаемый интервалы скважины; 6 — верхняя граница зоны водопроводящих трещин. П-1 — пьезометр и его номер

Схематические графики изменения уровней в подрабатываемых пьезометрах показаны на рис. 3.7.

Достоинство метода — возможность реализации его простейшими средствами, недостаток — невозможность использования в слабопроницаемых (глинистых) породах.

Метод наблюдений за поровым давлением с помощью дистанционных малоинерционных манометров, устанавливаемых в скважинах, может быть применен в обводненных толщах с любой проницаемостью, но особенно эффективен он в массивах с низкой проницаемостью пород [2]. Метод основывается прежде всего на существенной разнице в скоростях снижения порового давления в ЗВТ и выше, которая хорошо проявляется как над очистной выработкой, так и над целиком. Поэтому наблюдения за изменениями порового давления для определения высоты ЗВТ можно вести и в стороне от участка интенсивных сдвижений, что предпочтительнее. Манометры (датчики порового давления) заранее располагаются в интервале возможного положения верхней границы

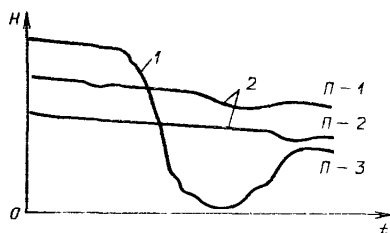
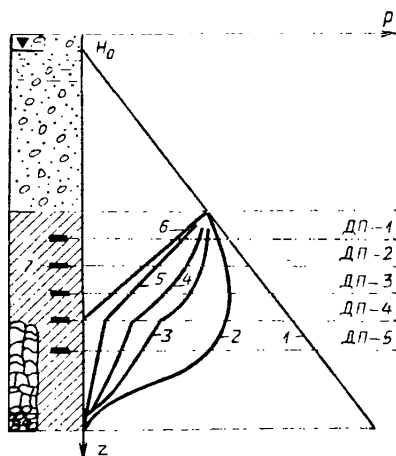


Рис. 3.7. Схематические графики изменения уровней в подрабатываемых пьезометрах:

1 — падение напоров в ЗВТ; 2 — временные изменения напора, вызванные образованием изолированных трещин расстояния

Рис. 3.8. Характерные графики изменения гидростатического (порового) давления в слабопроницаемых породах вблизи зоны водопроводящих трещин:

1-6 — графики  $p = f(z)$  на несколько последовательных моментов времени; 7 — датчик порового давления.  $p$  — давление;  $z$  — глубина;  $H_0$  — пьезометрический напор



ЗВТ. Расстояния по вертикали между манометрами, устанавливаемыми в виде "гирлянды" в изолированные интервалы скважины, выбирают исходя из требуемой точности определения положения этой границы. Одно из важнейших условий правильной установки манометров — обеспечение их хорошего гидравлического контакта с породой в стенках скважины и тщательная изоляция от них смежных интервалов скважины.

В массиве горных пород до начала проходки подготовительных выработок изменение давления  $p$  с глубиной (график 1 на рис. 3.8) приближенно выражается линейной зависимостью. После расширения сети подготовительных выработок картина снижения давлений в их кровле может быть весьма сложной, но по любой вертикали изменение давлений с глубиной будет иметь характер графика 2 (см. рис. 3.8). Чем больше разрыв по времени между подготовительными и очистными работами, тем ниже исходные давления на манометрах и соответственно менее ярко будет выявлена разница в скоростях их уменьшения в ЗВТ и над нею. В общем, чем выше давление воды над кровлей глинистых пород, тем больше и устойчивее величины исходных давлений на манометрах к моменту подхода к ним ЗВТ.

Исследования процесса снижения порового давления в подрабатываемом глинистом слое показали, что приближение ЗВТ к манометрам вызывает изменение давлений в точках их установки во времени соответственно графикам 3 — 5 на рис. 3.8. Переломы на таких графиках указывают на положение верхней границы ЗВТ. С течением времени изменение давлений на манометрах, расположенных в подработанном глинистом слое рядом с подработанным участком, будет стремиться к линейной зависимости, изображенной графиком 6.

Процесс уплотнения подработанной глинистой толщи сопровождается постепенным закрытием трещин, возникших при сдвигении, и повышением порового давления. Следовательно, продолжение наблюдений



за поровым давлением может дать важную информацию о сроках восстановления водоупорных свойств глинистых слоев и возможностях вторых подработок водного объекта.

Главное достоинство метода заключается в том, что он позволяет определять высоту ЗВТ в породах практически любой водопроницаемости и проводить длительные систематические наблюдения за изменением высоты этой зоны во времени. Основной недостаток — необходимость использования специальной аппаратуры.

*Метод сравнения удельных водопоглощений* основан на анализе результатов опытных нагнетаний воды в одни и те же слои или свиты слоев до и после их подработки и дает возможность оценивать высоту ЗВТ не только в обводненном, но и в полностью осушенном массиве, представленном чередованием относительно водопроницаемых и относительно водоупорных слоев [2].

Конечно, трещины, нормальные к напластованию, не всегда могут быть непосредственно встречены скважиной или иметь с нею гидравлическую связь. Однако скважина, последовательно пересекающая трещины расслоения, может реагировать на появление нормальных к слоистости трещин на значительных удалениях от нее. Поэтому опытные нагнетания следует проводить на участках наибольшего развития расслоений.

При анализе результатов опытных нагнетаний величина удельного водопоглощения слоя на непоработанном участке  $q_{ц}$  сравнивается с удельным водопоглощением этого же слоя после подработки  $q_{п}$ . Если опробуемый слой на подработанном участке окажется связанным с выработанным пространством или соседним, сдrenированным через нарушенный водоупор слоем, то  $q_{ц} < q_{п}$ .

Однако полученные величины удельных водопоглощений  $q_{ц}$  и  $q_{п}$  нельзя непосредственно сравнивать между собой, так как наличие в подработанном массиве трещин расслоения во много раз увеличивает водопроницаемость массива параллельно слоистости. В связи с этим водопоглощение изолированного интервала скважины при заданном напоре зависит не от радиуса скважины, как в непоработанном массиве, а от приведенного радиуса зоны распространения вскрытых трещин расслоения. Важно, что при движении воды к скважине по трещинам расслоения дополнительные потери напора в последних относительно невелики: например, для трещины радиусом 100 м с раскрытием 1 мм и шероховатостью 0,1 они составляют всего 2–3 м. Основные потери напора при этом отмечаются на небольшом расстоянии от скважины и практически мало зависят от ее положения на подработанном участке.

Допустив, что величина потерь напора в трещинах расслоения при опытных нагнетаниях пренебрежимо мала, поток к скважине, вскрывшей трещину расслоения, легко можно оценить на объемных моделях ЭГДА. Из результатов моделирования следует, что, если радиус трещины расслоения  $r_T$  больше мощности водоносного слоя  $m$ , то приток в скважину или отток из нее практически не зависят от радиуса скважины  $r_c$ . При  $r_T > 3m$  более 80 % воды поступает в скважину или уходит из нее через внешнюю краевую зону шириной не более 0,15  $r_T$ .

В таких условиях приток к трещине расслоения просто и достаточно надежно оценивается как для "большого колодца" с радиусом, равным радиусу трещины  $r_T$  [4]:

$$Q_c = 2,73 \frac{T[S_c - S(r)]}{\lg \frac{r + r_T}{r_T}} + C, \quad (3.1)$$

где  $T$  – проводимость;  $S_c$  – понижение в скважине;  $S(r)$  – понижение на расстоянии  $r$  от скважины;  $C$  – безразмерная величина, выражающая дополнительное фильтрационное сопротивление в искаженном трещиной расслоения потоке (по результатам моделирования потока к трещине расслоения, расположенной в центре слоя,  $C = 0,125 m/r_T$ ).

Таким образом, при сравнении удельных водопоглощений до и после подработки необходимо произвести их корректировку на увеличение водопоглощения за счет трещин расслоения согласно формуле (3.1). Если и после корректировки расчетное удельное водопоглощение в рассматриваемом интервале скважины на подработанном участке окажется заметно больше, чем до подработки, то данный интервал следует отнести к зоне водопроводящих трещин.

Основными достоинствами данного метода являются возможность определения высоты ЗВТ в сухих породах и получения количественных характеристик проницаемости пород исследуемой толщи. К недостаткам следует отнести необходимость использования двухколонных тампонов, применение которых ограничено глубиной около 150 м.

*Метод расходометрического каротажа* основан на возможности фиксировать скважинными расходомерами достаточно тонкие трещины, сообщающиеся с выработанным пространством и встреченные скважиной непосредственно или через трещины расслоения. Водоносные слои на подработанном участке, попадающие в ЗВТ, дренируются в выработанное пространство и, следовательно, должны резко поглощать воду из скважины. Напротив, слои, расположенные над ЗВТ и сохраняющие значительный напор, отдают воду в скважину. Водоносные слои, близкие к ЗВТ, потеряв незначительную часть напора, поглощают небольшие количества воды, поэтому на графике расходометрического каротажа (рис 3.9) фиксируются несколько участков водопоглощений из скважины: небольшие водопоглощения  $3$  вызываются обычно трещинами расслоения, не связанными с ЗВТ, а верхняя граница ЗВТ приурочена к участку первого резкого увеличения водопоглощения  $1$ .

Достоинство метода заключается в том, что он может применяться как в обводненных, так и в осушенных породах и по сравнению с другими методами требует значительно меньших затрат времени. Недостатком является необходимость использования специальной аппаратуры.

При использовании *метода сейсмического прозвучивания* ЗВТ отождествляется с зоной резкого снижения скоростей упругих волн в подработанном массиве на участках образования полых, сообщающихся с выработанным пространством трещин и осушенных пород. Упругие волны возбуждаются и принимаются в одних и тех же слоях на различных глубинах в скважинах, расположенных над целиками по разные стороны выработанного пространства, с помощью серийной сейсмоакустической аппаратуры. Глубина исследуемых интервалов скважин должна

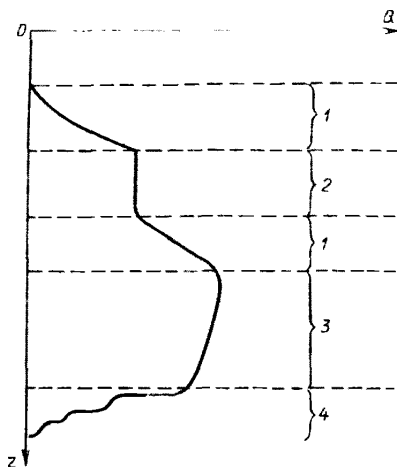


Рис. 3.9. Характерный график расходо-  
метрического каротажа скважины.

Участки: 1 – притока; 2 – непроницае-  
мый; 3 – умеренного водопоглоще-  
ния; 4 – сильного водопоглощения

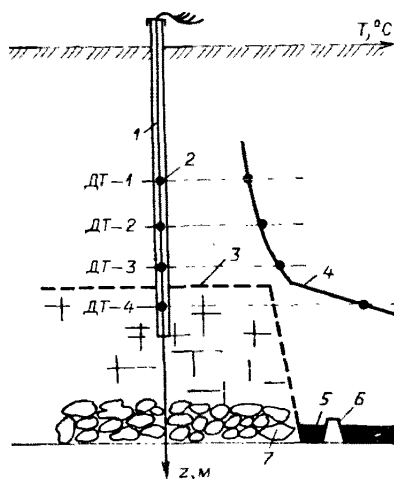


Рис. 3.10. Измерение температуры по-  
род в подработанном массиве "гир-  
ляндой" терморезисторов:

1 – скважина; 2 – терморезистор;  
3 – граница ЗВТ; 4 – график измене-  
ния температуры  $T$  пород с глубиной  
 $z$ ; 5 – пласт полезного ископаемого;  
6 – штрек; 7 – обрушенные породы

быть на 30–40 м больше предполагаемой глубины верхней границы ЗВТ. В слабых породах скважины могут быть обсажены, но обязательно заполнены водой или глинистым раствором.

*Метод наблюдений за температурами подработанных пород* заключается в том, что в ЗВТ из-за нарушения исходного режима фильтрации подземных вод и проникновения в трещины воздуха из выработки меняется естественный температурный режим.

Для проведения наблюдений за изменением температурного поля в подработанном массиве бурят скважину и заполняют ее тяжелым глинистым раствором. В скважину опускают заранее смонтированную "гирлянду" датчиков температуры, равноудаленных друг от друга. Глубину установки "гирлянды" выбирают с таким расчетом, чтобы несколько датчиков располагались в скважине ниже верхней границы зоны трещин, и несколько – выше. Затем замеряют температуру пород на глубинах установки датчиков.

Так как повышение температуры пород в ЗВТ в значительной мере обусловлено теплом, поступающим с воздушным потоком из выработки, то нередко верхнюю границу ЗВТ можно определить непосредственно по резкому увеличению с глубиной температуры пород в подработанном массиве (рис. 3.10).

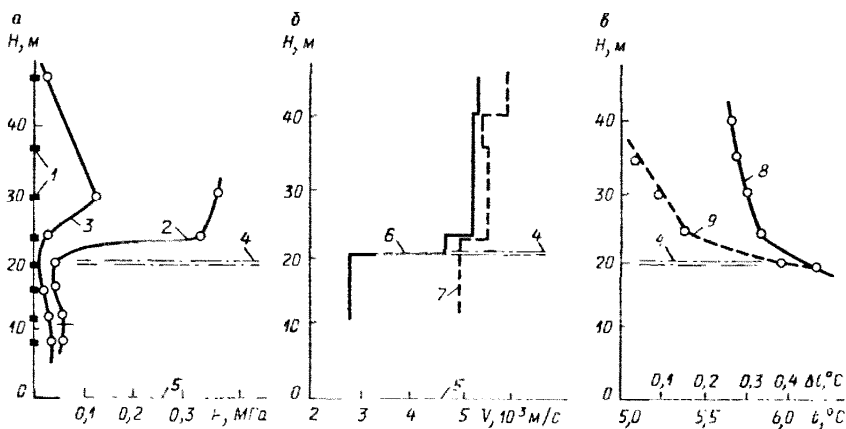


Рис. 3.11. Результаты комплексной оценки ЗВТ над лавами шахты Ленинградская (ПО "Ленинградсланец"), полученные с помощью наблюдений за поровым давлением (а), сейсмического прозвучивания (б) и измерений температуры пород (в):

1 – дистанционные манометры в скважине; 2, 3 – графики изменения порового давления, полученные с интервалом в месяц; 4 – верхняя граница ЗВТ; 5 – кровля пласта; 6, 7 – графики изменения скоростей упругих волн в кровле очистных выработок и над целиком; 8, 9 – графики изменения температуры пород и ее приращений.  $H$  – высота над выработанным пространством;  $p$  – поровое давление;  $v$  – скорость распространения упругих волн;  $t$  – температура пород;  $\Delta t$  – приращение температуры

Приведем характерный пример гидрогеологических исследований на конкретном объекте.

На шахте Ленинградская (ПО "Ленинградсланец"), разрабатывающей с обрушением кровли пласт горючего сланца на глубине 70–90 м от поверхности, проводились исследования для оценки высоты ЗВТ над лавами. При этом на опытном участке шахтного поля с выдержанными геологическим строением и технологией горных работ проводились наблюдения за поровым давлением воды в слоях кровли, измерения скорости упругих волн над выработанным пространством и температуры пород. Все измерения производились с интервалами по глубине около 5 м. Результаты исследований (рис. 3.11) показали, что высота ЗВТ на опытном участке по оценкам, полученным тремя различными методами, лежит в интервале 20–25 м.

На практике высоту ЗВТ обычно отождествляют с минимально допустимой глубиной горных работ под водными объектами. Однако с таким подходом в общем случае нельзя согласиться: критерием возможности ведения этих работ должны быть величины водопритоков в горные выработки, допустимые по техническим и экономическим соображениям. Понятно, что в особых случаях полезные ископаемые целесообразно разрабатывать под водными объектами и на глубинах, меньших, чем высота ЗВТ. Для обоснования проекта горных работ в этих условиях необходим надежный прогноз изменения водопроницаемости пород в ЗВТ по нормам к слоистости, что является достаточно сложной задачей, не поддающейся пока теоретическому решению. Поэтому изменение проницаемости пород в пределах ЗВТ исследовались на моделях из эквивалентных материалов. Модели имитировали слоистую толщу, сложенную как однородными, так и

ритмично чередующимися породами, различающимися по механическим свойствам. Исследованиями установлено, что в обоих случаях увеличение среднего значения коэффициента фильтрации по нормали к слоистости  $\Delta k$  для части подработанных слоев общей мощностью  $M$ , залегающих непосредственно над вынимаемым пластом, выражается зависимостью [10]

$$\Delta k = n \lg \frac{M_T - M_p}{M - M_p}, \quad (3.3)$$

где  $n$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от конкретных горно-геологических условий и имеющий размерность коэффициента фильтрации;  $M_T$  — высота ЗВТ;  $M_p$  — высота зоны беспорядочного обрушения.

По результатам натуральных определений водопроницаемости пород над очистными выработками Кузбасса, коэффициент  $n$  на участках активных смещений изменялся в основном от 0,3 до 0,6 м/сут. Есть все основания считать, что значение коэффициента  $n$ , или, другими словами, водопроницаемость пород в ЗВТ по нормали к напластованию, не постоянна во времени: она изменяется с различной интенсивностью, зависящей от физико-механических свойств пород. Изучение характера изменения проницаемости подработанной толщи во времени имеет большое значение для прогнозирования водопритоков в горные выработки при повторных подработках водных объектов.

В заключение отметим, что рассмотренные выше гидрогеологические приемы определения высоты ЗВТ — лишь один из примеров решения практических задач геомеханики путем использования воды как индикатора геомеханических процессов (например, деформаций в толщах горных пород).

### 3.3. ОСАДКА ТОЛЩ ГОРНЫХ ПОРОД В РЕЗУЛЬТАТЕ ГЛУБОКОГО ВОДОПониЖЕНИЯ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Сжатие горных пород под влиянием глубокого водопонижения (или нефтеотбора) достаточно давно изучается инженерами-геологами и нефтяниками, в первую очередь в связи с сопутствующим ему оседанием земной поверхности (см. разд. 1.1.1). Результаты исследований в этой области были сообщены на ряде международных симпозиумов, где, в частности, приводились многочисленные примеры осадок земной поверхности (штаты Калифорния и Техас (CUSA), города Мехико, Токио, Бангкок, Венеция и др.), измерявшихся метрами и вызывавших деформации наземных сооружений, заболачивание, наступление моря на сушу и другие нежелательные последствия. Рассмотрим влияние этого процесса на условия подземных горных работ, когда осадка толщи приводит к значительным деформациям крепи выработок [2].

Специфика изучения данного явления сводится прежде всего к необходимости дифференцированного прогноза величин деформаций по отдельным слоям (горизонтам) для определения требований к податливости крепи горных выработок. Другая важная особенность — необходимость прогнозирования скорости деформации, сведения о которой по-

звolyют наметить требуемое опережение водопонижения относительно проходки горных выработок: это дает возможность проектировать проходку и крепление выработок на период, когда основная доля деформаций сжатия окажется реализованной.

Один из наиболее интересных объектов, на котором детально исследовалось сжатие горных пород под влиянием глубокого водопонижения, – Белозерское железорудное месторождение [2, 10]. Снижение напоров в водоносных букачских песках (см. рис. 3.3) на 200 м привело здесь к сильному сжатию песчано-глинистой и мергельно-меловой толщ, залегающих на глубине около 300 м. Общая осадка составила к настоящему времени примерно 3 м. Сжатие толщи горных пород вызвало деформации крепи вертикальных стволов и потребовало разработки специальных конструктивных мероприятий (установления в стволах узлов податливости).

Механизм сжатия пород в результате водопонижения достаточно ясен: снижение напоров при практически неизменном общем давлении приводит к росту эффективных напряжений и уменьшению пористости пород (см. разд. 1.1.1).

Заметим, что в более точной трактовке осадка соответствует разности между сжатием скелета под влиянием дополнительных эффективных напряжений и упругим расширением минеральных зерен при снижении гидростатического давления.

На первых стадиях процесс осадки контролируется фильтрационными свойствами пород – скоростью рассеивания избыточного порового давления [на заключительных стадиях имеет место вторичная консолидация, обусловленная ползучестью минерального скелета (см. разд. 1.1.5)]. Следует отметить, что применительно к этому процессу термин "фильтрационная консолидация" может быть использован лишь с определенной долей условности, поскольку здесь нет избыточного порового давления, вызванного ростом общей нагрузки, а процесс идет при практически неизменной общей нагрузке и постепенном падении исходного гидростатического давления по мере распространения упругой фильтрационной волны от водоносного горизонта в глубь толщи относительно водоупорных пород.

В этом случае приходится определять проницаемость пород с весьма низкими коэффициентами фильтрации (иногда порядка  $10^{-5}$  –  $10^{-6}$  м/сут), причем эксперименты должны проводиться при высоких (природных) гидростатических давлениях (поскольку можно считать установленной существенную зависимость проницаемости глин от абсолютной величины давления), и учитывать необходимость определения величины начального градиента фильтрации [7]. Так, для глинистых пород киевской свиты (см. рис. 3.3) Белозерского месторождения лабораторными экспериментами была получена величина начального градиента порядка 70–80; эта величина в дальнейшем подтвердилась результатами наблюдений по глубинным радиоактивным реперам, которые зафиксировали деформации сжатия 30-метровой толщи глин лишь в ограниченной 5-метровой зоне, прилегающей к водоносному горизонту (при среднем градиенте по всей толще порядка 5). Таким образом, отсутствие сведений о начальном градиенте может привести к завышению мощности сжимаемой толщи и, следовательно, величины ожидаемой осадки.

Если к сказанному добавить неизбежное влияние трещиноватости и фильтрационной макroneоднородности толщи плотных глинистых пород, которое нередко приводит к полному несоответствию результатов лабораторных испытаний и натурных наблюдений, то становится ясным, что надежный прогноз фильтрационной консолидации подчас невозможен без контрольных полевых экспериментов. Для важных объектов таким экспериментом должно быть опытное или опытно-эксплуатационное водопонижение, проводимое при наличии послойно установленных

глубинных (в частности, радиоактивных) реперов и датчиков порового давления. Результаты подобного эксперимента дадут возможность наиболее надежно прогнозировать скорость сжатия и устанавливать требуемое опережение водоопонижения относительно горных работ, а в ряде случаев – для аномально недоуплотненных глинистых пород – оценивать возможные пределы направленного улучшения свойств (предварительного уплотнения) пород.

Рассматриваемое явление прекрасно иллюстрирует взаимодействие и взаимопроникновение методов инженерно-геологических исследований, с одной стороны, и гидрогеологических, с другой. Это положение подтверждается и анализом другого практического аспекта рассматриваемого вопроса, связанного с оценкой объемов воды, поступающей в водоносные горизонты при сжатии относительно водоупорных пород.

В качестве примера рассмотрим Южно-Белозерское месторождение. Здесь основной водоносный горизонт приурочен к бучакским пескам. Средняя проводимость его порядка  $250 \text{ м}^2/\text{сут}$ , мощность около 15 м. Коэффициент сжимаемости песков был определен с высокой точностью по наблюдениям за осадкой с помощью глубинных радиоактивных реперов:  $a_{\text{сп}} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}$ . Учитывая, что коэффициент пористости песков  $\epsilon = 0,74$ , рассчитаем упругую водоотдачу бучакского горизонта [7]:

$$\mu_6^* \approx \frac{a_{\text{сп}} m}{(1 + \epsilon) \gamma_0} \approx 4 \cdot 10^{-4}.$$

Отсюда коэффициент пьезопроводности  $a_6^*$  бучакского водоносного горизонта должен быть приблизительно равен  $6 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Близкая величина коэффициента пьезопроводности была получена и при обработке результатов длительной (45 сут) кустовой откачки, проводившейся при разведке месторождения. Между тем определение коэффициента пьезопроводности по результатам опытно-эксплуатационного водоопонижения дает величину порядка  $4 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Величина упругой водоотдачи, полученная из отношения общего объема воды, откачанной водоопонительной установкой, к объему образовавшейся при этом депрессии, оказалась примерно равной  $6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{сут}$ . Эти данные свидетельствуют о том, что водообильность бучакского водоносного горизонта определяется не только упругими запасами самих бучакских песков, но и какими-то дополнительными источниками питания. Возможность перетекания из вышележащих пород в данном случае полностью исключается, поскольку области выхода бучакских песков на поверхность располагались за пределами пьезометрической воронки (во всяком случае, в первые годы опытно-эксплуатационного водоопонижения), а упругие запасы нижележащего рудно-кристаллического водоносного горизонта значительно меньше, чем упругие запасы песков. Поэтому единственным источником питания, способным существенно изменить баланс расходов, могут быть слабопроницаемые пласты, граничащие с бучакскими песками.

За нижний водоупор бучакского водоносного горизонта при проектировании осушения принималась толща мергельно-меловых пород средней мощностью порядка 30 м (см. рис. 3.3). Как уже отмечалось, при понижении уровня в бучакских песках эта толща испытывает интенсивное сжатие. Исследования и наблюдения показывают, что основная осадка меловых пород проходит с относительно небольшим отставанием (порядка 10–20 сут) от снижения уровня бучакского горизонта. Учитывая, что опытно-эксплуатационное водоопонижение длится годами, можно приближенно считать, что вода из меловой толщи отжимается практически одновременно с приложением депрессионной нагрузки.

Так как коэффициент сжимаемости мела составляет примерно  $3 \cdot 10^{-4}$  МПа, а коэффициент пористости равен 0,72, то упругая водоотдача пласта мелов примерно равна  $6 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/сут. Отсюда получаем коэффициент пьезопроводности бучакского горизонта, учитывающий сжимаемость меловой толщи:  $a^*_{\text{бм}} \approx 4 \cdot 10^4$  м<sup>2</sup>/сут (при  $T_6 = 250$  м<sup>2</sup>/сут). Эта величина, близкая к действительному (эффективному) значению коэффициента пьезопроводности, на порядок меньше величины, подсчитанной без учета сжимаемости меловых пород. Следовательно, из 2–3 тыс. м<sup>3</sup> воды, откачивавшейся ежесекундно дренажной системой Южно-Белозерского месторождения, основная доля была обусловлена упругими запасами относительно водоупорных толщ.

Таким образом, упругий режим пластовых водонапорных систем с учетом срабатываемых упругих запасов глинистых "водоупоров" имеет гораздо большее практическое значение, чем то, которое ему придется в настоящее время.

### 3.4. БОРЬБА С ГОРНЫМИ УДАРАМИ НАГНЕТАНИЕМ ВОДЫ В УГОЛЬНЫЕ ПЛАСТЫ

Рассмотрим использование искусственно создаваемого гидростатического давления и увлажнения для борьбы с горными ударами. Известно, что вследствие концентрации напряжений вблизи горной выработки возникает зона так называемого опорного давления, заметно превышающего давление вышележащих пород  $\sigma_z = \gamma_n M$  (рис. 3.12). В результате породы перед забоем выработки испытывают действие дополнительных сжимающих напряжений. Если деформации пород в призабойной зоне, приводящие к постепенной релаксации напряжений, "не успевают" за ростом напряжений, то потенциальная энергия упругого сжатия горных пород резко возрастает и может реализоваться в виде мгновенной скачкообразной (нередко катастрофической) деформации – горного удара.

Одна из наиболее распространенных мер по предотвращению горных ударов в угольных пластах – нагнетание воды в пласт через опережающие скважины под высоким давлением. При этом желательно, чтобы давление нагнетания в данной точке приближалось к горному давлению, но оставалось ниже его – во избежание гидроразрыва пласта, после которого нагнетаемая вода обычно начинает поступать в выработку и давление нагнетания резко падает. При качественно проведенном нагнетании трещины расширяются, проницаемость углей заметно возрастает, а зона распространения воды по трещинам измеряется метрами и десятками метров (за несколько часов). Если скважина пересекает зону максимума опорного (эффективного) давления, то последнее может быть заметно понижено нагнетанием вследствие повышения гидростатического (нейтрального) давления на стенки трещин. В результате соответствующего уменьшения сил трения в породе происходят мик-

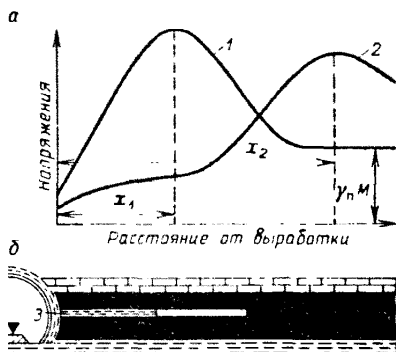


Рис. 3.12. Перераспределение напряжений при нагнетании воды в пласт:

*a* – график напряжений; *б* – разрез угольного пласта. 1 – до нагнетания; 2 – после нагнетания; 3 – скважина



роподвижки по трещинам, так что к концу нагнетания опорное давление из-за релаксации напряжений оказывается заметно сниженным, а максимум его отодвигается в глубь массива (см. рис. 3.12). Этому в не меньшей мере способствует и увеличение пластичности углей в результате водонасыщения. Ито, и другое приводит к резкому снижению опасности горного удара, что хорошо подтверждается, например, опытом эксплуатации Ткибульского месторождения [2].

Уголь на этом месторождении характеризуется значительной пористостью (15–16 %) и средней степенью насыщения пор водой (0,5 – 0,6). Не занятый водой объем порового пространства заполнен газом, в основном метаном. Таким образом, угли Ткибульского месторождения являются типичной трехфазной средой. Интенсивно развитая трещиноватость и достаточно большое значение дефицита водонасыщения пористых блоков ( $\mu_6 = 0,08 - 0,09$ ) определяют их высокую потенциальную способность к дополнительному насыщению водой.

Исследования показали, что значительное снижение способности угля к упругому деформированию и связанный с этим переход массива из удароопасного состояния (после его принудительного увлажнения) в неудароопасное примерно совпадают по времени с достижением полного водонасыщения угля, точнее – с заполнением водой всех тех его пор, которые доступны для проникновения воды под действием гидродинамических сил, обусловленных давлением нагнетания. Отсюда вытекает необходимость предварительного расчета размеров эффективно увлажненных зон в угольном пласте при нагнетании в него воды. При решении этой задачи следует учитывать, что фильтрация воды в угольном пласте осложняется рядом особенностей, главными из которых являются трещиновато-пористый характер пород, наличие газа в угле и неполное его водонасыщение, гидрогеологическое расчленение угольного массива вблизи скважины при нагнетании в нее воды, фильтрационная анизотропия угольных пластов и сложное напряженное состояние угольного массива. Основные гидрогеологические параметры угольных пластов должны, естественно, определяться с учетом этих особенностей. К числу таких параметров относятся водопроницаемость (коэффициент фильтрации) пористых блоков угля  $k_6$  (поровая проницаемость), коэффициент упругости угля  $\eta^*$ , водопроницаемость угольного пласта по трещинам  $k_{тр}$  (трещинная водопроницаемость), а также активная трещинная пустотность  $d$ .

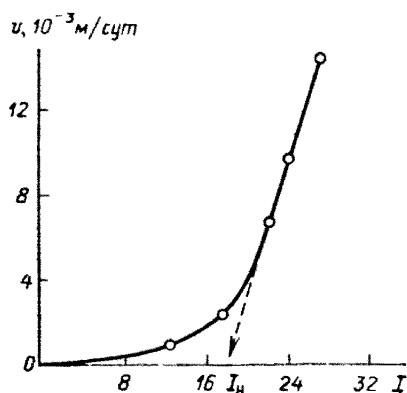
Поровая проницаемость и коэффициент упругости определялись в лабораторных условиях на образцах угля с естественной влажностью. Давление на образец доводилось до величины, примерно соответствующей естественному горному давлению на той глубине, с которой он отобран (около 600 м). Результаты компрессионных испытаний использовались для оценки упругих свойств угля.

Фильтрация воды через нагруженный образец осуществлялась при различных градиентах напора. Результаты экспериментов, представленные на рис. 3.13, показывают, что фильтрация воды через пористые блоки угля носит нелинейный характер, но может быть аппроксимирована законом Дарси с введением начального градиента напора  $I_H$ . Заметим, что величина  $I_H$  почти не зависит от направления фильтрации (по напластованию или нормально к слоистости). Ее находят графически (см. пунктирную стрелку на рис. 3.13); для рассматриваемых условий  $I_H$  составляет 18–20. Реальные градиенты напора в области влияния нагнетательной скважины на один – три порядка превышают величину  $I_H$ , что позволяет пренебречь нелинейностью зависимости  $v = f(I)$  и использовать во всех дальнейших построениях коэффициент фильтрации пористых блоков угля, определенный по формуле

$$v = k_6(I - I_H). \quad (3.4)$$

По этой формуле получено  $k_6 = (1,1 - 1,5) \cdot 10^{-3}$  м/сут, причем пористые блоки угля практически изотропны в фильтрационном отношении.

Рис. 3.13. Зависимость скорости фильтрации  $v$  от градиента напора  $I$  для образцов каменного угля (Ткибульское месторождение)



При нагнетании в пласт воды под высоким давлением в нем формируется некоторый упругий запас (за счет общей декомпрессии угольного пласта и сжимаемости воды). Количественная оценка этих запасов показала, что они, по крайней мере, на два порядка ниже естественного дефицита насыщения угольных пластов ( $\mu_6 = 8-9\%$ ). Отсюда следует важный вывод: упругоемкостью угля, в сравнении с недостатком насыщения, можно пренебречь.

Трещинная проницаемость и активная трещинная пустотность угольных пластов могут определяться только *in situ* по результатам специальных шахтных экспериментов — опытных кустовых нагнетаний воды в пласт, аналогичных кустовым откачкам из водоносных горизонтов. Давление нагнетания не должно превышать некоторого критического значения, при котором происходит полный гидроразрыв пласта (с интенсивным выходом воды на забой выработки). Эти критические значения определяют экспериментально в каждом конкретном случае; на Ткибульском месторождении они составляют 6–9 МПа для надработанных (частично разгруженных от горного давления) пластов и 20–25 МПа для ненадработанных.

Для определения момента полного насыщения угля между скважинами опытного куста использовался специальный метод, основанный на измерении кажущегося электрического сопротивления  $R_{эф}$  или кажущейся силы тока  $I_{эф}$  заранее выбранного участка угольного пласта (например, между двумя любыми скважинами опытного куста). Время полного насыщения  $t_{нас}$  такого участка устанавливается по моменту стабилизации в его пределах электрической проводимости угля, что отвечает минимальному значению  $R_{эф}$  или максимальному значению  $I_{эф}$ .

Нагнетание должно быть непрерывным и достаточно продолжительным; чтобы все наблюдательные скважины оказались в полностью насыщенной водой зоне. В пределах этой зоны вся вода проходит только через трещины (блоки угля уже насыщены водой), свободный газ в фильтрационном объеме трещин отсутствует, а деформации скелета угля практически стабилизируются. Иными словами, исключается влияние ряда факторов, осложняющих процесс фильтрации воды в угле, и для определения трещинной водопроницаемости угольного пласта можно с достаточной для практических целей точностью использовать известные формулы гидродинамики квазистационарных процессов.

При опытах следует иметь в виду фильтрационную анизотропию угольных пластов. Для условий Ткибульского месторождения анизотропия оценивалась путем сравнения удельных водопоглощений в начальный период нагнетаний по скважинам, различно ориентированным относительно пластов. Оказалось, что проницаемость угольных пластов вдоль напластования в 10–20 раз выше, чем в направлении, перпендикулярном к слоистости. Пористые блоки угля изотропны в фильтрационном отношении, а это означает, что основными водопроводящими путями

являются трещины напластования. Поэтому трещинную водопроницаемость угольных пластов наиболее просто и точно можно определить по результатам опытных нагнетаний воды в скважины, нормальные к напластованию. В этом случае пласт условно рассматривается как линейно-изотропная среда, а движение воды в ней считается плоским осесимметричным. Коэффициент фильтрации  $k_{тр}$  при такой схеме расположения скважин рассчитывают по формуле Дюпюи или по логарифмической аппроксимации формулы Тейса. Последняя использовалась также для определения  $k_{тр}$  по результатам наблюдений за снижением напоров в скважинах после окончания опыта. В результате проведения кустовых нагнетаний во все рабочие пласты Ткибульского месторождения для них были получены средние значения  $k_{тр}=0,05-0,1$  м/сут.

Перейдем теперь к оценке активной трещинной пустотности угольных пластов  $n$ . При фильтрации в число трещиноватых (первоначально сухих) породах справедливо балансовое равенство

$$R_{тр}(t) = \sqrt{Q_c t / (\pi m n)}, \quad (3.5)$$

где  $R_{тр}(t)$  — радиус зоны увлажнения;  $Q_c$  — постоянный расход воды при нагнетании;  $m$  — мощность пласта.

Следовательно, до тех пор, пока зависимость  $R_{тр}(t) = f(\sqrt{t})$  прямолинейна, основной объем воды при нагнетании движется только по трещинам без существенных потерь на насыщение пористых блоков. На основе опытных данных построены графики зависимости  $R_{тр}(t) = f(\sqrt{t})$  (рис. 3.14) и по их начальным участкам определены значения  $n$  порядка 0,001.

Сопоставим между собой экспериментально полученные гидрогеологические параметры угольных пластов;  $k_6=10^{-3}$  м/сут;  $k_{тр}=0,05-0,1$  м/сут;  $\mu_6=8-9\%$ ;  $n=0,1\%$ . Эти данные со всей очевидностью подтверждают справедливость гипотезы о трещиновато-пористом характере угольного пласта как фильтрующей среды. В окончательном виде это положение можно сформулировать следующим образом: угольный пласт в фильтрационном отношении следует рассматривать как частный (предельный) случай среды с двойной пористостью, т.е. среды, проницаемость которой определяется проницаемостью трещин ( $k_{тр} \gg k_6$ ), а емкостные свойства — недостатком насыщения пористых блоков угля ( $\mu_6 \gg n$ ), являющихся основным аккумулятором закачиваемой в пласт воды.

Двойной характер пористости и неполное насыщение угля водой — основные особенности угольных пластов как фильтрующей среды, в наибольшей степени затрудняющие получение строгих аналитических решений даже для простейших схем фильтрации. Поэтому количественный анализ процесса проводился путем аналогового электромоделирования по схеме Либмана [7]; его основные результаты представлены на рис. 3.15. В начальный период  $t_0$  нагнетания (в данном случае в течение

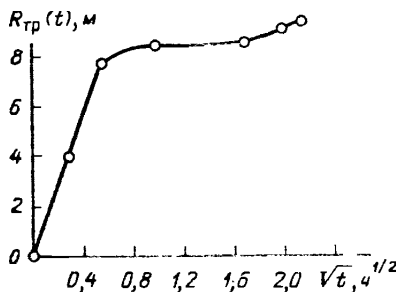


Рис. 3.14. Зависимость радиуса обводнения угольного пласта по трещинам  $R_{тр}(t)$  от радикала времени  $t$  по данным опытного кустового нагнетания воды в пласт III Ткибульского месторождения

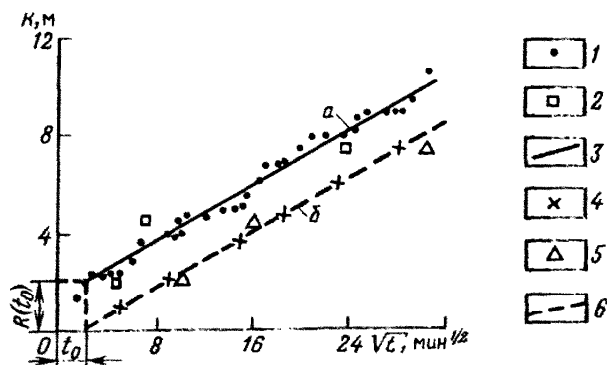


Рис. 3.15. Характер обводнения пласта при нагнетании в него воды:

$a$  – радиус обводнения по трещинам  $R_{тр}(t)$ ;  $б$  – радиус полного обводнения массива (по блокам)  $R_{бл}(t)$ .  
 1 – модель; 2 – эксперимент; 3 – по формуле (3.6); 4 – модель; 5 – эксперимент; 6 – по формуле (3.5)

примерно 5 мин) весь объем закачиваемой в пласт воды движется только по трещинам. В дальнейшем начинается процесс насыщения пористых блоков угля и, наряду с границей обводненности по трещинам  $R_{тр}(t)$ , появляется вторая движущаяся граница – контур полного насыщения блоков  $R_{бл}(t)$ . Между этими границами находится переходная зона неполного насыщения угольного пласта водой.

Сравнение полученных при моделировании величин  $R_{тр}(t)$  и  $R_{бл}(t)$  с замеренными в натуре позволяет говорить об их вполне удовлетворительном совпадении (см. рис. 3.15). То же самое можно сказать и о напорах как в центральной скважине, так и во всей насыщенной водой зоне пласта. Таким образом, результаты моделирования (как и данные экспериментов по определению гидрогеологических параметров) полностью подтверждают представление об угольном пласте как о среде с двойной пористостью. Тем самым решается важнейшая часть задачи – определение размеров эффективно увлажненных зон  $R_{бл}(t)$ , в пределах которых гарантируется ударобезопасное состояние угольного пласта.

На практике можно пренебречь объемом воды, затрачиваемым на насыщение трещин (так как  $n \ll \mu_б$ ), и полагать, что вся вода расходуется на насыщение порового пространства угольного пласта. В таком случае, используя принцип поршневого вытеснения водой газа (воздуха) из фильтрационного объема пор, на базе простого балансового соотношения получим:

$$R_{бл}(t) = (\sqrt{t} - \sqrt{t_0}) \sqrt{Q_c / (\pi m \mu_б)} \quad (3.6)$$

$$R_{тр}(t) = R(t_0) + (\sqrt{t} - \sqrt{t_0}) \sqrt{Q_c / (\pi m \mu_б)} \quad (3.7)$$

Результаты расчетов по этим формулам, как видно из рис. 3.15, также хорошо согласуются с результатами моделирования и эксперимента (при  $Q_c = \text{const}$ ).

Определение величины  $R_{тр}(t)$  обычно необходимо в тех случаях, когда обрабатываемый нагнетанием участок пласта изрезан выработками и существует опасность быстрого проникновения воды по трещинам в область дренирования (выработанное пространство, зона крутого тектонического нарушения, другие эксплуатационные выработки и т.п.). Кроме того, для некоторых угольных пластов со значительными расстояниями между крупными фильтрующими трещинами  $m_б$  и низкой проницаемостью блоков  $k_б$  переходная зона  $R(t_0)$  (см. рис. 3.15) может

достигнуть значительных размеров (до 8 м), а стадия полного насыщения пористых блоков нередко совсем не наступает.

Именно из-за низкой проницаемости (пористости) многих угольных пластов, когда слишком велико значение  $R(t_0)$ , не удается добиться полного водонасыщения пористых блоков ( $R_6(t) = 0$  или очень мало), что ограничивает область применения предварительного увлажнения угольных пластов. Экспериментальные исследования показали, что увлажнение как мера предупреждения горных ударов наиболее эффективно в неполностью водонасыщенных угольных пластах с пористостью угля от 3 до 24 %.

### 3.5. ИССЛЕДОВАНИЯ ОПАСНОСТИ ПРОРЫВОВ ИЗ ПОДРАБОТАННЫХ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Оценка возможности прорывов воды или водопородной смеси в горные выработки обычно предполагает только учет прямой связи горных выработок с существующими аккумуляторами воды или стимулирования такой связи фильтрационными деформациями и нарушениями сплошности экранирующих пород при естественных гидростатическом и горном давлениях (см. разд. 3.2). Вместе с тем, при выемке пластов полезных ископаемых в толще песчано-глинистых пород с полным или частичным обрушением кровли очистных выработок, прорывы могут быть связаны и с более сложными гидрогеомеханическими процессами непосредственно в подработанном массиве, "наведенными" сдвижением<sup>1</sup>; среди них:

1) прорывы воды и породы из водопроницаемых слоев, в которых под влиянием опорного давления развиваются повышенные напоры, приводящие к нарушению равновесия водоупорных экранирующих пород или к их гидроразрыву;

2) прорывы из различных аккумуляторов воды по водопроводящим трещинам (см. разд. 3.2), осложненные разрывом пород и выносом рыхлого материала вдоль таких трещин;

3) прорывы воды из полостей расслоения над выработанным пространством.

Прорывы *первого типа* связаны с разрушением водоупорных пород между выработкой и водоносным слоем с повышенным давлением воды, которое возникает при ее отжатии из пористых пород, уплотняющихся в зонах опорного давления. Интенсивность роста давления воды при этом тем больше, чем меньше проницаемость окружающих пород и протяженность водоносного слоя в плане; оно может возрасти до величины опорного давления и даже превышать ее (рис. 3.16), что создает угрозу нарушения устойчивости или гидроразрыва разделяющего водоупора поперек слоистости. В результате пески или слабые песчаники (скелет которых легко разрушается в зоне опорного давления) прорываются подобно вязкой жидкости в кровле или почве подготовительных выработок на участках с недостаточной прочностью экранирующих слоев. Наиболее вероятны такие прорывы из линз пористых песков, окруженных слабопроницаемыми глинистыми породами, при естественном или техногенном ухудшении экранирующих свойств последних (см. рис. 3.16).

<sup>1</sup> Помимо рассмотренных в разд. 3.2 процессов техногенного трещинообразования.

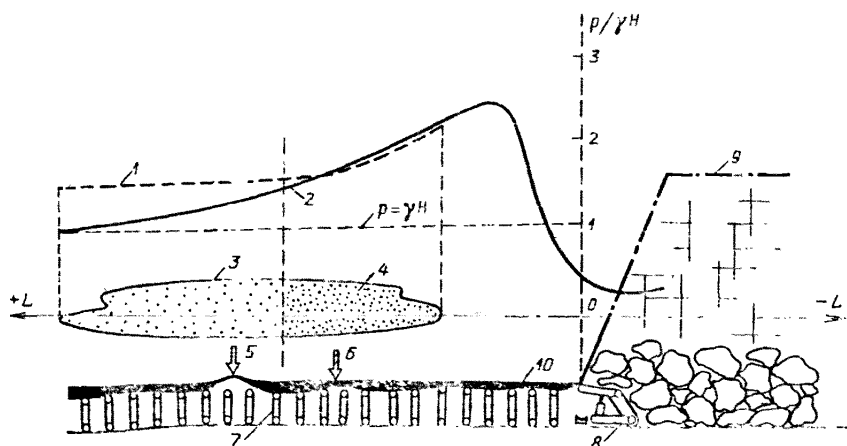


Рис. 3.16. Схема нагружения линзы пористых пород в зоне опорного давления:

1 — график изменения порового давления в линзе пористых пород; 2 — зависимость опорного давления  $p$  от расстояния до забоя  $L$  на глубине  $H$ ; 3, 4 — зоны пород (3 — временно находящихся в состоянии упругого сжатия, 4 — с нарушенной структурой); 5, 6 — участки возможного прорыва в зонах ослабления кровли выработки (5 — разжиженной породы, 6 — воды с частичным выносом материала из слабосцементированных пород); 7 — подготовительная выработка; 8 — очистной забой; 9 — граница зоны трещин в кровле выработанного пространства; 10 — кровля пласта

Именно подобными гидрогеомеханическими процессами объясняются многие прорывы водопородной смеси в подготовительные и, реже, очистные выработки, происходящие при отработке пластов с обрушением кровли.

Начальная фаза прорывов *второго типа* связана с поступлением воды из любых аккумуляторов ее в массиве горных пород или на поверхности, вскрытых техногенной зоной водопродвижающих трещин (см. разд. 3.2). На последующих фазах вода может интенсивно размывать слабые песчано-глинистые породы по стенкам трещин и выносить их в лавы и подготовительные выработки. Такой вынос пород из зоны обрушения равносителен увеличению вынимаемой мощности продуктивного пласта и вызывает рост ЗВТ и водопритока из уже деценируемых или вновь вовлекаемых аккумуляторов воды. Кроме того, попадающие в сферу влияния опорного давления "разжиженные" песчано-глинистые породы могут также прорываться по водопродвижающим трещинам в зону обрушения, а затем к очистному забою и в штреки.

Прорывы *третьего типа* возникают при управлении обрушением, когда оседание подработанного массива происходит с разделением на группы слоев, деформирующихся самостоятельно [2]. При этом между быстро оседающей непосредственной кровлей и "зависающей" вышележащей лачкой слоев (так называемая основная кровля) образуются полости расслоения. Вода, отжимаемая из зоны опорного давления и фильтрующаяся из этих слоев, поступает в полости расслоения и смачивает трещины сдвигания, возникающие в непосредственной кровле. Если непосредственная кровля содержит слои глинистых пород, способных набухать, то трещины в них могут закрываться и создавать условия для накопления в полостях расслоения воды, угрожающей прорывом.

Так, если технология очистных работ предусматривает зависание основной кровли на весь период отработки лавы, то прорывоопасные условия возникают при

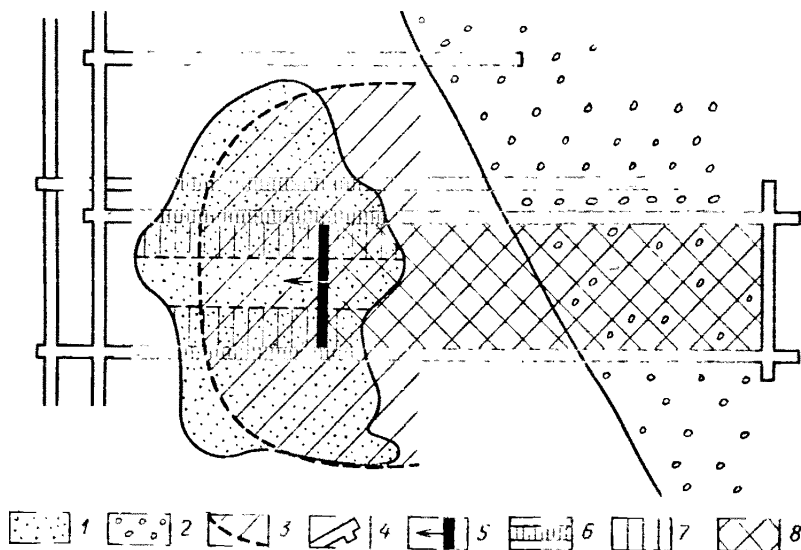


Рис. 3.17. Схема к прогнозу прорывоопасных участков выработок:

1 – линза (слой) прорывоопасной породы; 2 – водный объект на поверхности; 3 – зона опасного опорного давления; 4 – штрек; 5 – очистной забой; 6–8 – участки выработок, на которых возможны прорывы первого, второго и третьего типов соответственно

напорах в полости расслоения, соответствующих среднему градиенту в ЗВТ порядка 1,5. Если же основная кровля зависает временно, то прорывы могут возникать в периоды ее оседаний: при этом напор в полости расслоения резко возрастает вплоть до величин, отвечающих весу пород основной кровли. Возникновение высоких градиентов напоров может привести к гидроразрыву и размыву закрытых набуханием трещин с последующим прорывом воды в выработку, что особенно характерно для ее краевых зон, где изгиб подработанных слоев максимален. После выхода воды из полости расслоения и снижения в ней напора повторное набухание глинистых пород в водопроводящих трещинах может сопровождаться новым накоплением воды и повторением прорыва. При этом, как и при прорывах второго типа, возможен размыв песчано-глинистых пород в зоне обрушения с соответствующими осложнениями горных работ.

Из всего изложенного ясно, что основные факторы прорывов подразделяются на естественные и технологические; среди первых – наличие в толще горных пород и распространение в плане песков или слабосцементированных песчаников, мощность и прочностные характеристики экранирующих глинистых пород, величины напоров в водоносных породах; среди вторых – принятая система разработки, способ управления кровлей, скорость продвижения очистного забоя, крепление подготовительных выработок и др. Эти факторы предопределяют такие важные техногенные параметры, как высота ЗВТ, степень, концентрация и распределение опорного давления вокруг выработок, режим давления воды в зонах опорного давления и на прилегающих участках. Сопоставление количественных характеристик этих параметров позволяет выделить на плане горных работ прорывоопасные участки (рис. 3.17) и отметить комплекс профилактических мероприятий.

При районировании шахтного поля по прорывоопасности на этапе проектирования горных работ перечисленные выше техногенные параметры могут приниматься по аналогии или в соответствии с указаниями инструктивно-методических документов; при дальнейшей эксплуатации шахты они уточняются посредством натурных наблюдений. Количественный анализ сложного взаимодействия естественных и технологических факторов с позиций оценки их влияния на развитие прорывов проводится на основе: 1) физического моделирования гидрогеомеханических процессов, сопровождающих сдвигение, на водонасыщенных образцах пород при давлениях, близких к реальным, или на моделях из эквивалентных материалов; 2) численного или аналогового моделирования гидрогеомеханических процессов, в частности с использованием результатов физического моделирования. Однако наиболее важным звеном упомянутых выше работ являются, конечно, натурные исследования, проводимые для оперативного корректирования проекта горных работ при эксплуатации шахты и управления гидрогеомеханическими процессами, вызывающими прорывы. Эти исследования направлены на уточнение геологического строения шахтного поля или его участков, выявление закономерностей сдвигения и деформирования подрабатываемого массива, разработку эффективной системы контроля за режимом напоров (порового давления) в прорывоопасных слоях.

При уточнении геологического строения шахтного поля особенно тщательно следует выявлять положение границ распространения прорывоопасных пород, для чего целесообразно использовать палеофациальный анализ условий формирования осадочной толщи, вмещающей продуктивный пласт. Наблюдения за режимом сдвигения подрабатываемой толщи призваны дать качественные и количественные характеристики напряженно-деформированного состояния пород, в том числе сведения о зоне опорного давления у границ выработанного пространства и о времени образования, положении и размерах полостей расслоения в подрабатываемом массиве горных пород. При наблюдениях за режимом напоров (порового давления) в массиве горных пород следует использовать датчики порового давления (см. разд. 3.2).

Анализ результатов проведенных исследований [2] показал, что измеряемое поровое давление воды в горных породах точно отражает их напряженно-деформированное состояние. Так, деформации сжатия или растяжения приводят соответственно к росту или снижению порового давления, а возникновение трещин любой ориентации сопровождается быстрым его падением вблизи них. Рядом с изолированными трещинами напоры быстро восстанавливаются, однако вблизи трещин, связанных с крупными пустотами, пониженные напоры сохраняются весьма длительное время. Следовательно, специально организованные при натурных экспериментах наблюдения за поровым давлением воды в подрабатываемом массиве позволяют оценивать размеры участков (зон) опорного давления, его величину и динамику развития; выявлять зоны с различным характером деформирования; фиксировать участки и моменты возникновения сквозных или изолированных трещин и других нарушений массива.

Таким образом целенаправленное изучение факторов, способствующих формированию прорывов воды и породы в подготовительные и очистные выработки,



позволяет еще на этапе проектирования выявить прорывоопасные участки шахтных полей. При эксплуатации шахты на таких участках оперативные наблюдения за напряженно-деформированным состоянием подрабатываемого массива, а также за поровым давлением воды вокруг выработок и в ЗВТ дают возможность своевременно проводить различные горно-технические мероприятия, исключающие или уменьшающие вредное влияние прорывов.

Все это дает основание еще раз отметить важность и перспективность использования наблюдений за гидростатическим давлением как эффективным индикатором напряжений и деформаций в горных породах.

### Контрольные вопросы

1. Какие основные системы разработки при добыче полезных ископаемых подземным способом вы знаете? Какая из них заслуживает наиболее пристального внимания гидрогеологов и почему?
2. Какие основные проблемы гидрогеологического характера возникают при проходке шахтных стволов в обводненных породах? Попробуйте дать свое заключение по следующей ситуации: шахтный ствол должен пересечь пласт мелкозернистых песков мощностью 5 м с коэффициентом фильтрации 1 м/сут и напором над кровлей пласта 200 м; чего нужно больше всего опасаться в этом случае: высоких водопритоков, прорывов воды и песка или деформаций крепи ствола? (При ответе на вопрос вспомните материал, изложенный в гл. 2). Что бы вы порекомендовали для безопасной проходки ствола в данной ситуации? Какой показатель имеет решающее значение для правильного проектирования приствольных тампонажных завес?
3. Охарактеризуйте основные особенности, определяющие выбор рациональных схем дренажа и водоотлива при проходке подготовительных и очистных выработок.
4. В чем суть процесса сдвижения горных пород? Какие зоны формируются в подработанном массиве при сдвижении? Как вы думаете, на каком участке на рис. 3.6 формируются субвертикальные трещины и почему?
5. Представляют ли трещины расслоения в зоне прогиба непосредственную опасность обводнения горных выработок? Как связана высота ЗВТ с характером деформаций подработанного массива? Что следует принимать за верхнюю границу ЗВТ?
6. Какие методы разработаны для определения высоты ЗВТ? Какие из них применимы в слоистых (песчано-глинистых) толщах, а какие – в трещиноватых породах?
7. Какой механизм определяет осадку горных пород при глубоком водопонижении? В каких породах, при прочих равных условиях, этот процесс пойдет быстрее – в слабифицированных или достаточно прочных? Почему при глубоком водопонижении водонасыщенные глинистые породы "отдают" воду в дренируемый водоносный горизонт? Может ли этот объем воды обуславливать большую долю притока из дренируемого водоносного горизонта?
8. Какие два основных параметра глинистых пород, подвергающихся сжатию при глубоком водопонижении, нужно определить, чтобы правильно оценить величину оседания земной поверхности и параметры дренируемого водоносного горизонта? Как это лучше всего сделать?
9. Что является причиной горных ударов? Почему нагнетание воды в угольный пласт помогает устранить опасность проявления горных ударов? Как бы вы при этом охарактеризовали фильтрационные свойства угольного пласта?
10. Чем могут быть вызваны прорывы подземных вод из толщи подработанных горных пород? Какие исследования нужно провести в первую очередь для прогнозирования прорывов?

## **ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ОСУШЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

Изложенный ниже материал следует рассматривать как практическое приложение принципов и методов изучения динамики подземных вод [7] к конкретной области инженерной гидрогеологии. Во избежание повторения курса "Динамика подземных вод" главное внимание уделено логике построения и реализации расчетной модели объекта – карьера шахты или другой горной выработки<sup>1</sup>, дренажной системы и т.п.

Основной упор сделан на аналитические методы, при необходимости – в сочетании с простейшими вариантами аналоговых моделей. Там, где такой подход оказывается дефектным или требует серьезного уточнения, даются указания на необходимость применения "более сильных" математических моделей (аналоговых или численных), но методика и техника моделирования при этом специально не рассматриваются, поскольку предполагается, что они изучаются в других курсах.

### **4.1. ОСОБЕННОСТИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ**

#### **4.1.1. Задачи фильтрационных расчетов**

Вскрытие карьерами или траншеями водоносных горизонтов, как правило, сопровождается существенными нарушениями естественного гидродинамического режима вследствие изменений условий разгрузки подземных вод. В то же время усиленное дренирование водоносных горизонтов горными выработками приводит к интенсификации их связи со смежными горизонтами, поверхностными водоемами и водотоками, т.е. способствует изменению условий питания подземных вод. К тому же при строительстве и эксплуатации крупных карьеров нередко создаются разнообразные гидротехнические сооружения (водохранилища, каналы, а также гидроотвалы, хвостохранилища и другие бассейны промышленных стоков), которые могут стать источниками дополнительного питания. Все это обычно приводит к резким нарушениям гидродинамического режима и развитию нестационарных процессов фильтрации на площадях, измеряемых подчас сотнями, а то и тысячами квадратных километров. Характерно, что из-за больших (сотни метров) понижений напоров на контурах карьеров часто отмечается интенсивное истощение водоносных структур – постепенное сокращение их обводненной мощности или (при наклонном водоупоре) площади. Это обычно делает фильтрационный процесс сильно нелинейным [7, 16]. Поэтому при про-

---

<sup>1</sup> Рассчитываемый объект чаще всего условно именуется карьером, но, за исключением особо оговоренных случаев, соответствующие рекомендации можно распространять и на другие виды горных выработок.

гнозе водопритоков к горным выработкам должны быть тщательно учтены не только естественные, но и технологические факторы, в частности: 1) изменения условий питания и разгрузки водоносных горизонтов, связанные с проходкой горных и дренажных выработок и созданием сопутствующих гидротехнических сооружений; 2) технология ведения горных и гидротехнических работ, в том числе порядок вскрытия водоносных горизонтов, изменение положения контура горных работ в плане, режим строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений, распространение и характер техногенных отложений в пределах бассейнов промышленных стоков.

Основная задача фильтрационных расчетов осушения карьерного поля заключается в прогнозе режима подземных вод при разработке месторождения, а также в количественном обосновании системы осушения. К частным задачам фильтрационных расчетов можно отнести: а) определение общего притока вод к карьеру в периоды строительства и эксплуатации на различные моменты времени; б) обоснование необходимости осушительных мероприятий; в) обоснование типа и числа осушительных устройств, расположения их в плане и в разрезе, а также режима их работы во времени; г) установление положения уровней подземных вод в зоне действия водозаборов во времени. Фильтрационные расчеты, связанные с оценкой процессов загрязнения (изменения качества) подземных вод, рассматриваются в гл. 8.

В результате фильтрационных расчетов определяют объемы и сроки проведения осушительных работ при разных схемах осушения, необходимые для составления сметно-финансовых расчетов и технико-экономического сопоставления конкурирующих вариантов систем осушения.

#### **4.1.2. Исходные данные и формы их представления**

К основным исходным данным при фильтрационных расчетах осушения карьерного поля относятся: 1) сведения об орогидрографии района; 2) материалы о геологическом строении района; 3) материалы о гидрогеологическом строении района (основные водоносные горизонты, их распространение, уклон водоупора (подстилающего безнапорный горизонт), значения мощностей, напоров и т.д.); 4) фильтрационные параметры (коэффициенты фильтрации, проводимости, уровнепроводности и пьезопроводности, водоотдача и др.); 5) данные об условиях питания и разгрузки водоносных горизонтов — положение контуров питания и стока, сведения об инфильтрационном питании и о гидравлической взаимосвязи водоносных горизонтов между собой (параметры перетекания) и с поверхностными водоемами (параметр сопротивления ложа реки или водоема  $\Delta L$ ); 6) данные о проницаемости покровных отложений на тех участках, где возможна дополнительная инфильтрация; 7) количество атмосферных осадков и величина испарения; 8) инженерно-геологическая характеристика пород; 9) сведения о гор-

ных работах (развитие карьера в глубину и по площади, применяемое горное оборудование, график ведения горных работ и т.п.).

Для выбора исходных данных материалы по каждому водоносному горизонту представляются в виде специальных гидрогеологических карт, таких, как карты гипсометрии водоупорного ложа, гидроизогипс (пьезоизогипс), изомощностей, обводненных пород, изменения проводимости (коэффициентов фильтрации) и др. Кроме карт составляется несколько характерных гидрогеологических разрезов по месторождению с нанесением имеющихся исходных данных. Сведения о горных работах обычно иллюстрируются планом и паспортом ведения горных работ.

На основании анализа всех исходных данных о месторождении составляют природную гидрогеологическую схему области фильтрации, устанавливают ее границы в плане и в разрезе и краевые условия в природной обстановке.

Границами области фильтрации в плане могут служить река или водоем, гидравлически тесно связанные с подземными водами; линия контакта обводненных пород с пластом, проводимость которого значительно больше (в 20–40 раз и более), а запасы подземных вод весьма велики и т.п. Нередко границами являются различные тектонические нарушения: зона разлома, где происходит обильное питание или разгрузка подземных вод; линия сброса, где обводненные породы контактируют с неводоносными или малопроницаемыми, и т.п. В долинах рек границами области фильтрации могут служить не только реки, но и линии контакта террасовых отложений с коренными.

Для представления строения области фильтрации в разрезе по каждому водоносному и слабопроницаемому пласту устанавливают средние значения мощностей и коэффициентов фильтрации как для всей области фильтрации, так и для отдельных зон (при значительной изменчивости этих показателей в плане). После получения средних значений выделяют пласты, которые можно рассматривать как относительные водоупоры; критерием в этом отношении является соотношение проводимостей.

#### 4.1.3. Типизация расчетных условий фильтрации

Общую расчетную гидрогеологическую схему составляют после предварительной типизации исходных условий фильтрации. Такая типизация основывается на природной гидрогеологической схеме и сведениях о системе осушения. При этом принимаются во внимание временная изменчивость процесса (нестационарный, квазистационарный или стационарный); доминирующая емкость — гравитационная (безнапорный режим) или упругая (напорный); строение области фильтрации в разрезе и в плане; топология области фильтрации в плане и условия на ее боковых границах; условия питания и стока по площади распространения водоносных пластов; тип и расположение горных выработок и дренаж-

ных устройств, представляющих собой так называемые внутренние границы пластов; структура потока; линейность или нелинейность фильтрационного процесса.

Все эти аспекты типизации рассмотрены в курсе "Динамика подземных вод". Поясним лишь частные моменты.

1. По форме области фильтрации в плане особо выделяют следующие типы водоносных пластов:

а) неограниченный пласт, который характеризуется весьма большими размерами и такой удаленностью границ от осушительной системы, что они практически не оказывают влияния на процесс осушения. Для отнесения пласта к этому типу нужно сравнить его размеры с расчетным радиусом влияния  $R(t)$  на момент  $t$  [7]:

$$R(t) = r_k + \sqrt{pa^*t}, \quad (4.1)$$

где  $r_k$  — приведенный радиус горной выработки или водопонижающего контура;  $a^*$  — коэффициент пьезопроводности.

б) полуграниченный пласт, который имеет одну прямолинейную границу. На ней могут быть заданы постоянный напор (например, область фильтрации, примыкающая к крупной речной долине), постоянный расход (например, пласты, примыкающие к прямолинейным непроницаемым границам — сбросам) или условия третьего рода (река с сильно заcolmатированным руслом)<sup>1</sup>;

в) полособразный пласт, ограниченный двумя прямолинейными параллельными контурами;

г) круговой пласт — схема, к которой нередко приводятся (в гидромеханическом смысле) водоносные горизонты, приуроченные к мульдообразно залегающим пластам. В зависимости от характера питания водоносного горизонта на границе кругового пласта может быть задан постоянный напор или постоянный расход, причем последний случай встречается наиболее часто.

Перечисленные формы границ области фильтрации называются типовыми (при условии, что они остаются неизменными во времени), а все прочие — сложными.

2. По строению области фильтрации в разрезе водоносные горизонты дифференцируются:

а) по характеру водопроницаемости — на однородные, слоистые и неоднородные. Проницаемость однородного водоносного горизонта одинакова во всех точках. Слоистый горизонт состоит из нескольких однородных слоев и обычно может быть приведен к однородному в целом, для неоднородного горизонта такое приведение допустимо лишь в некоторых частных случаях;

---

<sup>1</sup> В процессе водопонижения условия на контурах рек с сильно заcolmатированным руслом могут переходить в условия второго рода, если русло реки становится "подвешенным".

б) по характеру залегания водоупорного ложа безнапорного пласта — на горизонтально и наклонно залегающие. Уклон водоупора иногда следует учитывать уже при малых углах падения (порядка  $3-5^\circ$ ), в частности это необходимо при расчете "проскока" воды в карьер между скважинами контурного дренажа.

3. По условиям питания и разгрузки водоносных горизонтов на площади их распространения можно выделить следующие факторы:

а) питание водоносного горизонта за счет инфильтрации, требующее специального учета в гидродинамических расчетных схемах, лишь когда величина ее в условиях водопонижения отличается от естественной (например, инфильтрация из реки с "подвешенным" руслом, под гидроразвалами, атмосферных и технических вод на участках водоносных пластов, вскрытых карьером и т.п.). В противном случае инфильтрация "автоматически" учитывается путем вычитания расчетных понижений из отметок естественной депрессионной поверхности<sup>1</sup>, а при расчетах притока к участку контура дренажа к расчетной величине притока должен прибавляться (с соответствующим знаком) расход естественного потока, приходившийся на этот участок. Сказанное, конечно, не относится к тем случаям, когда задача решается в напорах (а не в понижениях) или расчет притоков проводится балансовыми методами;

б) питание или разгрузка за счет перетекания вод через относительно водоупорные слои из одного водоносного горизонта (с большим напором) в другой (с меньшим напором). Степень развития процессов перетекания зависит от перепадов напоров, площади перетекания, проницаемости и мощности разделяющего слоя. Иногда перетекание следует учитывать даже при весьма малых значениях коэффициента фильтрации разделяющих слоев (порядка  $10^{-4} - 10^{-5}$  м/сут).

4. Внутренние границы области фильтрации контролируются расположением и формой карьера<sup>2</sup>, а также размещением, типом и числом осушительных устройств:

а) по степени вскрытия пласта дренирующие выработки и скважины могут быть совершенными и несовершенными;

б) для осушительных устройств различают дрены горизонтального и вертикального типов;

в) по расположению в плане дрен вертикального типа выделяют одиночные дрены, линейные или контурные системы взаимодействующих дрен, а также площадные системы дрен;

---

<sup>1</sup> Такой подход, вытекающий из принципа суперпозиции, недопустим для нелинейных задач фильтрации, в которых какой-либо фильтрационный параметр (например, проводимость) или характер граничного условия существенно зависят от изменения напора.

<sup>2</sup> В тех случаях, когда по условиям строительства или эксплуатации ожидается поступление подземных вод в карьер, т.е. последний следует рассматривать как контур стока водоносного горизонта (в частности, все совершенные и затопленные несовершенные карьеры).

г) по расположению в плане дрен горизонтального типа выделяют одиночные линейные или контурные дрена, а также системы параллельных линейных дрен.

5. Виды граничных условий на внутренних границах водоносного горизонта могут быть различными. Так, для контура карьера, сквозных и забивных фильтров, поглощающих и самоизливающихся скважин, а также большинства горизонтальных дрен наиболее характерны граничные условия первого рода (задана величина напора на границе).

Водопонижающие скважины могут работать с постоянным расходом или постоянным понижением. Для оценки режима работы водопонижающей скважины прежде всего следует рассчитать приток к скважине  $Q_c$  при максимально возможном понижении<sup>1</sup>, а также оценить эмпирическим путем или по аналогии водозахватную способность скважины  $Q_{вз}$ , определяемую состоянием ее фильтра и прифильтровой зоны. Если расход насоса  $Q_n < Q_c$ , то скважина будет все время работать с постоянным расходом, равным  $Q_n$  (при  $Q_n \leq Q_{вз}$ ) или  $Q_{вз}$  (при  $Q_n > Q_{вз}$ ). Если  $Q_n > Q_c$ , то в течение первого этапа откачки скважина будет работать с постоянным расходом, равным  $Q_n$  (при  $Q_{вз} \leq Q_n$ ), а затем с постоянным понижением, равным  $S_{max}$ . Продолжительность первого этапа можно оценить из условия  $S_c(t) = S_{max}$ , (где  $S_c(t)$  — расчетное понижение в скважине, работающей с постоянным расходом  $Q_n$ ).

6. По структуре (размерности) потока далее будут рассматриваться лишь двумерные и одномерные плановые движения.

7. Процессы далее считаются линейными. Из возможных видов нелинейности будут специально рассмотрены лишь важнейшие частные случаи (в первую очередь, напорно-безнапорные движения).

В конечном счете все расчетные гидродинамические схемы могут быть разделены на типовые и сложные. *Типовая схема* предполагает выполнение следующих условий: 1) форма области фильтрации в плане соответствует одному из выделенных выше типов и остается неизменной во времени; 2) водоносная толща имеет в разрезе однородное строение или слоистое, приводимое к однородному; 3) залегание водоупорного ложа горизонтальное (для случаев безнапорной фильтрации в однородном пласте); 4) питание по площади может не приниматься во внимание (за исключением случаев одномерного движения); 5) на границах пласта заданы простейшие типовые условия первого или второго рода; 6) фильтрация плановая или приводимая к таковой; 7) процесс может изучаться в линейной постановке.

Гидрогеологический расчет систем осушения в типовых условиях в большинстве случаев может производиться по аналитическим зависимостям.

---

<sup>1</sup> Максимально возможное понижение в скважине  $S_{max}$  определяется отметкой всасывателя насоса или подошвы водоносного пласта (если насос заглублен ниже "водоупора").

В тех случаях, когда какое-либо из перечисленных условий не выполняется, расчетные гидрогеологические схемы следует рассматривать как *сложные схемы*. Сюда, в частности, относится большинство случаев расчета дренажных скважин (фильтров) вблизи совершенных или затопленных горных выработок, представляющих собой контуры стока. Фильтрационные расчеты для сложных схем обычно требуют привлечения в той или иной степени методов моделирования (в некоторых случаях, при задании на границах условий первого или третьего рода, расчет требует привлечения моделирования даже в типовых схемах).

#### 4.1.4. Порядок фильтрационного расчета

Гидрогеологические расчеты осушения в общем случае рекомендуются проводить в следующем порядке.

1. Выбираются основные исходные данные для расчета и составляется природная гидрогеологическая схема карьерного поля в целом.

2. Для каждого из выделенных водоносных горизонтов по возможности составляется типовая расчетная схема. Если она относится к категории сложных, то строится приближительная сетка движения (проще всего на аналоговой модели), причем предполагается, что подземные воды дренируются только самим карьером; намечаются характерные ленты тока.

3. Определяются основные расчетные параметры для каждого водоносного горизонта, а в сложных условиях – для каждой из выделенных лент тока.

Дальнейший расчет проводится для каждого обособленного водоносного горизонта. Если те или иные средства осушения работают на несколько горизонтов, это учитывается дополнительными расчетами.

4. Устанавливается общий приток к карьере, распределение притоков по участкам и их изменение во времени. Для первых этапов расчет должен вестись по формулам неустановившегося движения. Примерное время, необходимое для достижения установившегося режима в областях с фиксированными контурами обеспеченного питания, рассчитывается по формуле (4.1). Для безнапорных горизонтов с удаленными границами питания неустановившийся режим может наблюдаться в течение всего периода эксплуатации карьера.

При оценке общих объемов откачиваемых вод полученные величины притоков должны суммироваться с величиной ожидаемого поступления в карьер атмосферных или талых вод.

5. Оценивается возможность дополнительного (по сравнению с "естественными" условиями) питания горизонтов за счет инфильтрации и перетекания (в частности, за счет инфильтрации на участках вскрытия карьером водоносных пластов). Для этого сначала могут использоваться достаточно приближенные приемы:

- а) для оценки величины суммарной дополнительной инфильтрации



$Q_{\text{инф}}$  можно пользоваться формулой  $Q_{\text{инф}} = \omega F$  (где  $\omega$  — удельная дополнительная (по сравнению с естественной) инфильтрация;  $F$  — площадь инфильтрации);

б) для оценки величины перетекания  $Q_{\text{пер}}$  можно вести расчет по формуле

$$Q_{\text{пер}} = \sum_F k_b \frac{\Delta H_i}{m_b} F_i, \quad (4.2)$$

где  $k_b$  и  $m_b$  — коэффициент фильтрации и мощность разделяющего слоя;  $i$  — номера участков области инфильтрации, в пределах которых скорость перетекания может приниматься примерно постоянной;  $\Delta H_i$  — разность уровней взаимодействующих горизонтов в пределах  $i$ -го участка (определяется по пьезометрическим кривым, построенным без учета перетекания);  $F_i$  — площадь  $i$ -го участка;

в) если величины  $Q_{\text{инф}}$  или  $Q_{\text{пер}}$  соизмеримы с определенными ранее (без учета этих процессов) водопритоками, то необходимо провести более точный расчет с учетом инфильтрации и перетекания.

6. Полученные величины притоков оцениваются с точки зрения их влияния на условия ведения горных работ и устойчивость пород (см. разд. 1). Далее возможны два варианта:

а) если защитного дренажа не требуется, то расчет заканчивается определением пропускной способности водоприемных канав или параметров прибортового дренажа (когда он применяется согласно рекомендациям, приведенным в разд. 2.3). Кроме того, проводится расчет уровней в нескольких характерных точках;

б) если проверка покажет необходимость защитного дренажа, то проводится дальнейший расчет для выяснения его оптимальной схемы. Для этого намечается несколько возможных рациональных вариантов, каждый из которых рассчитывается отдельно для нескольких характерных этапов работы карьера.

7. Для систем водопонижающих скважин, оборудованных насосами, а также вертикальных (и наклонных) безнасосных скважин, сквозных фильтров и т.п., сначала проводится приближенный расчет. При разработке "всухую" *несовершенных горных выработок* необходимое число скважин  $n_y$  на участке определяется в первом приближении по формуле

$$n_y = M(Q_y/Q_n), \quad (4.3)$$

где  $M \approx 1,2$  — коэффициент запаса;  $Q_y$  — общий расчетный приток к участку.

При этом следует помнить о необходимости последующей проверки условия

$$S_c \leq S_{\text{max}}. \quad (4.4)$$

Для *совершенных горных выработок* может быть рекомендован график (рис. 4.1) зависимости

$$\delta = f(\delta, \bar{I}_2),$$

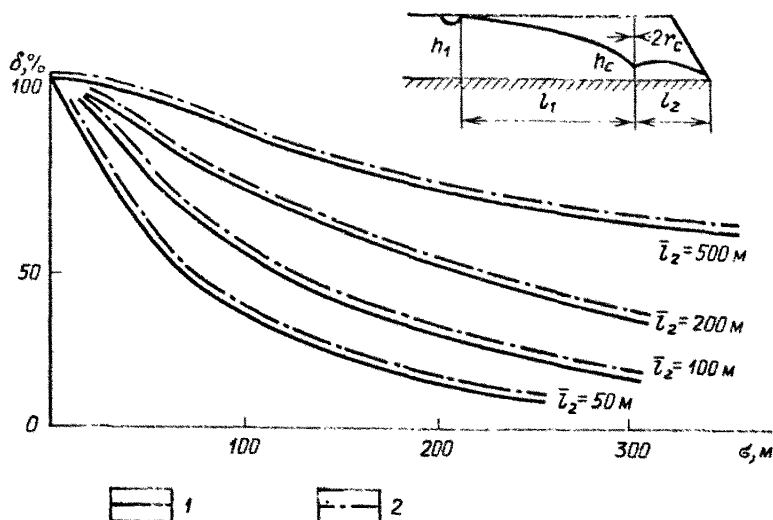


Рис. 4.1. Схема к определению расстояния между дренажными скважинами в случае совершенного карьера:

1 —  $r_c = 0,1$  м; 2 —  $r_c = 0,2$  м

где  $\delta$  — коэффициент заслона, определяемый по формуле

$$\delta = 1 - (q_0/q), \quad (4.5)$$

(здесь  $q_0$  и  $q$  — удельные притоки на 1 м защищаемой выработки при работе дренажного ряда и при отсутствии его);

$$\bar{l}_2 = (l_1 - l_2) / (l_1 + l_2).$$

Для построения графика предварительно задаются величиной допустимого расхода потока  $q_0^0$ , притекающего к выработке (согласно рекомендациям, приведенным в гл. 2 и 3, или иным регламентирующим требованиям) или к внутреннему дренажному контуру, если он существует (исходя из его оптимальной производительности). Затем, задаваясь величиной

$$\delta^0 = 1 - (q_0^0/q), \quad (4.6)$$

по графику можно определить требуемую величину  $\sigma$ , которая должна удовлетворять условию  $\delta(\sigma, \bar{l}_2) \geq \delta^0$  (см. рис. 4.1). Отметим, что график, приведенный на рис. 4.1, построен (при  $h_c \approx 0$ ) для одномерного плоскопараллельного потока; во многих случаях это предопределяет необходимость предварительного приведения исходного двумерного потока к одномерному плоскопараллельному (см. разд. 4.2).

На основании таких прикидочных расчетов ориентировочно намечаются размещение скважин и мощность насосного оборудования (см. разд. 4.5, пример 1), а затем проводится детальный расчет.

## 4.2. СХЕМАТИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Рассмотрим методы схематизации условий фильтрации, позволяющие путем некоторых допущений существенно упростить расчетную схему и по возможности свести ее к типовой. При этом будем исходить из приведенной в разд. 4.1 типизации.

1. Фильтрационные расчеты осушения карьерных полей, в большинстве случаев представляющих практический интерес, можно проводить применительно к стадии *квазистационарного*, а позднее *стационарного* режима. Упорядоченный характер движения подземных вод на стадии квазистационарного режима позволяет ввести в расчеты существенные упрощения и учитывать изменения параметров потока во времени посредством приближенных (инженерных) методов.

Для примерной оценки времени  $t_y$ , после которого реальный нестационарный процесс фильтрации может рассматриваться в приближенной стационарной постановке, используют условие

$$R^* < R(t) \quad \text{или}$$

$$t \geq t_y \approx (R^* - r_k)^2 / (\pi a^*), \quad (4.7)$$

где  $R^*$  — расстояние от центра карьера до ближайшей границы обеспеченного питания (для данного водоносного горизонта);  $R(t)$  — расчетный радиус влияния;  $t$  — время, отсчитываемое от начального момента дренирующего действия карьера.

2. *Напорная и безнапорная фильтрации* в профилно-однородных пластах, в линейной постановке описываются идентичными решениями при соответствии в них значений

$$2TH \leftrightarrow kh^2; \quad a^* \leftrightarrow a, \quad (4.8)$$

где  $h$  — мощность пласта;  $a$  — коэффициент уровняпроводности.

Поэтому все дальнейшие решения линейных задач приводятся только для напорного случая (простейшая схема пласта с постоянной проводимостью). К ней непосредственно сводится и важный случай безнапорного движения в двухслойном пласте.

3. *Анизотропия* фильтрационных свойств однородного пласта легко учитывается в рамках схемы изотропного пласта известным преобразованием координат [7].

4. Схематизация *профильного строения слоистого пласта* осуществляется в зависимости от соотношения параметров смежных слоев.

При отношениях проводимостей смежных слоев  $T_j : T_{j+1} < 10 : 1$  слоистый пласт заменяется однородным введением суммарной проводимости  $T_\Sigma$  вместо значения  $T$  (для напорного движения):

$$T_\Sigma = \sum_{i=1}^N T_i \quad (4.9)$$

и функции Гиринского  $\varphi_r$  вместо функции  $kh^2/2$  (для безнапорного)

$$\varphi_r = \frac{N(h)}{\sum_{i=1} k_i m_i (h - z_i)} \quad (4.10)$$

где  $N(h)$  — число обводненных слоев в данной точке с мощностью потока  $h$ ;  $z_i$  — расстояние от середины слоя до нижнего водоупора.

Среднее значение коэффициента пьезопроводности в напорном пласте находят по зависимости

$$a_{\text{ср}}^* = T_{\Sigma} / \sum_{i=1}^N \frac{T_i}{a_i^*} \quad (4.11)$$

Для безнапорного нестационарного движения средний коэффициент уронепроводности или среднюю водоотдачу рекомендуется вводить лишь при различиях емкостей до 100 %. Если депрессионная кривая располагается преимущественно в верхнем слое, то следует именно его водоотдачу принимать за среднее значение.

При  $T_j : T_{j+1} > 10:1 - 100:1$  слабопроницаемый слой принимается за относительный водоупор и расчет ведется отдельно для обособленных водоносных (более проницаемых) слоев, при необходимости с учетом перетекания. Однако безнапорный двухслойный пласт рассматривается как единая система с проводимостью, соответствующей проводимости нижнего, более проницаемого слоя, и с водоотдачей, равной водоотдаче верхнего слоя.

Все упомянутые выше приемы по усреднению параметров слоистого пласта дают заметную погрешность при определении уровней в зоне, прилегающей к естественной границе пласта или к дренажной выработке, а для расчета фильтрации к несовершенным выработкам они нередко вообще неприменимы (за исключением тех случаев, для которых найдены формулы, приводящие несовершенную выработку в слоистой среде к совершенной). Поэтому при проведении подобных расчетов следует привлекать моделирование в локальной профильной постановке, позволяющее оценить дополнительное фильтрационное сопротивление, связанное, в частности, с несовершенством границы. Для рек и водоемов подобная операция проводится увеличением пути фильтрации на величину  $\Delta L$  (параметр сопротивления ложа реки или водоема).

5. Для *безнапорного пласта* (точнее, во всех случаях, когда безнапорный пласт не может сводиться к напорному с постоянной проводимостью *уклон водоупора* может быть приближенно учтен путем введения усредненного по полю значения проводимости или (в варианте однородного пласта) усредненной мощности потока; последняя сначала может приниматься как среднее арифметическое из заданных граничных зна-

чений на начальный и конечный моменты времени, а затем — пересчитываться от одного приближения к другому.

6. *Неоднородные в плане* пласты в условиях стационарной фильтрации могут быть приведены к однородным путям расчета приведенных длин потока согласно известному способу фрагментов [7]. В нестационарном случае этот прием допустим лишь при не слишком сильной изменчивости водоотдачи по полю.

7. *Учет питания водоносного горизонта по площади* его распространения (в тех случаях, когда он необходим; см. разд. 4.1), как правило, требует привлечения моделирования. Следует, однако, упомянуть один из частных случаев, имеющих аналитическое решение, — неограниченный пласт с перетеканием из смежного пласта весьма высокой водообильности (уровень последнего не зависит от величины перетекания).

8. Из типовых *топологий естественных границ* области фильтрации в плане наибольший интерес представляют схемы неограниченного и полуограниченного пласта. Первая может применяться для значений времени, удовлетворяющих критерию (4.7), если в нем под  $R^*$  понимать минимальное расстояние до ближайшей границы пласта. Наиболее важный вариант второй схемы — пласт, имеющий одну прямолинейную границу обеспеченного питания (река или водоем с граничным условием первого рода), которая при  $t > t_y$  предопределяет быстрый переход к стационарному режиму. Нужно, однако, учитывать, что для рек и водоемов с закольцованным ложем выполняется граничное условие третьего рода, так что их аппроксимация границей обеспеченного питания осуществляется введением в расчет параметра сопротивления ложа  $\Delta L$ . Аналогично может учитываться и несовершенство границы по степени вскрытия пласта.

Следует еще раз напомнить, что горная выработка, вскрывающая (дренирующая) водоносный пласт, при расчете оконтуривающих ее дренажных устройств является границей первого рода. Соответственно, например, приток в совершенный котлован вблизи реки можно рассчитывать по схеме полуограниченного пласта, а расчет системы скважин вокруг такого котлована следует вести по схеме пласта с двумя плановыми границами первого рода (река и котлован).

9. Реальная, подчас весьма сложная, *плановая топология техногенных границ* пласта (карьеров, подземных выработок, контурных систем скважин) при аналитических оценках обычно может без большого ущерба для точности решения сводиться к расчетному круговому контуру с радиусом  $r_k$ :

$$r_k = \eta \frac{b+d}{4}, \quad (4.12)$$

где  $\eta$  — коэффициент приведения;  $\eta$  меняется от 1,05 при  $b/d=0,05$  до 1,17 при  $b/d=0,5$ ;  $b$  и  $d$  — ширина и длина выработки.

10. При аналитических оценках через расчетный радиус выработки или скважины целесообразно учитывать и их *несовершенство по степени вскрытия* пласта. Для этого используется метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений [7, 17]. Оценка величины дополнительного сопротивления, учитывающего несовершенство выработки или скважины, для простейших случаев однородного пласта базируется на имеющихся аналитических решениях, а для более сложных — на моделировании. После включения полученной величины дополнительного сопротивления в расчетный радиус несовершенная граница рассчитывается так же, как совершенная. Несовершенство линейных в плане выработок (траншеи, канавы, штреки) учитывают подобно несовершенству рек увеличением расчетной длины фильтрации, исходя из дополнительного фильтрационного сопротивления  $\Phi_d$ . Другой возможный подход — введение на контуре выработки фиктивного напора, превышающего заданный напор на величину

$$\Delta H_d = q \Phi_d. \quad (4.13)$$

Несовершенство достаточно больших (широких) выработок ( $2b > m$ ) в однородных пластах можно не учитывать.

11. Метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений используется и для *замены контура скважин фиктивной сплошной выработкой* (траншеей). При аналитических оценках в этих целях удобно вводить на контуре усредненный расчетный напор  $H_\phi$ , связанный с напором в скважине  $H_c$  соотношением [7]

$$H_\phi = H_c + \frac{Q_c}{2\pi T} \ln \frac{\sigma}{2\pi r_c} \quad (4.14)$$

12. Рассмотрим схематизацию *плановой структуры потока*. Большинство расчетов, проводимых для сложных (а иногда и для типовых) условий, целесообразно осуществлять после предварительного деления области фильтрации на ряд фрагментов, каждый из которых можно рассчитывать обособленно. Такими фрагментами являются ленты тока, границами которых служат две фиксированные линии тока, природные границы пласта и внутренние границы области фильтрации — контур карьера или дренажный контур.

Для неустановившегося движения при этом целесообразно использовать принцип недеформируемости линий тока, согласно которому боковые границы лент остаются во времени неизменными, т.е. такими же, как и в условиях установившейся фильтрации (при одних и тех же граничных условиях). Такое предположение позволяет получить вполне надежные результаты для условий квазистационарного режима, особенно при наличии питающих границ первого рода.

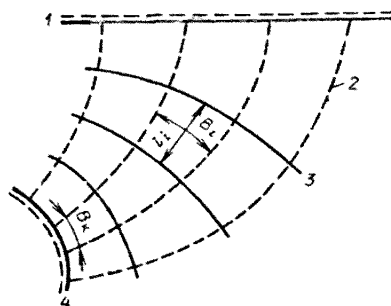


Рис. 4.2. Схема к определению расчетной длины ленты тока:

1 — контур питания; 2 — линия тока; 3 — линия равных напоров; 4 — контур горной выработки

Построение линий тока, представляющих собой боковые границы лент, может проводиться на бумажных моделях ЭГДА [17].

В результате оказывается, в частности, возможной схематизация планового установившегося движения плоскопараллельным движением, т.е. движением, при котором все линии тока взаимно параллельны. Для этого реальные ленты тока приводятся к эквивалентным (по фильтрационному сопротивлению) плоским лентам (рис. 4.2):

$$x_p = n_d(x_d) \frac{B_k}{(B/l)_{cp}};$$

$$\left(\frac{B}{l}\right)_{cp} = \frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} \frac{B_i}{l_i}, \quad (4.15)$$

где  $n_d(x_d)$  — число отсеков ленты в интервале  $[0, x_d]$ ;  $x_p$  и  $x_d$  — расчетное и действительное расстояния от рассматриваемой точки потока до карьера.

Если проводимость потока в пределах ленты меняется, то это обстоятельство должно учитываться при приведении ленты к плоской, для чего величину  $(B/l)_{cp}$  следует определить по формуле

$$\left(\frac{B}{l}\right)_{cp} = \frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} \frac{T_i}{T} \cdot \frac{B_i}{l_i},$$

где  $T$  — выбранная расчетная проводимость (одинаковая для всей ленты тока).

В дальнейшем расчет ведется по основной формуле плоскопараллельного потока

$$q = T \frac{H(x_1) - H(x_2)}{x_1 - x_2} \quad (4.16)$$

при подстановке в нее вместо действительных расстояний  $x_d$  приведенных  $x_p$ , снимаемых с построенного по формуле (4.15) графика  $x_p = f(x_d)$ .

13. Из возможных вариантов *нелинейности фильтрационного процесса*, особенно характерной для безнапорных потоков, наиболее важны ситуации, в которых проявляется заметная зависимость проводимости пласта или его емкости от снижения напора. В довольно широком диапазоне условий соответствующие

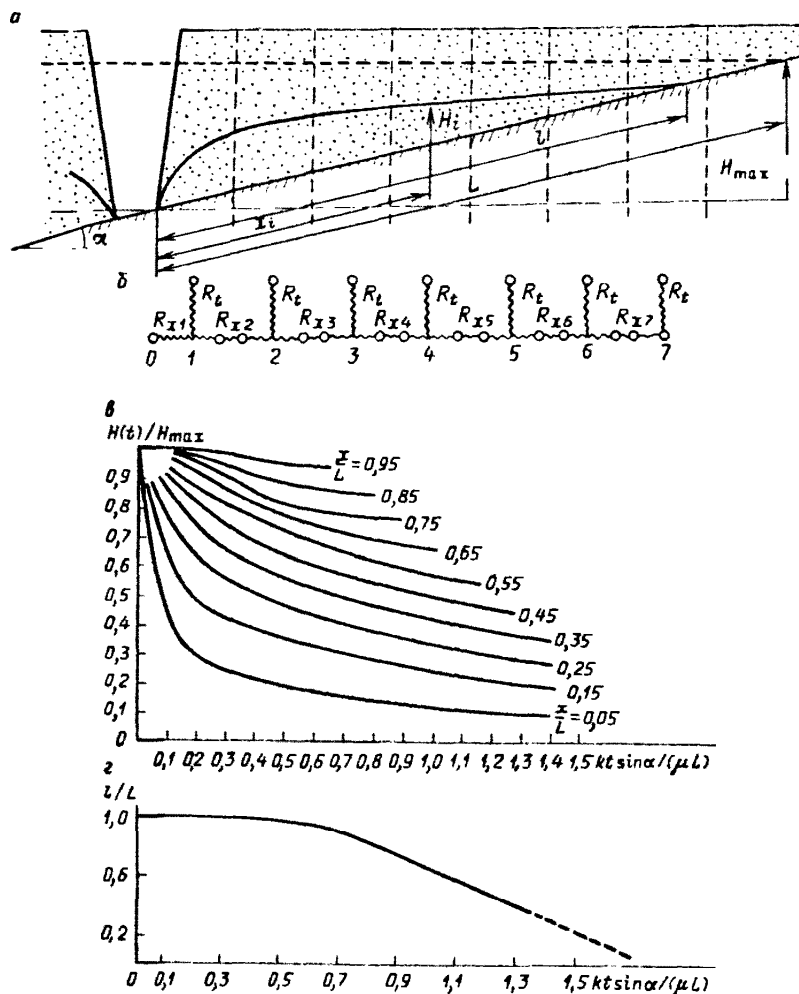


Рис. 4.3. Схемы и результаты моделирования фильтрации в безнапорном пласте на наклонном водоупоре, вскрываемом горной выработкой:

а, б – физическая и модельная схема; в – графики приведенных напоров; з – графики для оценки перемещения контура обводненности



задачи удастся линеаризовать по проводимости одним из трех способов: а) введением модели пласта с неизменной проводимостью – для двухслойного безнапорного пласта; б) заменой переменных вида (4.8) – для однородного безнапорного пласта с горизонтальным водоупором; в) введением функции Гиринского – для упорядоченно слоистого пласта [см. формулу (4.10)].

Вместе с тем для некоторых нестационарных процессов ни один из упомянутых способов не дает удовлетворительных результатов. Прежде всего здесь следует отметить следующие задачи:

а) о постепенном истощении участка водоносного пласта на горизонтальном водоупоре, оконтуренного со всех сторон дренирующими границами;

б) о постепенном истощении участка пласта на наклонном водоупоре, заключенного между дренирующей границей и выходом пласта на поверхность (в этом случае от понижения напора зависит не только проводимость, но и положение границы обводненности пласта; рис. 4.3);

в) о напорно-безнапорном движении – предельный вариант нелинейного (по емкости) процесса (на перемещающейся границе зон безнапорного и напорного движения емкость меняется от гравитационной до упругой).

В последнем случае, правда, возможно использование некоторых схематизационных приемов. Так, в стационарном варианте вопрос о расчете водопритоков решается заменой переменных [7], сводящей движение к безнапорному случаю. Кроме того, для фильтрации, близкой к плоскопараллельной, при больших зна-

чениях параметра  $A = \frac{m}{H_0 - m} \sqrt{\frac{\mu}{\mu^*}}$  (порядка  $A > 10$ ) можно вообще не учитывать наличия напорной зоны, а при малых  $A$  (порядка  $A < 0,1$ ) – игнорировать безнапорную зону ( $\mu$  – гравитационная водоотдача пород).

### 4.3. РАСЧЕТ ФИЛЬТРАЦИИ К ГОРНЫМ ВЫРАБОТКАМ

Если схематизация (см. разд. 4.2) позволяет привести реальные условия к *типовой расчетной схеме*, то прогнозные оценки водопритоков в горные выработки базируются преимущественно на аналитических зависимостях, а моделирование играет лишь вспомогательную роль.

При расчетах широко используется способ "большого колодца":

$$Q = \frac{2\pi TS_K}{\ln(R/r_K)}, \quad (4.17)$$

где  $r_K$  – расчетный радиус выработки (см. разд. 4.2).

Этим способом можно пользоваться при выполнении условий  $\delta_K/R^* > 0,1$  (где  $\delta_K$  – минимальное расстояние от контура дрены до контура питания). Для дрен больших размеров (котлованы; траншеи) должно, кроме того, выполняться соотношение  $\delta_K/d > 0,5$  (где  $d$  – максимальный размер выработки или дренажного контура в плане).

Приведение к "большому колодцу" – удобный и эффективный при-

ем, позволяющий легко определить величину общего водопритока в типовых условиях (см. разд. 4.5, пример 2). Вместе с тем расчет по формуле "большого колодца" обычно не исключает необходимости определения притоков по отдельным участкам карьерного поля, так как в общем случае распределение притоков по периметру карьера весьма неравномерно. Для расчета уровней формула "большого колодца" может использоваться только при осесимметричном движении. В формулу "большого колодца" входит величина условного радиуса влияния (питания). Этот параметр является расчетной величиной, подстановка которой в формулу "большого колодца" позволяет получить "точное" значение водопритока.

В пластах с фиксированными границами для условного радиуса влияния (питания)  $R$  при установившейся фильтрации получены аналитические выражения для некоторых простейших (типовых) граничных условий (табл. 4.1).

Величина условного радиуса влияния при неустановившемся режиме  $R(t)$  может использоваться для определения величин водопритоков при заданном понижении на контуре дренажа пока выполняется условие  $R(t) < R^*$  (где  $R^*$  — расстояние до ближайшей границы пласта). При постоянном уровне на контуре дренажа величина  $R(t)$  рассчитывается по формуле (4.1). Если понижение на контуре дренажа меняется по закону  $S = bt^\alpha$  (где  $b$  и  $\alpha$  — постоянные величины), то

$$R(t) = r_k + \sqrt{\frac{\pi + 4\alpha}{(1 + 2\alpha)^2} \cdot a^* t} \quad (4.18)$$

В условиях плоского одномерного потока можно пользоваться формулами (4.1) и (4.18) при  $r_k = 0$ .

Притоки к *взаимодействующим* выработкам в типовых условиях при *стационарной фильтрации* также могут рассчитываться способом "большого колодца". Для этого, согласно принципу суперпозиции, решается система уравнений вида (4.17), записанных для каждой выработки. Во всех прочих случаях необходимо привлечение моделирования (только для построения лент тока или определения всех искомых величин на модели).

Расчеты установившейся фильтрации могут вестись и по выделенным лентам тока, в частности после приведения их к плоским (см. разд. 4.2); в последнем случае основной расчетной зависимостью служит формула (4.16). Пример такого расчета приведен в разд. 4.5 (см. пример 3).

При *неустановившемся движении* приближенный расчет водопритоков также может быть произведен по характерным лентам тока на основании принципа недеформируемых линий тока (см. разд. 4.2).

Таблица 4.1

Условия питания и стока водоносного горизонта	Схема	Выражение для определения $R$
Выработка у реки (у линейной границы с постоянным напором)		$R = 2L$
Выработка в углу между двумя границами с постоянным напором		$R = \frac{2L L_0}{\sqrt{L^2 + L_0^2}}$
Выработка в углу между границей с постоянным напором и непроницаемой границей		$\frac{R}{+1} = 2L \sqrt{\frac{L^2}{L_0} + \dots}$

Условия питания и стока водоносного горизонта	Схема	Выражение для определения $R$
Выработка между двумя границами с постоянным напором		$R = \frac{2}{\pi} L_0 \times \sin \frac{\pi L}{L_0}$
Выработка между границей с постоянным напором и непроницаемой границей		$R = \frac{4}{\pi} L_0 \times \operatorname{tg} \frac{\pi L}{2 L_0}$

Расчет ведется в определенной последовательности (см. разд. 4.5, пример 4):

1) методом ЭГДА или графически строится "сетка движения", отвечающая установившемуся режиму фильтрации, и выделяются характерные расчетные ленты тока;

2) для первых этапов движения, пока влияние границ пласта практически не сказывается на величинах водопритокков, для расчета можно использовать формулу (4.17). При  $t > t_0 = (R^*)^2 / (\pi a^*)$  расчет производится по выделенным лентам тока;

3) по формуле (4.1) определяется положение условного контура питания в пределах ленты для нескольких характерных моментов време-

ни  $t_1, t_2, \dots, t_n$  (где  $t_1 = t_0$ ;  $t_n$  находится из условия  $R(t_n) = L_d$ ;  $L_d$  — расстояние от карьера до внешней границы ленты, взятое по средней линии тока);

4) выделенные таким образом участки ленты тока, имеющие длины  $R(t_1), R(t_2), \dots, R(t_n) = L_d$  (начало отсчета — на контуре карьера), приводятся к плоским посредством введения фиктивных длин пути фильтрации  $R_p(t_i)$  (см. разд. 4.2);

5) расчет притока к карьере в пределах ленты на момент  $t_i < t_n$  ведется по формуле

$$Q_{t_i} |_{t_i < t_n} = T \frac{H_{t_i} - H_2}{R_p(t_i)} B_k, \quad (4.19)$$

где  $H_{t_i}$  — естественный напор потока на условном контуре питания;

$B_k$  — ширина ленты по контуру карьера;

6) при  $t \geq t_n$  для расчета в пределах ленты используют формулу

$$Q_t |_{t \geq t_n} = T \frac{H_1 - H_2}{L_p} B_k; \quad (4.19a)$$

7) при заданном постоянном напоре  $H_1$  на внешней границе ленты, причем  $L_p = R_p(t_n)$ .

В тех случаях, когда требуется повышенная точность расчета, целесообразно находить положение линий тока на несколько моментов времени посредством моделирования. Учет дополнительной инфильтрации и перетекания также требует привлечения моделирования. Однако при установлении притоков к горным выработкам не следует стремиться к детальному учету перетекания в условиях неустановившегося режима фильтрации, так как, с одной стороны, точность определения расчетных параметров перетекания обычно невысока, а с другой стороны, если перетекание имеет существенное значение (о чем можно судить из приближенных оценок — см. разд. 1.1.4), то сравнительно быстро наступает установившийся режим фильтрации.

Рассмотренный выше метод применим лишь для расчета притоков и не может использоваться при определении уровней. Для их оценок, а также для более точного установления водопритокков следует проводить моделирование в двумерной нестационарной постановке (аналоговая схема Либмана или численные модели), исходя из метода конечных разностей. Проиллюстрируем возможности моделирования на некоторых частных задачах.

1. *Перемещение контура горных выработок в плане* может существенно определять закономерности нестационарного режима фильтрации. При большой скорости перемещения этот фактор может вызывать рост водопритокков на десят-

ки, а иногда и на сотни процентов. Движение контура горных выработок учитывают моделированием на сеточных электрических моделях, в которых отдельные сопротивления отключаются в соответствии с перемещением границы дренажа. Для приближенного учета этого фактора можно применять моделирование по отдельным лентам тока, опираясь на принцип их недеформируемости.

2. Водоемы и водотоки (естественные и техногенные), подстилаемые даже слабопроницаемыми отложениями, могут быть источником *дополнительного питания* водоносных горизонтов, усиленно дренируемых при проходке горных выработок<sup>1</sup>. Для учета этого фактора в общем случае требуется применение двумерных сеточных электрических или численных моделей. Аналогичный подход может быть использован при анализе перетекания по площади дренируемого водоносного горизонта, не вскрытого горной выработкой.

3. Специального рассмотрения заслуживают прогнозные оценки водопритокров в условиях *нелинейных фильтрационных процессов*, весьма характерных для осушения многих карьерных полей. В первую очередь это все задачи, связанные с прогнозом постепенного истощения отдельных участков водоносных комплексов. Такие условия возникают, например, при осушении безнапорных горизонтов дренажными траншеями, отделяющими рассматриваемый участок пласта от области питания. Процесс нелинейной неустановившейся фильтрации описывается при этом уравнением Буссинеска [7, 17], причем линеаризацию его можно проводить лишь с большими оговорками, так как трудно подобрать усредненные значения проводимости или мощности, удовлетворяющие всему расчетному периоду. В этом случае наиболее надежно моделирование по схеме Либмана, когда в процессе моделирования изменение проводимости (мощности) безнапорного потока учитывается путем изменения сопротивлений  $R_x$  и  $R_y$  между узловыми точками при стабильной величине "временных" сопротивлений (для случая постоянной водоотдачи осушаемого пласта). Пересчет сопротивлений  $R_x$  и  $R_y$  производят от шага к шагу по формулам

$$R_{x,i} = \frac{\Delta x_i}{k_i \Delta y_i h_i^{cp} a_{\phi}}; \quad R_{y,i} = \frac{\Delta y_i}{k_i \Delta x_i h_i^{cp} a_{\phi}}, \quad (4.20)$$

где  $\Delta x_i$  и  $\Delta y_i$  — параметры сетки;  $k_i$  — коэффициент фильтрации в  $i$ -й точке;  $h_i^{cp}$  — средняя глубина потока между  $i$ -й точкой и соседними с нею в расчетный момент времени;  $a_{\phi}$  — масштаб сопротивлений.

Подбор сопротивлений  $R_x$  и  $R_y$  на каждом шаге по времени осуществляется до тех пор, пока потенциалы в узловых точках не будут соответствовать значениям мощности потока  $h_i$ .

4. Приведем более сложный пример определения водопритокров, формирующихся за счет сработки емкостных запасов подземных вод в плано-ограниченных безнапорных пластах с наклонным водоупором. Вообще говоря, задачи такого типа следует решать с применением двумерных сеточных моделей: сведение к одномерным задачам с помощью принципа недеформируемых лент тока может иметь здесь лишь ограниченное применение, поскольку в подобных условиях положение линий тока обычно сильно меняется во времени. Однако для простоты мы ограничимся рассмотрением одномерного варианта задачи о вскрытии и постепенном истощении безнапорного пласта с наклонным водоупором, когда необходимо учитывать сразу

<sup>1</sup> В частности, естественные водотоки после проходки карьера нередко претерпевают инверсию: из областей стока они превращаются в области питания.

два фактора нелинейности – изменение мощности пласта и перемещение его контура обводненности в плане (см. рис. 4.3). Моделирование процесса сработки емкостных запасов было проведено [2] по схеме Либмана с изменением сопротивлений  $R_{x, t}$  пропорционально глубине потока  $h_i^{cp}$  от одного временного шага к другому. Движение границы обводненности воспроизводится изменением пограничных сопротивлений – “временного”  $R_{t, r}$  и пространственного  $R_{x, r}$  – пропорционально изменению длины пограничного блока  $\Delta x_r$ ; по мере движения контура обводненности граничные сопротивления постепенно отключались (на рис. 4.3 граничному блоку на текущий момент  $t$  отвечает точка 7). По результатам моделирования построены графики в безразмерных координатах, позволяющие проводить оценку изменения напоров потока и перемещения его внешней границы (см. рис. 4.3).

Из последнего примера видно, что моделирование позволяет не только решить конкретные сложные задачи фильтрации, но и найти для них обобщенные оценки, аналогичные получаемым в рамках аналитических решений.

Все рассмотренные выше подходы в равной мере пригодны для оценки водопритоков как к открытым, так и к подземным горным выработкам. Специфика последних связана, пожалуй, только с двумя моментами:

- 1) с необходимостью учета техногенных нарушений сплошности водоупоров над выработанным пространством, приводящих к резким изменениям вертикальной проницаемости в зоне подработки, особенно при системах с полным обрушением кровли (см. разд. 3.2);
- 2) с возможностью сохранения избыточных напоров (“нависания”) в кровле выработок.

Остановимся в этой связи на специфике расчета притоков к подземным (горизонтальным) выработкам при наличии “нависания” (рис. 4.4). По своей сути расчет этой задачи аналогичен расчету выработок, несовершенных по степени вскрытия пласта: она требует обязательного учета вертикальной составляющей скорости фильтрации вблизи выработки, для чего может использоваться метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений. Для предварительной оценки

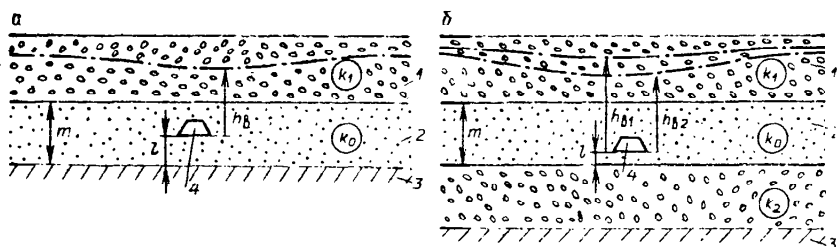


Рис. 4.4. Схемы к расчету притоков к дренажному штреку при наличии “нависания”:

1 – галечник; 2 – мелкозернистый песок; 3 – глина; 4 – горная выработка

наличия "нависания" над выработкой высотой  $h_{\text{в}}$  можно использовать условие [2]

$$h_{\text{в}} < 0,22 q_0 / k_0, \quad (4.21)$$

где  $q_0$  — удельный (двусторонний) приток к выработке, подсчитанный без учета нависания;  $k_0$  — коэффициент фильтрации пород вмещающих выработку.

"Нависание" весьма характерно, например, для подготовительных выработок (штреков), которые чаще всего проходятся по породам, проницаемость которых заметно ниже, чем перекрывающих пород.

Для приближенных расчетов водопритоков к одиночному штреку при наличии нависания можно использовать следующие зависимости:

а) для случая, изображенного на рис. 4.4, а (при выполнении соотношения  $k_1/k_0 > 20-30$ , когда штрек практически не оказывает дренажного эффекта на верхний горизонт):

$$q = \frac{k_0 h_{\text{в}}}{0,37 \lg \left[ \frac{\pi}{8} \frac{4 l_1 - d_1}{m} \right] \operatorname{ctg} \left( \frac{\pi}{8} \frac{d}{m} \right)}, \quad (4.22)$$

где  $l_1 = m - l$  — приведенный диаметр штрека;

б) для случая, представленного на рис. 4.4, б (при  $k_2/k_0 > 20-30$ ):

$$q = k_0 \frac{(h_{\text{в}1} - h_{\text{в}2}) \frac{l}{m} + h_{\text{в}2} - l - m_2}{0,37 \lg \left[ \frac{4}{\pi} \frac{m}{d} \cos \frac{\pi(2l - m)}{2m} \right]}. \quad (4.23)$$

При меньших соотношениях проницаемости рекомендуется использовать аналоговое моделирование в профильной постановке, а для ориентировочных расчетов можно вводить усредненный коэффициент фильтрации толщи (см. разд. 4.2).

Главная трудность здесь обычно заключается в отсутствии необходимых исходных данных о вертикальной проницаемости пород, особенно, когда речь идет об очистных выработках с техногенно нарушенной кровлей (см. разд. 3.2). Из-за этого часто приходится определять притоки с запасом, полагая вертикальную проницаемость пород в зоне водопроводящих трещин (ЗВТ) неограниченной и задавая на плановом контуре подработанной зоны граничное условие первого рода (напор, соответствующий отметке почвы данного водоносного пласта, в пределах ЗВТ).

#### 4.4. ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ДРЕНАЖНЫХ СКВАЖИН

Дренажные скважины могут работать с заданным расходом или с заданным напором (см. разд. 4.1) поэтому рассмотренные ниже методы расчета дифференцируются в зависимости от граничных условий на сква-



жинах. При расчетах в качестве первого ориентира используются результаты предварительных упрощенных оценок (см. разд. 1.1.4), которые базируются на заданных требованиях к дренажу; как уже отмечалось, эти требования формулируются по допустимому напору (необходимому понижению) или по допустимому притоку в выработку.

#### 4.4.1. Расчеты установившейся фильтрации в типовых условиях

Связь расхода одиночной скважины и уровня в ней описывается формулой вида (4.17), которую можно записать в следующем виде:

$$Q_c = T S_c / f_c^0, \quad (4.24)$$

где  $S_c = H_{oc} - H_c$  — понижение в скважине (здесь  $H_{oc}$  и  $H_c$  — соответственно первоначальный и сниженный напоры в точке заложения скважины);  $f_c^0$  — функция понижения для скважины (табл. 4.2).

Расчет системы отдельно стоящих скважин при заданных их дебитах ведется по формуле, получаемой из выражения (4.24) сложением течений:

$$S = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n Q_{ci} f_{ci}, \quad (4.25)$$

где  $n$  — число скважин;  $Q_{ci}$  — дебит  $i$ -й скважины;  $f_{ci}$  — функция понижения от действия  $i$ -й скважины для расчетной точки.

Функцию понижения, как для любой скважины, так и для произвольной точки пласта, находят путем сложения эффектов реальных скважин и их отражений от границ [7]; частные значения  $f_c$  даны в табл. 4.2.

Для скважин с заданным расходом обязательна проверка условия (4.4); при

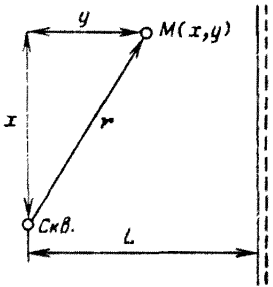
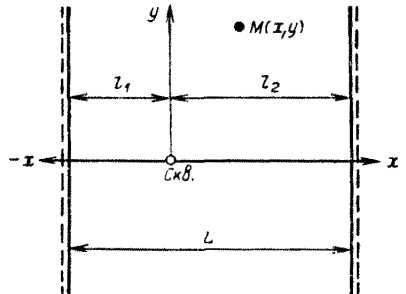
$$S_c > S_{\max} \quad (4.26)$$

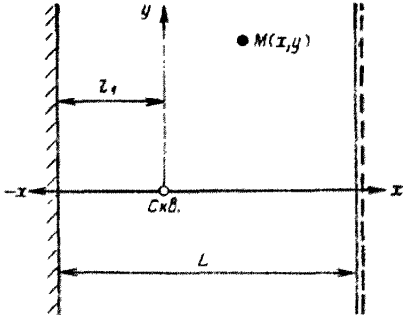
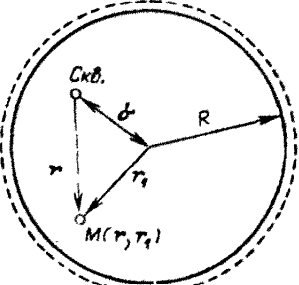
скважина переходит на режим работы с постоянным уровнем.

---

<sup>1</sup> Приводимые в разд. 4.4 формулы можно применять и для расчета наклонных скважин, пройденных с отклонением до  $75^\circ$  от вертикали. Формулы для расчета горизонтальных скважин можно найти в работе [2].

Таблица 4.2

Условия питания и стока водоносного горизонта	Схема	Функция понижения	
		для скважины $f_c^0$	в любой точке $f_c$
В полуограниченном пласте (линейная граница с постоянным напором)		$f_c^0 = 0,367 \lg \frac{2L}{r_c}$	$f_c = 0,367 \times \lg \sqrt{\frac{4L^2 - 4Ly + r^2}{r}}$
Между двумя границами с постоянным напором		$f_c^0 = 0,367 \times \lg \left[ \frac{2L}{\pi r_c} \times \cos \frac{\pi(l_1 - l_2)}{2L} \right]$	$f_c = \theta(\bar{x}, 2\bar{l}_1 + \bar{y}) - \theta_x(\bar{x}, \bar{y})$ $\bar{l}_1 = \frac{l_1}{L}; \bar{x} = \frac{x}{L}; \bar{y} = \frac{y}{L}$

Условия питания и стока водоносного горизонта	Схема	Функция для скважины $f_c^0$	понижения в любой точке $f_c$
Между областью питания и непроницаемой границей		$f_c^0 = 0,367 \times$ $\times \lg \left[ \frac{4L}{\pi r_c} \times \right.$ $\times \operatorname{ctg} \frac{\pi l_1}{2L} \left. \right]$	$f_c = \theta_1 (\bar{x}, \bar{l}_1 + \bar{y}) + \theta_1 \times$ $\times (\bar{x}, [\bar{l}_1 - \bar{y}])$ $\bar{l}_1 = \frac{l_1}{L}; \quad \bar{x} = \frac{x}{L};$ $\bar{y} = \frac{y}{L}$
В круговом пласте с постоянным напором на контуре		$f_c^0 = 0,367 \times$ $\times \lg \frac{R^2 - \delta^2}{R r_c}$	$f_c = 0,367 \times$ $\times \lg \frac{\sqrt{R^2 + \frac{r_1^2 \delta^2}{R^2} + r^2 - r_1^2}}{r}$

Примечание. Значения  $\theta$  определяют по номограммам, приведенным на рис. 4.5.

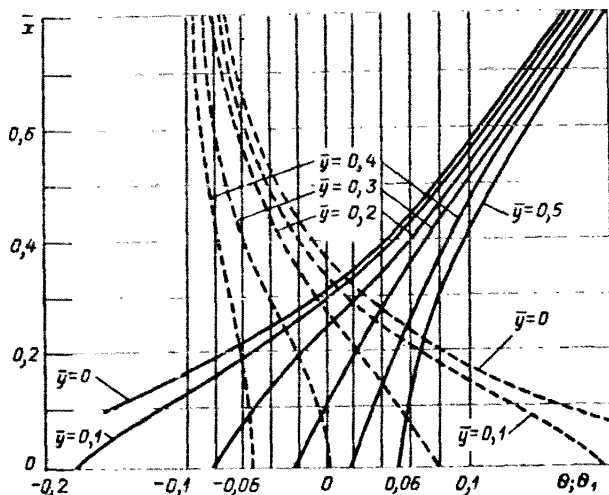


Рис. 4.5. Графики функций  $\theta$  (пунктир) и  $\theta_1$  (сплошные линии)

При заданных уровнях скважин их дебиты рассчитывают, решая систему

$$-\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n Q_{ci} f_{ci}^0 = S_{ci}. \quad (4.27)$$

При большом числе скважин в этом случае расчет проще всего вести на основании моделирования.

Расчет контурных систем скважин осуществляется с помощью предварительного построения лент тока (см. разд. 4.2), после чего используются простейшие зависимости для ряда скважин в полосообразном пласте.

Особо отметим следующие важные частные случаи:

1) прямолинейный ряд скважин с одинаковыми уровнями вблизи прямолинейного контура питания (стока), параллельного ряду (например, вблизи реки):

$$Q_c = \frac{T S_c}{0,367 \lg \frac{\bar{a}}{2\pi r_c} + \frac{L}{\sigma}}, \quad (4.28)$$

где  $L$  – расстояние от скважин до контура питания;

2) прямолинейный ряд скважин с одинаковыми уровнями между двумя параллельными границами с постоянными напорами (ряд между контуром с напором  $H_1$  и совершенной выработкой с напором  $H_2$ ):

$$Q_c = \frac{T S_c}{0,367 \lg \frac{\sigma}{2\pi r_c} + \frac{l}{\sigma L} \frac{l_1 l_2}{L}}; \quad (4.29)$$

$$q_0 = \frac{T(H_1 - H_2)}{L} - \frac{Q_c l_1}{\sigma(l_1 + l_2)}, \quad (4.30)$$

где  $S_c = H_{oc} - H_c$  (здесь  $H_{oc}$  — напор на линии ряда скважин с учетом дренающего действия выработки);  $l_1$  — расстояние от скважин до контура питания;  $q_0$  — удельный "проскок" между скважинами;

3) круговая система равнодебитных скважин, оконтуривающих "сухую" несовершенную выработку в круговом пласте с радиусом  $r_k$ :

$$Q_c = \frac{2,73 T S_c}{\lg \left( \frac{R^n}{n r_k^{n-1} r_c} \right)}. \quad (4.31)$$

Во всех трех случаях для определения понижения в любой точке пласта целесообразно предварительно заменить дренажный контур фиктивной совершенной границей в соответствии с формулой (4.14), а затем вести расчет по формуле (4.16) для первого и второго случаев или по формуле (4.17) для третьего.

#### 4.4.2. Расчеты установившейся фильтрации в сложных условиях

Для скважин с заданным расходом следует предварительно с помощью моделирования определить функции понижения для каждой скважины или характерных участков контура. Затем расчет ведется аналогично изложенному в разд. 4.4.1. Важно отметить, что если защищаемая горная выработка является контуром дренажа, то первоначальные напоры в точках заложения скважин определяют (расчетом или на модели) заранее, исходя из ее дренажного эффекта. Для скважин с заданным понижением проще устанавливать характеристики потока непосредственно на модели.

Рассмотрим упрощенный метод расчета для контурных и линейных систем скважин, когда моделирование (ЭГДА) используется лишь при

построении ориентировочной сетки движения. Расчет ведется по выделенным лентам тока (см. разд. 4.2), для построения которых отметка уровней на участке дренажного контура примерно принимается равной отметке дна выработки — для несовершенных "сухих" выработок; отметке водоупора — для совершенных незатопленных выработок; отметке воды в выработке — для затопленных выработок. Расчет в пределах каждой ленты тока, предварительно приведенной к плоской, осуществляется по соответствующим формулам для рядов скважин в полуограниченном или полосообразном пласте (см. разд. 4.4.1). После такого расчета по формуле (4.14) определяют средние уровни на контуре скважин, затем вновь проводят построение лент тока при этих уточненных уровнях и повторяют расчет. Обычно второго приближения оказывается достаточно для получения надежного результата.

Цель и порядок расчета подобных — контурных или линейных — рядов скважин во многом зависят от гидродинамических условий защищаемой горной выработки.

Для скважин, расположенных вблизи *несовершенных выработок*, когда обычным является условие достижения требуемого понижения, расчет чаще ведется по заданным значениям расхода с проверкой условия (4.4). Аналогично проводят расчеты для скважин при обратном (в сторону от карьера) падении слоев — по условию полного устранения высачивания на откосе при работе дренажа.

В частности, пользуясь методом фильтрационных сопротивлений, можно показать, что для случая  $h_c = 0$  такая возможность реализуется при выполнении требования

$$\frac{1}{2\pi} \sigma \ln \frac{\sigma}{2\pi r_c} \leq i \frac{l_1 l_2}{H_1 - H_k}, \quad (4.32)$$

где  $\sigma$  — расстояние между скважинами;  $i$  — уклон водоупора; остальные обозначения см. на рис. 2.7.

Отсюда следует, что требуемое число скважин оказывается в данном случае примерно обратно пропорциональным углу падения слоев (при предположении, что расходы скважин не лимитируются их водозахватной способностью или производительностью насосов).

Чаще всего для скважин, расположенных вблизи *совершенных выработок* (сюда же относится случай несовершенного затопленного котлована), обычным является ограничение по предельно допустимому удельному притоку в выработку, так что расчет при заданных, как правило, предельных, понижениях в скважинах, ведется в следующем порядке (для выделенных лент тока):

1) задаваясь различными величинами  $\sigma$ , определяем  $Q_c$  по формуле (4.29) и строим график  $Q_c = f(\sigma)$ ;

2) с графика  $Q_c = f(\sigma)$  снимаем несколько парных значений  $Q_c$  и  $\sigma$ , после чего строим график  $q_0 = f(\sigma)$ , причем  $q_0$  вычисляем по формуле (4.30);

3) исходя из допустимых значений  $q_0$  или из принятого коэффициента заслона [см. формулу (4.5)] и пользуясь графиком, приведенным на рис. 4.1, находим требуемую величину  $\sigma$ , а затем по графику  $Q_c = f(\sigma)$  подбираем соответствующее значение  $Q_c$ .

Для расчета большого числа взаимодействующих рядов скважин целесообразно привлекать метод фильтрационных сопротивлений. При этом последовательность расчета следующая (см. разд. 4.5, пример 5):

1) линии скважин заменим эквивалентными траншеями с уровнями на них  $H_\Phi$  [см. формулу (4.14)] и удельным притоком  $q = Q_c/\sigma$ ;

2) запишем выражения для расхода потока в зонах между рядами и границами потока, а также между отдельными рядами, которые рассматриваются как траншеи;

3) составим уравнения баланса потока на линиях траншей;

4) балансовые уравнения и уравнения типа (4.14) образуют систему, из которой могут быть найдены все необходимые элементы потока. Если заданы дебиты и расстановка скважин, то по балансовым уравнениям находим величины уровней на линиях скважин  $H_\Phi$ , а затем по формуле (4.14) — уровни в скважинах  $H_c$ . Если заданы уровни в скважинах и их расстановка, то из системы сначала исключаем неизвестные величины уровней на линиях скважин  $H_\Phi$ , а затем определяем неизвестные расходы скважин  $Q_c$ .

До сих пор основную роль в расчетах контурных и линейных систем скважин играли аналитические методы. Рассмотрим теперь общий случай расчета таких систем, который наиболее просто проводится подбором на аналоговой модели. В частности, для определения оптимального размещения скважин в пределах дренажного контура, окружающего совершенную выработку, моделирование рекомендуется выполнять в следующем порядке [2]:

1) строим сетку движения для области между контуром скважин и карьером. Выделенные ленты тока приводим к плоским (см. разд. 4.2).

2) исходя из допустимых притоков к выработке, определяем допустимый напор на линии ряда скважин для всех выделенных лент (по формулам для плоского одномерного потока);

3) каждый из выделенных участков контура моделируем шиной с подключенным к ней переменным сопротивлением  $R_{k_i}$ , на вершину которого подаем потенциал, соответствующий уровням на скважинах участка. Величину  $R_{k_i}$  изменяем до тех пор, пока потенциалы на шинах не будут соответствовать подсчитанным величинам  $H_{\Phi i}$ , ориентировочная максимальная величина определяется по формуле  $R_{k_i} = \rho \sigma_i / B_i$  (где  $\rho$  — удельное сопротивление бумаги;  $\sigma_i$  — ориентировочное максимальное расстояние между скважинами участка;  $B_i$  — длина участка контура);

4) рассчитываем суммарный дебит в пределах участка, исходя из полученных значений сопротивлений  $R_{k_i}$ :

$$Q_{yi} = \frac{H_1 - H_2}{a_\Phi R_{k_i}}, \quad (4.33)$$

где  $H_1$  и  $H_2$  – значения напора, отвечающие потенциалам на концах сопротивлений  $R_{\Phi i}$ ;  $\alpha_{\Phi}$  – масштаб сопротивлений;

5) расстояния между скважинами  $\sigma_i$  определяем из выражения

$$R_{\Phi i} = \frac{\sigma_i \rho}{2\pi B_i} - \ln \frac{\sigma_i}{2\pi r_c}, \quad (4.34)$$

непосредственно вытекающего из формулы (4.14) и общего определения фильтрационного сопротивления [7].

Особые сложности возникают в связи с необходимостью смены граничных условий на водопонижающих контурах в зависимости от понижения уровней. Условия второго рода ( $Q = \text{const}$ ) задаются на участках контура до тех пор, пока выполняется неравенство [см. формулу (4.14)]

$$H_{\Phi} > \frac{Q_c}{2\pi T} - \ln \frac{\sigma}{2\pi r_c}. \quad (4.35)$$

Как только неравенство (4.35) перестает выполняться, скважины переводят на режим работы с постоянным понижением.

#### 4.4.3. Расчеты неустановившейся фильтрации

Для скважин с постоянным расходом в типовых условиях основной является формула

$$S = \frac{Q_c}{T} f_c(t), \quad (4.36)$$

где  $f_c(t)$  – функция понижения при неустановившемся режиме (табл. 4.3).

Для определения функции понижения в самой скважине следует принимать  $r = r_c$  и  $y = 0$ .

Расчет группы отдельно стоящих скважин производят, исходя из формулы (4.36), согласно принципу сложения течений:

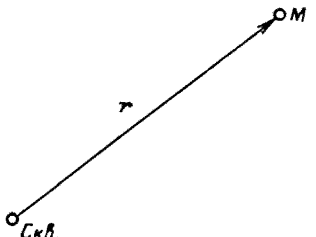
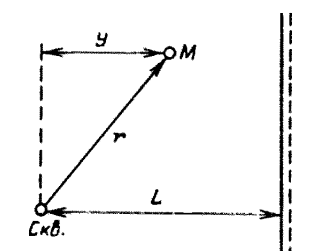
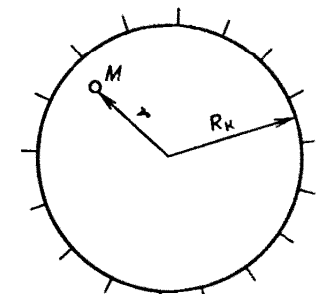
$$S = \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^n Q_{ci} f_{ci}(t), \quad (4.37)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots$  – номера скважин.

Расчет водопонижающих контуров, приведенных к "большим колодцам" (с радиусом  $r_k$ ) можно производить по формуле (4.36) при замене



Таблица 4.3

Условия питания и стока водоносного горизонта	Схема	Выражение для $f_c(t)$
Скважина в неограниченном пласте		$f_c(t) = -\frac{1}{4\pi} E_i \left( -\frac{r^2}{4a^*t} \right)$
Скважина у прямолинейного контура питания		$f_c(t) = \frac{1}{4\pi} \left[ E_i \left( -\frac{4L^2 - 4Ly}{4a^*x} + \frac{r^2}{x t} - E_i \left( -\frac{r^2}{4a^*t} \right) \right) \right] \text{ при } \frac{L^2}{4a^*t} > 0,5$
Скважина в пласте с круговым непроницаемым контуром		$f_c(t) = \frac{1}{2\pi} \left( -\frac{2a^*t}{R_k^2} + \ln x \times \frac{R_k}{r} - 0,75 + 0,5 \frac{r^2}{R_k^2} \right)$

$Q_c$  на общий расход установки  $Q_\Sigma$ , определяемый по формуле

$$Q_\Sigma = \frac{T[H_0 - H_2(t)]}{f_K(t)}, \quad (4.38)$$

где  $H_0$  и  $H_2(t)$  — первоначальный и требуемый (на момент  $t$ ) сниженный напор в центре установки;  $f_K(t)$  — функция понижения:

$$f_K(t) = -\frac{1}{4\pi} \left[ E_i\left(-\frac{r_K^2}{4a^*t}\right) - E_i\left(-\frac{R^2}{4a^*t}\right) \right], \quad (4.39)$$

здесь  $R$  находят по табл. 4.1.

Приток  $Q_\Sigma$  складывается из притоков изнутри  $Q_{вн}$  и извне  $Q_{нр}$ , соотношение которых описывается формулой

$$\frac{Q_{вн}}{Q_{нр}} = \frac{1 - \exp[-r_K^2/(2a^*t)]}{1 + \exp[-r_K^2/(2a^*t)]}. \quad (4.40)$$

При  $a^*t/r_K^2 > 3,5$  можно считать  $Q_\Sigma = Q_{нр}$ .

Приближенные расчеты для скважин с заданным напором, расположенных по некоторому контуру, можно проводить после выделения характерных лент тока по формулам установившегося движения, подставляя в них "установившийся радиус влияния", определяемый по формуле (4.1).

В прочих случаях, а также для уточнения результатов расчетов по лентам тока следует прибегать к моделированию в двумерной плановой постановке с помощью метода конечных разностей на аналоговых или численных моделях.

В заключение подчеркнем, что при расчетах дренажных систем участки водоносных пластов, прилежащие к горным выработкам, чаще всего "работают" в безнапорном режиме, поэтому приведенные выше зависимости должны для таких участков записываться в безнапорной модификации путем замены характеристик потока согласно выражению (4.8).

#### 4.5. ПРИМЕРЫ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ

Приведенные ниже примеры не только иллюстрируют применение рассмотренных выше приемов и зависимостей, но и дают некоторые дополнительные частные решения.

**Пример 1.** Приближенный<sup>1</sup> расчет системы водопонижающих скважин (см. разд. 1.1.3), обеспечивающей нормальные условия работы

<sup>1</sup> Методика уточняющего расчета дана в примере 5.

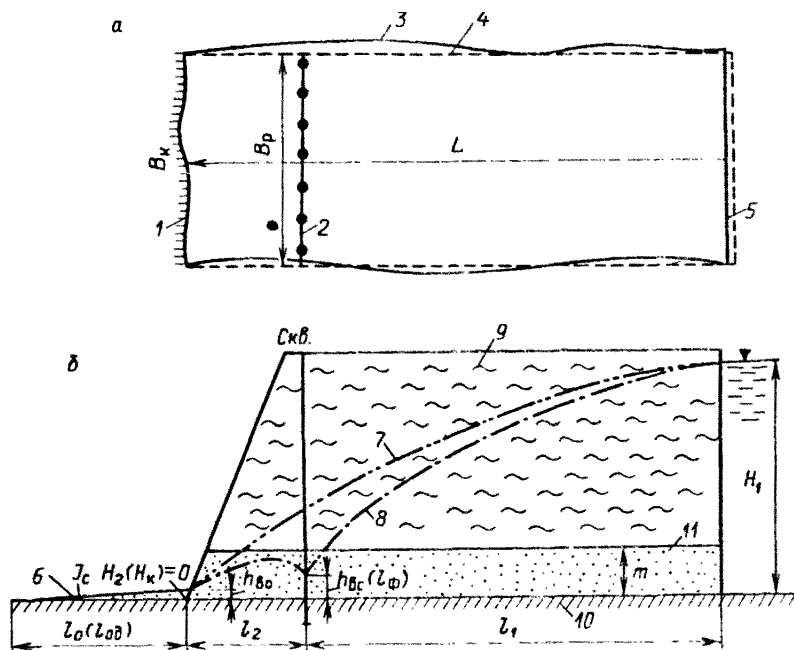


Рис. 4.6. Схема к приближенному расчету ряда водопонижающих скважин вблизи карьера:

*a* — характерная лента тока; *б* — схематический разрез вдоль осевой линии ленты. 1 — контур карьера; 2 — ряд водопонижающих скважин; 3, 4 — реальная и схематизированная боковые границы ленты тока; 5 — контур питания (приведенный к совершенному); 6 — язык оплывания; 7, 8 — пьезометрическая кривая при отсутствии дренажа и при работе водопонижающих скважин; 9, 10 — верхний и нижний водоупоры; 11 — дренируемый водоносный пласт

**экскаваторов в карьере.** Будем полагать, что такие условия обеспечиваются при должном ограничении процессов оплывания песков (см. разд. 1.2 и 2.3), обрабатываемых экскаваторами. Кроме всего прочего это предположение позволит ознакомиться с методикой прогноза упомянутого процесса.

Определим требуемое число скважин на участке контурного дренажа при следующих исходных данных:  $k=10$  м/сут;  $m=10$  м;  $H_1=125$  м;  $H_2=0$  м;  $B_k=550$  м;  $l_1=1100$  м;  $l_2=300$  м;  $L=1400$  м;  $d_c=0,3$  м. В качестве критерия для расчета примем значение допустимой длины языка оплывания песков  $l_{0\phi}=5$  м, угол трения песков  $\rho=34^\circ$  и средний диаметр зерен  $d_{50}=0,25$  мм (рис. 4.6).

Для решения задачи предварительно строится сетка движения (например, методом ЭГДА и выделяются характерные ленты тока. Одна из таких лент показана на рис. 4.6, *a*. В пределах этой ленты располагается часть проектируемого дренажного контура, которую и требуется рассчитать (аналогичные оценки проводятся и для других лент).

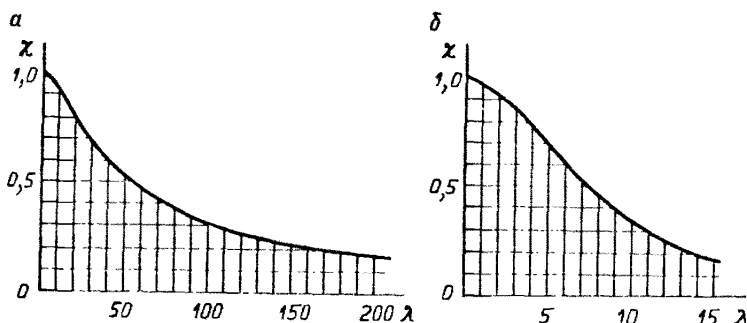


Рис. 4.7. Графики  $\chi = f(\lambda)$ :

а —  $q_0 \leq 7 \text{ м}^3/\text{сут на 1 м}$ ; б —  $q_0 > 7 \text{ м}^3/\text{сут на 1 м}$

Движение подземных вод в пределах ленты практически одномерное, так что крайние линии могут быть схематизированы параллельными линиями<sup>1</sup>; значит, расчетная ширина ленты  $B_p = B_k = 550 \text{ м}$ .

Далее расчеты производятся в следующем порядке.

1. Определяем предельно допустимый (с точки зрения фильтрационных деформаций оплывания) установившийся расход потока  $q_0$ , выходящего на откос. Для этого строим график связи расчетной длины языка оплывания  $l_0$  с расходом, выходящим на откос  $q_0$ , по методике, предложенной В.М. Шестаковым [2, 16]:

а) задаемся рядом произвольных значений  $q_0$  (например, 2; 1,5 и  $1 \text{ м}^3/\text{сут на 1 м}$  простираия откоса);

б) для каждого значения  $q_0$  оцениваем средний уклон  $I_c$  зоны оплывания (см. рис. 4.6, б) по формуле  $I_c = \chi \cdot \text{tg } \rho/2$ , где  $\chi = f(\lambda)$  определяется по графику,

приведенному на рис. 4.7, а;  $\lambda = \sqrt[3]{q_0/d_{50}}$  (при  $q_0 < 7 \text{ м}^2/\text{сут}$ ). Так для  $q_0 = 2 \text{ м}^2/\text{сут}$  получаем:

$$\lambda = \sqrt[3]{2/0,025} = 56,6; \quad \chi = 0,49 \text{ (см. рис. 4.7, а) и } I_c = 0,49 \cdot \text{tg } 34^\circ/2 = 0,165;$$

в) рассчитываем величину условного заложения откоса  $m_0$ :

$$m_0 = \frac{5}{\text{tg } \rho + 3 I_c} = \frac{5}{\text{tg } 34^\circ + 3 \cdot 0,165} = 4,27.$$

г) определяем высоту промежутка высачивания на откосе для совершенного незатопленного котлована по формуле

$$h_{\text{во}} = \frac{q_0}{k} (m_0 + 0,5) = \frac{2}{10} \cdot (4,27 + 0,5) = 0,95;$$

<sup>1</sup> При плановой двумерной структуре потока движение сводится к одномерному путем приведения ленты тока к плоской (см. пример 2).

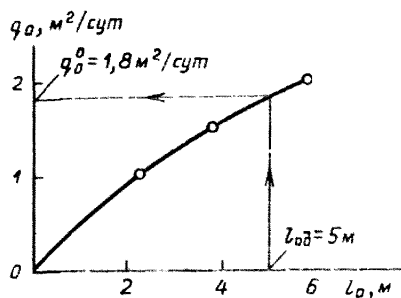


Рис. 4.8. График  $q_0 = f(l_0)$

д) находим длину языка оплыwania, соответствующую

$$q_0 = 2,0 \text{ м}^2/\text{сут};$$

$$l_0 = h_{\text{во}}/I_c = 0,954/0,165 \approx 5,8 \text{ м.}$$

Аналогичные расчеты выполняем для значений  $q_0$ , равных 1,5 и 1 м, и строим график  $l_0 = f(q_0)$  (рис. 4.8). По этому графику находим значение  $q_0^0 = 1,8 \text{ м}^2/\text{сут}$ , соответствующее предельно допустимой длине языка оплыwania  $l_{0\text{д}}$ .

2. Оцениваем установившийся удельный приток к откосу при отсутствии дренажа по формуле (4.16) при  $x_1 = 0, x_2 = L$  и  $T = kt = 100 \text{ м}^2/\text{сут}$ :

$$q = T \frac{H_1 - H_2}{L} = \frac{TH_1}{L} = \frac{100 \cdot 125}{1400} = 8,93 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

3. Уточняем приток с учетом зоны безнапорной фильтрации вблизи карьера (см. разд. 4.2) по зависимостям [7]

$$q = k \frac{h^2 p}{2L} \quad (4.41)$$

$$\text{и } h_p = \sqrt{2 m H_1 - m^2}, \quad (4.42)$$

получаем: 
$$h_p = \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 125 - 10^2} = 49 \text{ м.}$$

$$\text{Тогда } q = \frac{10 \cdot 49^2}{2 \cdot 1400} = 8,57 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

Как видно, влияние безнапорной зоны невелико (погрешность до 4 %).

4. Определяем коэффициент заслона по формуле (4.6):

$$\delta^0 = 1 - (q_0^0/q) = 1 - (1,8/8,5) \approx 0,8.$$

5. По графику, приведенному на рис. 4.1, отыскиваем максимально допустимое расстояние  $\sigma$  между дренажными скважинами: при  $l_2 = 235 \text{ м}$ ;  $r_c = 0,15 \text{ м}$  и  $\delta = 80\%$  имеем  $\sigma = 85 \text{ м}$ .

6. Необходимое число скважин  $n$  на участке получаем по формуле

$$n = B_p / \sigma = 550 / 85 \approx 7.$$

7. Общий приток  $Q_y$  к участку карьера в пределах ленты тока будет следующим:

$$Q_y = q B_k = 8,57 \cdot 550 \approx 4700 \text{ м}^3/\text{сут},$$

а расход одной скважины

$$Q_c = Q_y / n = 4700 / 7 \approx 670 \text{ м}^3/\text{сут} \approx 28 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

8. Подбираем насос. Допустим, что  $Q_H = 30 \text{ м}^3/\text{ч} = 720 \text{ м}^3/\text{сут}$ . При этом необходимое число скважин остается тем же:

$$n = Q_y / Q_H = 4700 / (30 \cdot 24) \approx 7.$$

9. Производительность скважины проверяем (см. разд. 4.3) по максимально возможному притоку, определяемому водозахватной способностью  $Q_{вз}$  ее рабочей части  $l_\phi$ : должно выполняться условие  $Q_H \leq Q_{вз}$ .

В самых неблагоприятных условиях (при  $S_c = S_{\max}$ , т.е. при  $h_c = H_c = 0$ ) получим, что  $l_\phi = h_{вс}$  (где  $h_{вс}$  — участок высачивания на стенке скважины).

Величину  $h_{вс}$  приближенно определяем по формуле

$$\begin{aligned} h_{вс} &\approx \sqrt{0,73 \lg \frac{\sqrt{Q/k}}{r_c} - 0,51} \frac{Q_c}{k} + h_c - h_c = \\ &= \sqrt{0,73 \lg \frac{\sqrt{720/10}}{0,15} - 0,51} \frac{720}{10} = 10,2 \text{ м}. \end{aligned} \quad (4.43)$$

Поскольку  $h_{вс} > m$ , то вблизи скважины осушение пласта не происходит (сохраняется напорный режим фильтрации). Принимаем  $l_\phi = m = 10 \text{ м}$ .

Значение  $Q_{вз}$  рассчитываем по формуле, предложенной С.К. Абрамовым для скважины в песчаных грунтах:

$$Q_{вз} = v_{кр} F_\phi,$$

где  $v_{кр} = 65 \sqrt[3]{k}$  — критическая скорость входа воды в скважину;  $F_\phi = \pi d_c l_\phi = \pi d_c m$  — площадь фильтра (рабочей части скважины).

Итак,

$$Q_{вз} = 65 \cdot 3,14 \cdot 0,3 \cdot 10 \sqrt[3]{10} = 1320 \text{ м}^3/\text{сут}. \quad (4.44)$$

Таким образом  $Q_H < Q_{вз}$ , т.е. требуемое условие выполняется; поэтому окончательно принимаем  $n = 7$  и  $Q_H = 30 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

**Пример 2. Определение установившегося притока подземных вод в карьер** (рис. 4.9). И река, и карьер несовершенны по степени вскрытия, так что на этом примере мы уясним также аналитические методы учета несовершенства. Исходные данные следующие:  $k = 15 \text{ м/сут}$ ;  $m = 12 \text{ м}$ ;  $S = 11 \text{ м}$ ;  $k_1 = 0,1 \text{ м/сут}$ ;  $m_p = 3 \text{ м}$ ;  $m_k = 4 \text{ м}$ ;  $b_p = 50 \text{ м}$ ;  $b_k = 180 \text{ м}$ ;  $d_k = 400 \text{ м}$ ;  $\delta_k = 200 \text{ м}$ ;  $R^* = 290 \text{ м}$ .

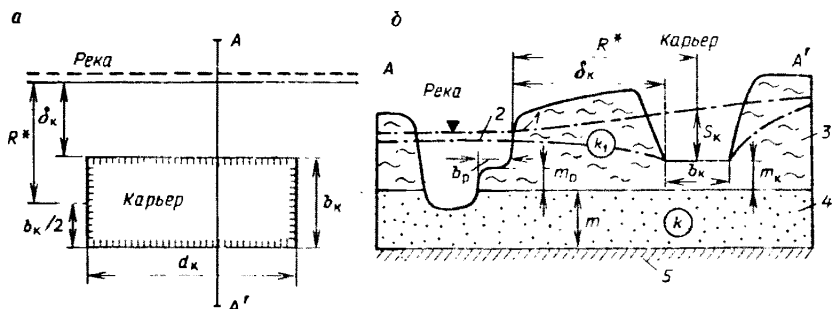


Рис. 4.9. Схема к расчету установившегося притока подземных вод в карьер методом "большого колодца":

*a* — план; *б* — разрез. 1, 2 — уровни (1 — естественный пьезометрический, 2 — при дренировании подземных вод карьером); 3 — слабопроницаемые супеси; 4 — водоносные пески; 5 — нижний водоупор (глины)

Суммарный установившийся приток воды в карьер  $Q_y$  оценим способом "большого колодца" по формуле (4.17)

$$Q_y = \frac{2 \pi k m S}{\ln(R/r_k)}$$

В этой формуле пока неизвестны величины  $R$  и  $r_k$ . Порядок расчетов следующий.

1. Определяем приведенный радиус карьера  $r_k$  по зависимости (4.12): при  $\frac{b_k}{d_k} = \frac{180}{400} = 0,45$  получим  $\eta = 1,167$  и  $r_k = \eta \frac{b_k + d_k}{4} = 1,167 \frac{180 + 400}{4} \approx 170$  м.

2. Для карьера, расположенного у реки (см. табл. 4.1), условный радиус влияния равен  $R = 2L = 2R_p^*$ .

Под  $R_p^*$  будем понимать расчетное расстояние от центра карьера до реки, учитывающее несовершенство карьера и реки, т.е.

$$R_p^* = R^* + \Delta L_p + \Delta L_k$$

где  $\Delta L_p$  и  $\Delta L_k$  — соответственно параметры сопротивления ложа реки и основания карьера.

Из работы [17] находим:

$$\Delta L_p = \sqrt{\frac{k m m_p}{k_1}} \operatorname{th} \left( b_p \sqrt{\frac{k_1}{k m m_p}} \right) = \sqrt{\frac{15 \cdot 12 \cdot 3}{0,1}} \times \\ \times \operatorname{th} \left( 50^\circ \sqrt{\frac{0,1}{15 \cdot 12 \cdot 3}} \right) \approx 43,4 \text{ м;}$$

$$\Delta L_K = \sqrt{\frac{k m m_p}{k_1}} \operatorname{cth} \left( \frac{b_K}{2} \sqrt{\frac{k_1}{k m m_p}} \right) =$$

$$= \sqrt{\frac{15 \cdot 12 \cdot 3}{0,1}} \operatorname{cth} \left( \frac{180}{2} \sqrt{\frac{0,1}{15 \cdot 12 \cdot 0,1}} \right) \approx 107,8 \text{ м.}$$

Тогда  $R_p^* = 290 + 43,4 + 107,8 \approx 442 \text{ м}$  и  $R = 885 \text{ м}$ .

3. Оценим критерии применимости формулы (4.17) в соответствии с рекомендациями, изложенными в разд. 4.3. В этих оценках должны учитываться не реальные, а расчетные параметры, т.е.  $R_p^*$  вместо  $R^*$  и  $\delta_{Kp}$  вместо  $\delta_K$ :

$$\delta_{Kp} = \delta_K + \Delta L_p + \Delta L_K = 200 + 43,4 + 107,8 \approx 352 \text{ м.}$$

Тогда

$$\delta_{Kp}/d_K = 352/400 = 0,88 > 0,5 \quad \text{и} \quad \delta_{Kp}/R_p^* = \frac{352}{442} = 0,80 > 0,1,$$

т.е. оба условия применимости формулы (4.17) выполняются.

4. Суммарный установившийся приток воды в карьер по формуле (4.17) составит

$$Q_y = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 15 \cdot 12 \cdot 11}{\ln(885:170)} = 7540 \text{ м}^3/\text{сут} \quad \text{или} \quad 315 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

**Пример 3. Оценка установившегося притока подземных вод в карьер по характерным лентам тока.** Как и в примере 1, для решения задачи предварительно строится сетка движения подземных вод (методом ЭГДА) и выделяются характерные ленты тока. В дальнейшем водопритокки определяются по каждой ленте и суммируются.

Одна из характерных лент тока показана на рис. 4.10, а. Водоносный горизонт — напорный. Движение воды в плане носит двумерный характер. Кроме того, ситуация осложняется наличием плановой неоднородности пласта по проводимости (см. рис. 4.10, б). Исходные данные следующие:  $T_1 = 110 \text{ м}^2/\text{сут}$ ;  $T_2 = 250 \text{ м}^2/\text{сут}$ ;  $T_3 = 320 \text{ м}^2/\text{сут}$ ;  $T_4 = 450 \text{ м}^2/\text{сут}$ ;  $m = 10 \text{ м}$ ;  $H_2 = 60 \text{ м}$ ;  $H_1 = 0$ ;  $L = 1370 \text{ м}$ ;  $B_K = 150 \text{ м}$ . Инфильтрация отсутствует.

В связи с двумерным характером движения подземных вод ленту тока необходимо привести к эквивалентной плоской (см. разд. 4.2), учитывая при этом неоднородность пласта по проводимости. Для этого воспользуемся формулой (4.15, а):

$$\left( \frac{B}{l} \right)_{cp} = \frac{1}{n_d} - \sum_{i=1}^{n_d} \frac{T_i}{T} \frac{B_i}{l_i}.$$

Зададимся единой для всей ленты условной проводимостью  $T$ , приняв, например  $T = 200 \text{ м}^2/\text{сут}$ , и будем искать расчетную длину  $L_p$  плоской ленты при принятой постоянной ширине такой ленты  $B_K = 150 \text{ м}$ .

Положение в данном случае осложняется тем, что границы отсеков (их всего 12), на которые разбивается лента тока линиями равных напоров с шагом  $\Delta H = 5 \text{ м}$ , в общем случае не совпадают с границами зон неоднородности. Другими словами, отсеки, внутри которых имеются такие границы, геометрически (по от-



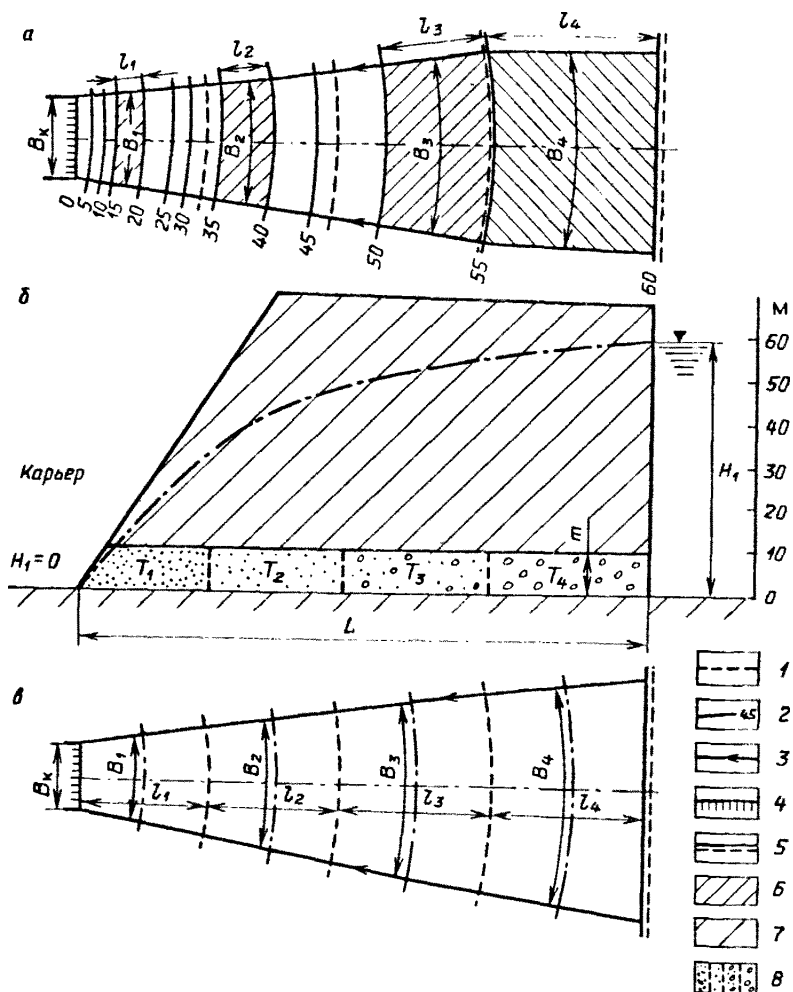


Рис. 4.10. Схема к оценке установившегося притока подземных вод к участку карьера по характерным лентам тока:

**а** – разбивка ленты тока по сетке с равномерным шагом по величине напора;  
**б** – разрез по оси ленты тока; **в** – разбивка ленты тока на отсеки по границам зон неоднородности (по неравномерной сетке). 1 – граница зон неоднородности по проводимости; 2 – линии равных напоров и значения напоров (в м); 3 – крайняя линия тока; 4 – контур карьера; 5 – граница обеспеченного питания; 6 – расчетные отсеки ленты тока в зонах с разной проводимостью; 7 – верхний и нижний водоупоры; 8 – водоносный пласт

ношению  $B_i/l_i$  не эквивалентны отсекам с однородной производительностью. Поэтому возьмем по одному характерному отсеку в каждой зоне неоднородности и только для них определим отношение  $(B/l)_{cp}$  (на рис. 4.10,а они заштрихованы). Далее отношение  $(B/l)_{cp}$  будем определять при  $n_d=4$ , а расчетную длину ленты  $L_p$  — при  $n=12$ , т.е. реальном числе блоков, пренебрегая, таким образом, геометрической неэквивалентностью отсеков на границах зон неоднородностей.

По формуле (4.15а) получим:

$$\left(\frac{B}{l}\right)_{cp} = \frac{1}{4} \left( \frac{110}{200} \frac{210}{45} + \frac{250}{200} \frac{230}{115} + \frac{320}{200} \frac{410}{240} + \frac{480}{200} \frac{460}{400} \right) = 2,64;$$

$$L_p = \frac{B_k}{(B/l)_{cp}} = 12 \frac{150}{2,64} \approx 682 \text{ м.} \quad (4.45)$$

Наконец, по формуле (4.16) с учетом ширины ленты  $B_k$  найдем приток воды в карьер  $Q_y$ , пренебрегая наличием безнапорного участка вблизи его контура:

$$Q_y = T \frac{H_1 - H_2}{L_p} B_k = \frac{TH_1}{L_p} B_k = \frac{200 \cdot 60}{682} \cdot 150 \approx 2640 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

На практике часто используют другой способ приведения лент к плоским. При этом за границы отсеков принимают контуры зон неоднородности: считается, что последние делят ленту на участки, в пределах которых двумерным характером потока можно пренебречь, а если это условие не соблюдается, то можно пойти и на более дробную разбивку в пределах каждой зоны. Сетка движения при этом будет неоднородной, т.е. от отсека к отсеку имеем  $\Delta H_i \neq \text{const}$ . Однако сам по себе перепад напоров между границами отсеков нас и не будет интересовать. Действительно, вследствие неразрывности потока для каждого отсека справедливо равенство (в соответствии с законом Дарси)

$$T_i \frac{\Delta H_i}{l_i} B_i = T \frac{\Delta H_i}{l_{pi}} B_k, \quad (4.46)$$

откуда

$$l_{pi} = \frac{T}{T_i} \frac{B_k}{B_i} l_i$$

где  $T=200 \text{ м}^2/\text{сут}$ ;  $T_i$  принимает значения  $T_1, T_2, T_3$  и  $T_4$ ;  $B_k=150 \text{ м}$ ;  $B_i$  и  $l_i$  — средняя ширина и длина  $i$ -го отсека;  $l_{pi}$  — расчетная длина  $i$ -го отсека.

Суммируя  $l_p$  по всей ленте, находим  $L_p = \sum_{i=1}^n l_{pi}$ .

На рис. 4.10,в дана разбивка ленты тока для рассматриваемой задачи по изложенной методике. В результате получаем:  $l_{p1}=372 \text{ м}$ ;  $l_{p2}=154 \text{ м}$ ;  $l_{p3}=82 \text{ м}$ ;

$l_{p4}=54 \text{ м}$ ;  $L_p=662 \text{ м}$ . Отсюда  $Q_y = \frac{200 \cdot 60}{662} \cdot 150 \approx 2720 \text{ м}^3/\text{сут.}$

Второй способ – последовательное суммирование расчетной длины отсеков при неравномерной сетке движения – в подобных ситуациях предпочтительнее, хотя в рассмотренном примере погрешность при использовании зависимости (4.15а) невелика:

$$\Delta \bar{Q}_y = \frac{2720 - 2640}{2720} \approx 0,03 \text{ (или 3 \%)}.$$

Можно учесть и наличие безнапорного участка (см. пример 1):

$$h_p = \sqrt{2 \cdot 10 \cdot 60 - 10^2} = 33,2 \text{ м.}$$

При  $T=200 \text{ м}^2/\text{сут}$  и  $m=10 \text{ м}$  получим, что  $k=20 \text{ м/сут}$ . Тогда  $Q_y = \frac{33,2^2}{2 \cdot 662} \cdot 150 = 2497 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Окончательно принимаем  $Q_y = 2500 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

**Пример 4. Определение водопритоков в карьер при неустановившемся режиме фильтрации.** Требуется выяснить удельные притоки к участку карьера, расположенного вблизи реки, на различные моменты времени. Минимальное расстояние от карьера до реки  $0_K=860 \text{ м}$ . Остальные исходные данные следующие:  $k=15 \text{ м/сут}$ ;  $m=10 \text{ м}$  ( $T=150 \text{ м}^2/\text{сут}$ );  $a^*=1,4 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{сут}$ ;  $H_1=75 \text{ м}$ ;  $H_2=0$ ;  $t_i=25, 75, 150$  и  $250 \text{ сут}$  (рис. 4.11). Требуется определить также положение уровня в точке М, расположенной в  $500 \text{ м}$  от карьера, на последний момент времени.

Расчет производится в соответствии с порядком, описанным в разд. 4.3.

1. Построим методом ЭГДА сетку движения подземных вод при работе карьера для условий установившегося режима и выделим на ней характерные ленты тока. Одна из таких лент показана на рис. 4.11, в. Ее длина вдоль оси  $L$  равна  $3200 \text{ м}$ , а ширина у карьера  $B_K$  составляет  $620 \text{ м}$ . На этом же рисунке показаны гидроизоэзы естественного потока, которые в общем случае, разумеется, не ортогональны линиям тока в нарушенных условиях. В пределах данной ленты и будем определять водопритоки.

2. Оценим время  $t_{\min}$ , по истечении которого на величине притока в карьер начнет сказываться влияние реки<sup>1</sup>. Для этого воспользуемся формулой (4.1) в виде

$$\delta_K = \sqrt{\pi a^* t_{\min}}. \quad (4.47)$$

Отсюда  $t_{\min} = 860^2 / (3,14 \cdot 1,4 \cdot 10^4) \approx 17 \text{ сут}$ . Следовательно,  $t_i > t_{\min}$ , т.е. для всех расчетных моментов времени контур обеспеченного питания влияет на величину общего водопритока в карьер.

3. Оценим время  $t_{\max} = L^2 / (\pi a^*)$  [аналог формулы (4.7)] за которое в пределах расчетной ленты наступит режим фильтрации, близкий к установившемуся:

$$t_{\max} = \frac{3200^2}{3,14 \cdot 1,4 \cdot 10^4} = 233 \text{ сут. Так как } t_4 > t_{\max}, \text{ на последний расчетный}$$

момент движение воды в пределах ленты можно считать установившимся.

<sup>1</sup> Ясно, что при  $t < t_{\min}$  общий приток к карьере можно определить, используя простейшие методы, например метод "большого колодца" (см. пример 2) при  $R = r_K + \sqrt{\pi a^* t}$ .

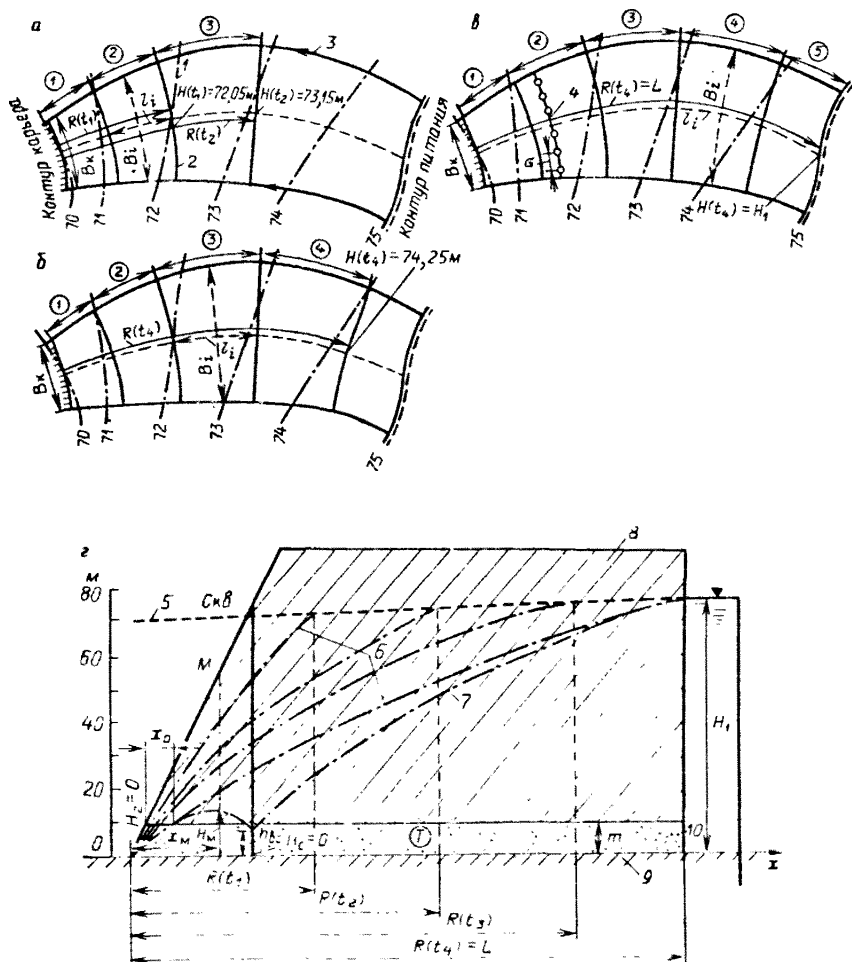


Рис. 4.11. Схема к расчету притоков к участку карьера методом недеформируемых линий тока:

а, б, в – приведение участков ленты к плоским на последовательные моменты времени (а – для  $t_1 = 25$  сут,  $t_2 = 75$  сут; б – для  $t_3 = 150$  сут; в – для  $t_4 = 250$  сут); г – разрез линии тока. 1 – гидронизопьезы ненарушенного (естественного) потока подземных вод; 2 – линия равных напоров (граница отсека) в условиях нарушенного потока; 3 – крайняя линия ленты тока для деформированного работой карьера (нарушенного) потока; 4 – ряд водопонижающих скважин; 5 – естественный пьезометрический уровень (ненарушенный поток – до сооружения карьера); 6 – условные пьезометрические уровни нарушенного потока на различные моменты времени; 7 – депрессионная кривая при работе дренажных скважин; 8 и 9 – верхний и нижний водоупоры; 10 – водоносный пласт. Цифры в кружках – номера отсеков

4. Далее используем метод недеформируемых линий тока (см. разд. 4.3), согласно которому они не меняют положения во времени, а подвижным остается лишь условный контур питания  $R(t)$ , "пробегающий" вдоль ленты от карьера до реки. Зафиксируем положение этого контура на расчетные моменты времени, а водопритоки будем оценивать по зависимостям для стационарного режима (по существу, здесь используется одна из модификаций метода последовательной смены стационарных состояний).

$$\text{Определим } R(t_1) = \sqrt{\pi a^* t_1} :$$

$$R(t_1) = \sqrt{3,14 \cdot 1,4 \cdot 10^4 \cdot 25} \approx 1050 \text{ м.}$$

5. Нанесем контур  $R(t_1)$  на ленту тока (см. рис. 4.11,а) и выделенный участок ленты приведем к плоскому эквивалентному (см. пример 4). В пределах этого участка будет два отсека с отношением  $(B/l)_{\text{ср}} = 1,63$  [по формуле (4.15)]; расчетная длина участка составит  $R_p(t_1) = 764$  м [по формуле (4.45)] при ширине плоской ленты  $B_k = 620$  м.

6. Аналогично находим  $R(t_2) = 1820$  м и  $R_p(t_2) = 1200$  м,  $R(t_3) = 2620$  м и  $R_p(t_3) = 1610$  м (см. рис. 4.11,а, б).

7. Для последнего расчетного момента  $t_4 = 250$  сут движение установившееся, т.е.  $R(t_4) = L$  (см. рис. 4.11,в) и  $R_p(t_4) = L_p = 1900$  м.

8. Определим удельные водопритоки, соответствующие расчетным моментам времени, по формуле (4.16), имея в виду, что  $H_2 = 0$ ,  $x_1 = R_p(t_i)$ ,  $x_2 = 0$ , а напор на границе питания  $H(x_1)$  последовательно принимает значения  $H(t_1) = 72,05$  м;  $H(t_2) = 73,15$  м;  $H(t_3) = 74,25$  м и  $H(t_4) = H_1 = 75$  м (см. рис. 4.11,а-в). Наличие безнапорного участка у контура карьера пренебрегаем (см. пример 1). Получаем удельные (на 1 м простираения карьера) притоки:

$$q_1 = T \frac{H(t_1)}{R_p(t_1)} = 150 \frac{72,05}{764} = 14,1 \text{ м}^3/\text{сут}; \quad q_2 = 150 \frac{73,15}{1200} = 9,1 \text{ м}^3/\text{сут};$$

$$q_3 = 150 \frac{74,25}{1610} \approx 6,9 \text{ м}^3/\text{сут}; \quad q_4 = 150 \frac{75,0}{1900} = 5,9 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

График зависимости  $q=f(t)$  представлен на рис. 4.12.

9. Перейдем теперь к оценке напора  $H_M$  в точке  $M$  при  $x_M = 500$  м (см. рис. 4.11,г) на момент  $t_4 = 250$  сут. т.е. в условиях установившегося режима. Все расчеты выполняются по плоской ленте. Поэтому предварительно необходимо установить положение точки  $M$  на этой ленте, т.е. определить  $x_{pM} = f(x_M)$ .

С этой целью построим график зависимости  $x_p = f(x_d)$  (где  $x_p$  и  $x_d$  — соответственно расчетное и действительное расстояния от карьера до произвольных точек на оси симметрии ленты тока). Используя промежуточные результаты приведения реальной ренты тока к плоской на момент времени  $t_4$  и последовательно суммируя  $l_i$  и  $l_{pi}$  каждого отсека, получаем:

$x_d$ , м . . . . .	540	1140	1820	2620	3200
$x_p$ , м . . . . .	465	845	1200	1610	1900

По этим данным построим график  $x_p = f(x_d)$  (рис. 4.13). По графику находим

$$x_{pM} = 430 \text{ м. Отсюда } H_M = H_1 \frac{x_{pM}}{L_p} = 75 \frac{430}{1900} \approx 17 \text{ м.}$$

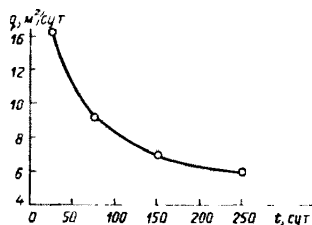


Рис. 4.12. График  $q = f(t)$

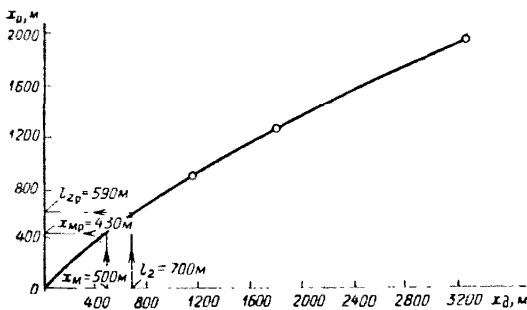


Рис. 4.13. График  $x_p = f(x_d)$

10. При уточнении напора  $H_M$  в точке  $M$  необходимо учесть наличие безнапорного участка вблизи карьера. Для этого следует оценить положение границы раздела напорного и безнапорного режимов, т.е. найти на плоской ленте значение  $x_{p_0}$ , отвечающее действительному расстоянию от карьера до границы раздела  $x_0$  (см. рис. 4.11,2); очевидно, при  $x = x_0$   $H = H_0 = m$ .

Запишем выражения для удельного расхода по обе стороны границы раздела: для безнапорного участка

$$q = k \frac{H_0^2}{2 x_{p_0}} = k \frac{m^2}{2 x_{p_0}} ; \quad (4.48)$$

для напорного участка

$$q = T \frac{H_1 - H_2}{L_p - x_{p_0}} = T \frac{H_1 - m}{L_p - x_{p_0}} . \quad (4.49)$$

В силу неразрывности потока расход не меняется. Приравняв правые части выражений (4.48) и (4.49) и решая уравнение относительно  $x_{p_0}$ , получим:

$$x_{p_0} = \frac{L_p}{2 \frac{H_1}{m} - 1} = \frac{1900}{2 \frac{75}{10} - 1} \approx 136 \text{ м.} \quad (4.50)$$

Точка  $M$  находится в напорной зоне, так как  $x_{p_M} > x_{p_0}$ . Определим величину  $H_M$ :

$$H_M = m + \frac{(x_{p_M} - x_{p_0}) (H_1 - m)}{L_p - x_{p_0}} = 10 + \frac{(430 - 136) (75 - 10)}{1900 - 136} = 20,8 \text{ м.} \quad (4.51)$$

Таким образом, погрешность вследствие недоучета безнапорной зоны составляет здесь почти 20 %.

**Пример 5. Расчет контурного дренажа карьера с использованием метода дополнительных фильтрационных сопротивлений.** Требуется определить число водопонижающих скважин  $n_c$  и расстояния между ними  $\sigma$  на участке контурного дренажа карьера в пределах характерной ленты тока (см. пример 4 и рис. 4.11, в). Удаление ряда скважин от карьера  $l_2 = 700$  м, от реки  $l_1 = 2500$  м; действительная длина ряда в границах ленты тока  $B_p = 960$  м, диаметр скважин  $d_c = 0,3$  м. Требуемый коэффициент заслона  $\delta^\circ = 0,7$  (методика оценки  $\delta^\circ$  дана в примере 1). Расчет необходимо выполнить для условий установившегося режима фильтрации при постоянном (до нижнего водоупора) понижении на скважине  $H_c = 0$  (см. рис. 4.11, г).

Все расчеты должны выполняться с использованием не реальной, а эквивалентной плоской ленты. Порядок расчетов приведен ниже (см. разд. 4.5).

1. Пользуясь графиком  $x_p = f(x_y)$  (см. рис. 4.13), определяем расчетные значения  $l_{p2} = 590$  м и  $l_{p1} = 1310$  м, соответствующие реальным значениям  $l_2 = 700$  м и  $l_1 = 2500$  м. Кроме того, по условиям приведения ленты к плоской  $B_p = B_k = 620$  м (при  $B_p = 960$  м).

2. По формуле (4.6) находим предельно допустимую величину удельного расхода  $q_0$ , выходящего на откос карьера:  $q_0 = 1(1 - \delta^\circ)q = (1 - 0,7)5,9 \approx 1,8 \text{ м}^3/\text{сут на 1 м}$ , где  $q = q_4 = 5,9 \text{ м}^3/\text{сут}$  – установившийся приток в карьер при отсутствии дренажа (см. пример 4).

3. Заменяем ряд скважин условной совершенной траншеей с фиктивным напором  $H_\Phi$  и с тем же удельным дебитом, что и для ряда скважин, т.е.  $q = Q_c/\sigma_p$ .

4. Составляем балансовое уравнение

$$q_T = q + q_0 \text{ или } q_0 = q_T - q \quad (4.52)$$

(где  $q_T$  – удельный приток извне к траншее), а затем по формуле (4.16) получаем (без учета наличия безнапорной зоны вблизи карьера):

$$\frac{T(H_\Phi - H_2)}{l_{p2}} = \frac{T(H_1 - H_\Phi)}{l_{p1}} - \frac{Q_c}{\sigma_p} \quad (4.53)$$

Кроме того, известно выражение для  $H_\Phi$  [формула (4.14) при  $H_c = 0$ ]:

$$H_\Phi = \frac{Q_c}{2\pi T} \ln \frac{\sigma_p}{\pi d_c} \quad (4.54)$$

Объединяя выражения (4.53) и (4.54), учитывая, что  $H_2 = 0$ , и решая полученное уравнение относительно расхода скважины  $Q_c$ , найдем:

$$Q_c = \frac{TH_1 \frac{l_{p2}}{l_{p1}}}{\frac{l_{p1} l_{p2}}{\sigma_p L_p} + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{\sigma_p}{\pi d_c}} \quad (4.55)$$

В этом уравнении два неизвестных –  $Q_c$  и  $\sigma_p$ , поэтому к нему необходимо добавить еще одно уравнение, в котором параметры  $Q_c$  и  $\sigma_p$  связаны с параметром  $q_0$  (допустимым "проскоком" воды в карьер).

Таблица 4.4

$\sigma_p, \text{ м}$	$Q_c, \text{ м}^3/\text{сут} (\text{м}^3/\text{ч})$	$q_0, \text{ м}^2/\text{сут}$
100	726 (30,3)	0,91
200	1211 (50,5)	1,75
300	1540 (64,2)	2,38

5. Выражение для  $q_0$  [см. формулу (4.16)] будет иметь следующий вид:

$$q_0 = \frac{T(H_{\Phi} - H_2)}{l_{p2}} = \frac{TH_{\Phi}}{l_{p2}}. \quad (4.56)$$

Решая это уравнение совместно с уравнением (4.53) относительно  $q_0$  (исключая  $H_{\Phi}$ ), получим:

$$q_0 = \frac{TH_1}{L_p} - Q_c \frac{l_{p1}}{\sigma_p L_p}. \quad (4.57)$$

Таким образом, формула (4.57) оптимизирует величины  $Q_c$  и  $\sigma_p$  с учетом  $q_0$ .

6. Решаем совместно уравнения (4.55) и (4.57). Так как  $Q_c$  и  $\sigma_p$  входят в них в неявном виде, то они определяются подбором с использованием графоаналитического метода.

Задавая рядом произвольных значений  $\sigma_p$ , по формуле (4.55) находим соответствующие им значения  $Q_c$ . Затем при известных парных значениях  $\sigma_p$  и  $Q_c$  по формуле (4.57) рассчитываем  $q_0$  (табл. 4.4).

По данным, приведенным в табл. 4.4, составляем совмещенный график зависимостей  $Q_c = f(\sigma_p)$  и  $q_0 = f(\sigma_p)$  (рис. 4.14). По нему при заданном значении  $q_0 = 1,8 \text{ м}^2/\text{сут}$  находим  $Q_c = 51,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

7. Подбираем насос. Пусть его производительность  $Q_n$  составляет  $45 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Тогда по графикам, приведенным на рис. 4.14, можно найти значения  $\sigma_p = 170 \text{ м}$  и фактического "проскока"  $q_{0\Phi} = 1,7 \text{ м}^2/\text{сут}$ , отвечающие  $Q_c = Q_n = 45 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

8. Необходимое число водопонижающих скважин можно определить по формуле

$$n_c = B_{pp}/\sigma_p = 620/170 \approx 4. \quad (4.58)$$

9. Действительное расстояние между скважинами рассчитывают следующим образом:

$$\sigma = B_p/n = 960/4 = 240 \text{ м}.$$

10. Сравниваем расчетный дебит скважины  $Q_c = 45 \text{ м}^3/\text{ч} = 1080 \text{ м}^3/\text{сут}$  с предельно допустимым по водозахватной способности  $Q_{вз}$ . Сначала по формуле



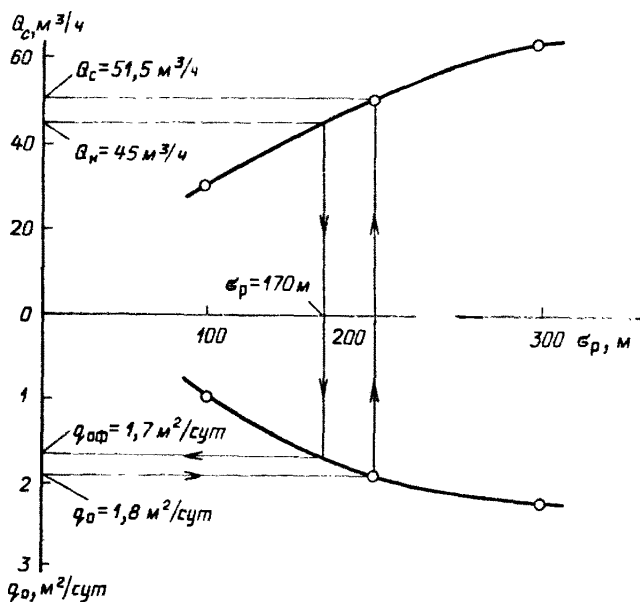


Рис. 4.14. Совмещенные графики  $Q_c = f(\sigma_p)$  и  $q_0 = f(\sigma_p)$  для определения оптимальных параметров ряда водопонижающих скважин

(4.43), учитывая, что  $h_c = H_c = 0$ , приближенно найдем (см. пример 1):

$$h_{вс} \approx \sqrt{(0,73 \lg \frac{\sqrt{1080/15}}{0,15} - 0,57) \frac{1080}{15}} = 7,15 \text{ м.}$$

Следовательно,  $h_{вс} < m$ , т.е. длина водоприемной части скважины  $l_\phi$  равна высоте участка высачивания  $h_{вс}$ . По формуле (4.44) при  $l_\phi = h_c$  получим:

$$Q_{вз} = 65 \cdot 3,14 \cdot 0,3 \cdot 7,15 \sqrt[3]{15} = 1080 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Таким образом имеем  $Q_c = Q_{вз}$ , т.е. требуемое условие выполняется на пределе. Для запаса можно несколько увеличить диаметр скважин.

Итак, окончательно имеем:  $n_c = 4$ ;  $\sigma = 240$  м;  $Q_c = 1080 \text{ м}^3/\text{сут} = 45 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основные задачи фильтрационных расчетов осушения. В чем их специфика по сравнению с расчетами при оценке запасов подземных вод для водоснабжения.

2. Какие основные моменты должны приниматься во внимание при типизации гидрогеологических условий для целей осушения? Какую схему можно считать типовой? Каков общий порядок фильтрационного расчета?

3. В чем суть схематизации гидрогеологических условий? Чем она отличается от типизации? Как эти два понятия связаны между собой?

4. Перечислите основные приемы схематизации профильной и плановой структуры потока.

5. В чем смысл фрагментации потока отдельными лентами тока? Для чего реальные ленты приводятся к плоским? Какой принцип положен в основу такого приведения?

6. Охарактеризуйте способ "большого колодца". В чем его достоинства? Чем вызваны ограничения на использование этого способа?

7. Поясните исходные позиции метода недеформируемых линий тока и изложите общий порядок расчетов с его использованием. Как этот метод связан с моделированием?

8. В каких случаях для оценки водопритоков и уровней неизбежно привлечение моделирования? Вспомните схему Либмана из курса "Динамика подземных вод" и поясните ход моделирования по этой схеме для ситуации, изображенной на рис. 4.3.

9. Попробуйте объяснить физический смысл функции понижения при установившемся режиме. Чем он отличается от фильтрационного сопротивления?

10. С какой целью при расчетах контурных систем скважин используется метод дополнительных фильтрационных сопротивлений? В чем смысл замены ряда скважин фиктивной траншеей?

11. На какие критерии ориентируются фильтрационные расчеты скважин, расположенных соответственно вблизи совершенных и несовершенных выработок?

12. Поясните порядок моделирования методом ЭГДА для оценки водопритока к контурному ряду скважин.

13. Как различаются подходы к расчету дренажных скважин при неустановившемся режиме фильтрации в зависимости от заданных условий на них? Что служит критерием для оценки продолжительности работы скважин с заданным постоянным расходом?

## ГЛАВА 5

### **ТРЕБОВАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ РАЗВЕДКЕ И РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

---

Нормальные условия строительства и эксплуатации горного предприятия могут быть обеспечены лишь при наличии полноценной информации о горно-геологической обстановке на месторождении. Дефицит или низкое качество гидрогеологической информации делают невозможными надежный прогноз гидрогеологических условий отработки месторождения, а также проектирование и реализацию любых мероприятий по защите рудника от подземных вод или их охране. Поэтому ниже изложены требования к информационному обеспечению и гидрогеологическим работам, проводимым при разведке и разработке месторождений. Теоретические и методические аспекты этих работ затрагиваются лишь в тех относительно редких случаях, когда они существенно отличаются от традиционных гидрогеологических исследований, подробно

изучаемых в других курсах (в частности, "Динамика подземных вод", "Поиски и разведка подземных вод" и др.). Так, следует иметь в виду, что гидрогеологическая разведка месторождений твердых полезных ископаемых обычно проводится в две стадии предварительной и детальной разведки, регламентируемые соответствующими документами. Однако в данном курсе мы не будем касаться такой регламентации, поскольку основной интерес для нас представляют требования к конечным результатам разведки, к общим принципам и методам ее проведения; поэтому там, где речь идет о каких-то вопросах разведки, специфичных для разных ее стадий, речь будет идти преимущественно о детальной разведке, дающей конечное обоснование для технического проекта. Вместе с тем особого анализа в силу своей специфики потребуют гидрогеологические наблюдения на действующих горных предприятиях, рассматриваемые в настоящем разделе как продолжение и завершение гидрогеологической разведки иными средствами. Дополнительные требования к разведке, вытекающие из задач охраны подземных вод, излагаются в последующих главах.

## **5.1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И СОСТАВ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ РАЗВЕДКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Цель гидрогеологических исследований в период разведки месторождения — охарактеризовать степень его обводненности, оценить возможное влияние подземных и поверхностных вод на условия ведения горных работ, проанализировать возможные методы борьбы с этим влиянием, выявить источники водоснабжения и дать оценку ситуации с позиций охраны и рационального использования подземных вод. Для этого должны быть получены достоверные сведения по следующим основным аспектам: 1) геологическое и гидрогеологическое строение месторождения; 2) режим поверхностных водоемов и рек и их связь с подземными водами; 3) условия питания, разгрузки и взаимосвязи основных водоносных горизонтов; 4) физические и водные свойства водоносных и водоупорных пород, а также возможные изменения механических свойств (прочности) под влиянием воды; 5) уровенный режим водоносных горизонтов и тенденции его изменения; 6) расчетные фильтрационные параметры водоносных горизонтов, а в ряде случаев и относительных водоупоров; 7) химический состав вод и ожидаемые тенденции его изменения; 8) эффективность дренажных устройств; 9) источники водоснабжения горного предприятия и пути использования дренажных вод; 10) возможная эффективность мероприятий по охране подземных вод.

Так как вскрытие водоносных пород горными выработками помогает значительно расширить представления о гидрогеологическом строении месторождения, в ряде случаев целесообразно отказаться от детального изучения некоторых из упомянутых факторов в период разведки, имея в виду возможность их изучения по наблюдениям, проводимым

гидрогеологической службой рудника в период его строительства и в первые годы эксплуатации.

Для решения всех перечисленных вопросов при разведке месторождения используются результаты работ, среди которых наиболее важное место занимают специальные гидрогеологические исследования: гидрогеологическая съемка, гидрогеологическое бурение и горные работы гидрогеологической направленности, лабораторные исследования водно-физических и механических свойств пород, режимные наблюдения, опытные полевые работы, балансово-гидрометрические исследования, аналитические расчеты и моделирование, гидрогеологический анализ данных по соседним месторождениям и некоторые другие.

На проведение гидрогеологических исследований при детальной разведке составляется специальный проект, основой которого служат материалы предварительной разведки. При этом гидрогеологические исследования необходимо тесно увязывать с общим проектом геологической разведки, что позволяет, в частности, свести к минимуму, а иногда и вообще исключить дополнительные буровые и горнопроходческие работы гидрогеологической направленности. Эффективность намечаемых исследований будет максимальной в том случае, когда при их проектировании учитываются также принципиальные соображения о возможных путях отработки и осушения месторождения. Это дает возможность сконцентрировать основные исследования на намечаемом участке первоочередного вскрытия, а также выбрать оптимальные методы и объемы исследований. Поэтому для крупных месторождений со сложными гидрогеологическими условиями будем рассматривать в качестве обязательной привязку гидрогеологических исследований в период детальной разведки к предварительно намеченным принципиальным схемам их отработки и осушения.

При назначении состава и объемов работ, а также определении площади и глубины исследований целесообразно, используя аналогию или данные предварительной разведки, отнести изучаемое месторождение к одному из следующих типов по степени сложности.

*Тип I* — простые месторождения, не требующие применения глубинного дренажа при открытой разработке или специальных средств водозащиты при подземной. К этому типу можно отнести: а) все месторождения, намеченные к открытой разработке и требующие применения только локального глубинного дренажа малой производительности (с общим расходом до  $200 \text{ м}^3/\text{ч}$  для месторождений, приуроченных к нелитифицированным песчано-глинистым породам, и до  $400 \text{ м}^3/\text{ч}$  в остальных случаях) или кратковременного, продолжительностью не более 1,5 лет, глубинного дренажа; б) месторождения, подземная отработка которых обуславливает необходимость применения специальных средств водозащиты или водоподавления лишь для проходки подготовительных горных выработок, причем предполагаемые шахтные водопритоки не превышают приведенных выше значений; в) все месторождения, дренаж которых может быть осуществлен весьма ограниченными средствами — несколькими водопонижающими скважинами.

*Тип II* — сложные месторождения, требующие систематического применения глубинного дренажа для открытой разработки или специальных средств водозащиты для подземной, при достаточно высокой производительности глубинного дренажа или шахтного водоотлива ( $200-300 \text{ м}^3/\text{ч}$  и более для месторождений, приуроченных к нелитифицированным песчано-глинистым породам, и более  $300 \text{ м}^3/\text{ч}$  в остальных случаях). При этом надежное проектирование дренажа или других средств водозащиты может полностью базироваться на данных детальной разведки без проведения опытно-эксплуатационного или опытного водопонижения.

*Тип III* — особенно сложные месторождения, на которых необходимы систематический глубинный дренаж или шахтный водоотлив высокой производительности (порядка  $700-1000 \text{ м}^3/\text{ч}$  и более), причем надежное проектирование дренажной системы или других средств водозащиты может быть осуществлено лишь в результате проведения опытно-эксплуатационного или опытного водопонижения.

Таким образом, сложность месторождения здесь рассматривается с позиций требований к детальности и точности гидрогеологических исследований, проводимых при его разведке. Эти требования в значительной степени определяются ожидаемыми затратами на дренаж месторождения. Особо должны выделяться месторождения, намечаемые к отработке под защитой противофильтрационных завес.

Важно подчеркнуть, что, как следует из сказанного выше, оценки месторождений по степени сложности в гидрогеологическом и геологическом смысле обычно не совпадают.

Отнесение месторождения к одному из выделенных типов проводится сначала по аналогии, затем на основании данных предварительной разведки, после чего осуществляется корректировка в соответствии с первыми данными детальной разведки.

*Состав исследований* зависит от степени сложности гидрогеологических условий месторождения. На месторождениях с простыми гидрогеологическими условиями можно ограничиться следующими видами работ:

- крупномасштабным гидрогеологическим обследованием;

- гидрогеологическими наблюдениями в процессе бурения скважин, сопровождаемыми в отдельных случаях геофизическими работами гидрогеологической направленности;

- стандартным лабораторным изучением гранулометрического состава и основных водно-физических свойств пород по небольшому числу образцов;

- кратковременными наблюдениями за уровнями подземных вод по отдельным разведочным скважинам и редкой сети наблюдательных скважин, а также за режимом поверхностных вод;

- выборочным исследованием химического и бактериального состава подземных вод;

- пробными и одиночными опытными откачками или нагнетаниями (наливами).

На месторождениях *со сложными гидрогеологическими условиями* проводятся такие виды исследований:

крупномасштабная гидрогеологическая съемка;

гидрогеологические наблюдения в процессе бурения скважин;

в отдельных случаях — бурение специальных гидрогеологических скважин;

съемочные и каротажные геофизические работы гидрогеологической направленности;

полный комплекс лабораторных исследований водно-физических свойств пород, в том числе и специальных;

регулярные режимные наблюдения за уровнями подземных вод в течение, как минимум, года-полутора лет по всем пригодным разведочным скважинам и развернутой сети наблюдательных скважин, а также за режимом поверхностных вод;

регулярные наблюдения за изменением химического и бактериального состава подземных вод;

пробные и одиночные откачки или нагнетания (наливы), а также кустовые откачки.

На месторождениях *с особенно сложными гидрогеологическими условиями* обычно выполняются аналогичные исследования, но, как правило, в больших объемах. Кроме того, обязательно проводится опытно-эксплуатационное водопонижение. Иногда его можно заменить опытным водопонижением, проводимым на завершающем этапе детальной разведки параллельно с проектированием до начала непосредственного осушения месторождения.

При проведении гидрогеологических исследований в период разведки следует по возможности соблюдать определенную их последовательность: сначала планируют работы, основной целью которых является качественная проверка исходных предпосылок; и лишь затем переходят к работам, направленным на выяснение деталей гидрогеологического строения месторождения и получение количественной оценки условий его вскрытия.

*Глубина изучения* гидрогеологического строения месторождения чаще всего не совпадает с глубиной залегания почвы пласта полезного ископаемого (который предполагается отрабатывать), и, как правило, превышает ее. Обязательного изучения требуют водоносные слои лежащего бока, непосредственно подстилающие полезное ископаемое или отделенные от него водоупором относительно небольшой мощности, который не может предотвратить прорыв воды или исключить влияние данного водоносного горизонта на устойчивость бортов карьера (см. разд. 1.1 и 1.2). И только в том случае, когда вмещающие полезное ископаемое трещиноватые породы не имеют фиксированного нижнего водоупора, глубину изучения гидрогеологического строения в первом приближении можно ограничить глубиной геологического изучения месторождения (т.е. разведочного бурения).

Площадь изучения зависит от размеров области фильтрации, которые определяются границами самого водоносного горизонта (выклинивание водоносных пород, выход их на поверхность, размыв, тектонический контакт с непроницаемыми породами и т.п.); контуром обеспеченного питания водоносного горизонта или контуром, ограничивающим площадь рассредоточенного питания водоносного горизонта (например, за счет перетекания). На месторождениях с простыми условиями изучение гидрогеологического строения может ограничиваться площадью месторождения, исследуемой в процессе детальной (геологической) разведки полезного ископаемого. Однако на месторождениях со сложными и особенно сложными условиями площадь изучения гидрогеологического строения должна распространяться до границ области фильтрации, если они выделяются с достаточной достоверностью. В противном случае, а также при большой удаленности границ это изучение ограничивается областью с радиусом

$$R \approx \max \left( \sqrt{\frac{k}{\mu}} h_0 t_0, R^* \right), \quad (5.1)$$

где  $R$  — расстояние до ближайшей границы с обеспеченным питанием (т.е. до границы, на которой будет поддерживаться постоянный напор в течение всего периода осушения), отсчитываемое от ориентировочного центра карьера;  $k$  и  $\mu$  — коэффициент фильтрации и водоотдача, определяемые по данным предварительной разведки, по аналогии или по косвенным показателям;  $h_0$  — мощность потока;  $t_0$  — время строительного водопонижения (ориентировочно 1–1,5 года).

Во всех случаях, когда необходимая площадь изучения гидрогеологического строения района выходит за пределы исследуемой в процессе предварительной и детальной (геологической) разведки полезного ископаемого, гидрогеолог обязан предусмотреть бурение дополнительных специальных скважин. В противном случае детальная разведка даст настолько скудные сведения о гидрогеологическом строении прилежащего к месторождению района, что проектировщики будут лишены возможности получить представление об условиях питания и даже распространении водоносных горизонтов.

К сожалению, в современной практике разведки месторождений мало учитывается специфика изучения гидрогеологических условий, во многом определяемая динамикой их изменения при вскрытии и эксплуатации месторождения (в отличие от статического геологического строения). Достаточно взглянуть на карту фактического материала даже детальной разведки большинства месторождений твердых полезных ископаемых, чтобы убедиться, что в методическом отношении повторяется одна и та же ситуация: подавляющая часть разведочных выработок (свыше 90 %) сосредоточена в границах залежи полезного ископаемого и вблизи нее. В качестве примеров можно привести Коршуновское и Ковдорское железорудные, Нюренгринское угольное, Миргалимсайское полиметаллическое и другие месторождения. Так, на стадии предварительной разведки Нюренгринского месторождения не было пройдено ни одной скважины за пределами контура распространения

продуктивной толщи и ни одной специальной гидрогеологической скважины в пределах этого контура. Поэтому при разработке проекта осушения и его последующей реализации приходилось во многом действовать "вслепую", опираясь на данные среднемасштабной геологической съемки по области гидродинамического влияния карьера. А ведь именно специфические условия этой области в основном определяли особенности осушения месторождения. Естественно, такого рода ошибки обернулись неизбежными техническими и экономическими издержками.

*Объемы, площадь и глубина гидрогеологических исследований*, первоначально намеченные в проекте детальной разведки, как правило, уточняются и существенно корректируются при проведении работ. Это относится, в частности, к опытным полевым работам: результаты первых экспериментов, проведенных на начальной стадии детальной разведки, должны немедленно анализироваться, чтобы последующие эксперименты корректировались и осуществлялись с учетом всех полученных ранее данных. Только такой подход позволит изучить гидрогеологические условия месторождения с необходимой детальностью при разумном минимуме исследований. Поэтому следует признать совершенно недопустимой жесткую регламентацию в проекте детальной разведки объемов и площади исследований в соответствии с какой-либо стандартной сеткой скважин: в каждом конкретном случае эти показатели будут меняться в зависимости от результатов анализа предшествующих этапов работ. Кроме того, в процессе исследований может выявиться нецелесообразность, а в ряде случаев и невозможность, достаточно детального изучения гидрогеологических условий месторождения (в частности фильтрационных параметров водоносных пластов) в период разведки; в этих случаях объемы гидрогеологических исследований могут быть значительно сокращены, а основной упор должен быть сделан на проведение опытно-эксплуатационного водопонижения и наблюдений в период строительства и в первые годы эксплуатации месторождения.

Если вблизи рассматриваемого месторождения имеются горные выработки, то в период детальной разведки в них должен осуществляться широкий круг наблюдений (см. разд. 5.4); в ряде случаев это может способствовать резкому сокращению объемов опытных работ. Аналогичная ситуация возникает при наличии в районе месторождения какого-либо водозабора.

## **5.2. ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

### **5.2.1. Геолого-структурные исследования**

Под гидрогеологическим строением участка земной коры понимается совокупность факторов, определяющих общую (главным образом, качественную) характеристику условий существования и циркуляции подземных вод в его пределах. К числу таких факторов от-



носятся, во-первых, границы распространения и формы залегания водоносных горизонтов, а также комплексов относительно водоупорных пород; во-вторых, литолого-структурная характеристика пород, слагающих выделенные водоносные и водоупорные комплексы; в-третьих, положение естественных контуров (областей) питания и стока, а также поверхностей естественных уровней водоносных горизонтов. Основным материалом для составления схемы гидрогеологического строения месторождения дает анализ результатов геологоразведочных (в первую очередь, буровых) работ, а также режимных наблюдений за подземными и поверхностными водами.

Геологические материалы содержат сведения о литологии и стратиграфии пород, слагающих участок месторождения, а также его тектоническом строении. Именно эти материалы и являются основой для построения гидрогеологической схемы. В большинстве случаев они дают возможность реконструировать палеогеографические условия накопления осадков, выделить фации и выявить закономерности их распространения. Установление таких общих закономерностей позволяет надежнее интерпретировать фактический материал, достовернее выделять границы распространения однородных осадков, контуры размывов и другие детали, которые могут определять характер фильтрации подземных вод и влияние их на устойчивость пород. Следует подчеркнуть важность выявления и оконтуривания погребенных речных долин.

Одним из основных аспектов гидрогеологического строения является тектоника. Определение направлений и амплитуд движений земной коры, вызвавших деформации пород и перемещения отдельных чашек и блоков относительно друг друга и обусловивших современную геологическую структуру, позволяет систематизировать данные о трещиноватости пород, установить размеры и расположение зон разрывов сплошности пород, кливажа, дробления и тем самым выявить наиболее обводненные участки. В частности, достаточно показательным может быть уже общий характер деформаций: например, зоны сбросов являются обычно водопроводящими, а зоны надвигов — непроницаемыми.

Для ряда месторождений, в разрезе которых широко распространены карбонатные породы, одним из важнейших аспектов гидрогеологического строения, подлежащих первоочередному изучению, являются различные формы карста. Распространение и размеры карстовых каналов и полостей, связь их с земной поверхностью, характер заполнения пустот — все это имеет решающее значение как для оценки обводненности месторождения, так и для прогноза возможных деформаций пород в горных выработках.

Рассмотрим некоторые частные, но достаточно важные моменты геологического анализа, которые следует учитывать при обосновании схемы гидрогеологического строения месторождения.

В толщах *слаболитифицированных песчано-глинистых пород* особое внимание следует уделять следующим исследованиям:

1) прослеживанию водоупорных прослоев небольшой мощности в толще водоносных пород, так как эти прослои резко меняют характер фильтрационных деформаций (см. разд. 1.2);

2) выделению локальных понижений водоупорного ложа, которые накапливают фильтрующиеся воды и обуславливают неравномерность притоков и фильтрационных деформаций по фронту выработки. Выявление таких понижений позволяет наместить оптимальные участки для заложения дренажных устройств. Недостаточно тщательное изучение отметок водоупора по пройденным геологическим, инженерно-геологическим и гидрогеологическим скважинам часто приводит к тому, что на ряде месторождений часть запроектированных дренажных выработок попадает на повышенные участки ложа, что резко снижает их эффективность;

3) выяснению состава "водоупорных" слоев, которые могут содержать достаточно мощные прослои водоносных глинистых песков, нередко не фиксируемые при бурении. Фльтрация из таких прослоев вызывает периодические оползания уступов на карьерах (см. разд. 5.5.3) и усложняет работу экскаваторов, а при подземной разработке такие прослои могут существенно менять (ухудшать) защитные свойства водоупорных толщ.

Наряду с составом важное значение имеют структурные особенности "водоупорных" слоев, в первую очередь трещиноватость переуплотненных глин, которая в ряде случаев может быть зафиксирована при внимательном изучении свежего керна. Наличие такой трещиноватости может привести к развитию процессов "перетекания" через глинистые слои; кроме того, водопроницаемость по трещинам может вызвать значительные затруднения при проходке в глинах подземных выработок.

Следует особенно внимательно относиться к образцам всякого рода "плывунных" песков и "разжиженных" пород, которые, как правило, являясь следствием режима бурения или выдавливания песков в скважину под действием гидродинамических сил (см. разд. 1.3). Можно привести много примеров того, как неправильные заключения изыскателей о "плывунной" природе песков приводили к проектированию совершенно ненужных осушительных устройств. Поэтому такого рода заключения должны даваться лишь после тщательной проверки качества бурения, состояния ствола скважины и гранулометрического состава пород. В частности, следует стремиться к получению образцов водоносных песков ненарушенного сложения, что при соблюдении необходимых технических условий бурения обычно вполне достижимо.

В комплексах *умеренно метаморфизованных осадочных пород*, наряду с изучением тектонического строения и состава пород (в частности, состава цементующих соединений), большое значение имеет исследование их трещиноватости (в обнажениях, по керну скважин, в стенках горных выработок), которая является одним из важнейших факторов, определяющих водопроницаемость. Особенно важна подробная документация состояния пород в зонах крупных тектонических нарушений и выветривания.

С тектоническими процессами и выветриванием часто связана, например, неравномерная трещиноватость угольных пластов. При мульдообразном залегании, как правило, наблюдается увеличение трещиноватости к подошве пласта, связанное с тектоническими движениями. Благодаря процессам выветривания, на большинстве угольных месторождений фиксируется повышенная трещиноватость на выходах угольных пластов под четвертичные отложения. Кроме того, на этих участках часто развиты так называемые "горелые" породы, характеризующиеся значительной трещиноватостью, как правило, максимальной в пределах рассматриваемого разреза.

В результате анализа тектонического строения месторождения необходимо, в частности, выявить гидравлически изолированные крупные мульды и тектонические блоки, поскольку осушение таких участков требует специального подхода. Степень их изолированности проверяется в дальнейшем наблюдениями за уровнями и опытными работами.

На месторождениях этого типа следует с особым вниманием выделять водонесные горизонты в лежачем боку (независимо от их водообильности). Эти горизонты часто описываются слишком поверхностно, хотя они подчас определяют устойчивость бортов карьера или ночвы горных выработок. В этой связи необходимо еще раз напомнить о тех тяжелых последствиях, к которым приводят систематическое игнорирование или недоучет в процессе разведки роли напорных горизонтов в лежачем боку продуктивных толщ (см. разд. 1.1 и 2.5).

В комплексах *типичных скальных и полускальных пород* решающее значение для обоснования схемы гидрогеологического строения имеют, наряду с тектоникой, трещиноватость или кавернозность, определяющие водообильность и водопроницаемость пород. Поэтому при документации пород основное внимание уделяется оценке их трещиноватости по выходу керна, по режиму бурения и непосредственно по керновым образцам. При этом следует фиксировать густоту трещин, их раскрытие, характер шероховатости стенок, состав и состояние заполнителя.

Особенно важно всесторонне изучать и описывать характер заполнения карстовых полостей. Этому вопросу уделяется явно недостаточное внимание: нередко при вскрытии месторождений, приуроченных к карбонатным породам, карстовые полости, описанные при разведке как открытые (вследствие неправильной технологии бурения), оказывались заполненными глинистым материалом. Подобные дефекты разведочных работ приводят к тому, что, с одной стороны, необоснованно завышаются объемы дренажных работ из-за опасений катастрофических прорывов воды из открытых полостей большого объема, а с другой, не учитывается влияние выноса рыхлого заполнителя на условия ведения горных работ. Вместе с тем в районах интенсивного развития карста нельзя рассчитывать на детальное выявление всех карстовых структур, поэтому бурение большого числа гидрогеологических скважин (в дополнение к опытным, наблюдательным и инженерно-геологическим) специально для уточнения строения карстового массива в общем случае нецелесообразно.

Необходимо обращать внимание на выделение участков распространения сильно измененных (например, каолинизированных) пород в пределах площади месторождения: важно изучать состояние и свойства пород в зоне выветривания (современного или древнего), приуроченной к их выходам на дневную поверхность или к участкам, подвергшимся интенсивным деформациям. В случае вторичного изменения исходных пород с образованием глин (например, в условиях затрудненного водообмена) такая зона выветривания служит экраном для подземных вод, что способствует сохранению высоких напоров и связано с опасностью неожиданных прорывов с большими водопритоками.

### 5.2.2. Специальные исследования и наблюдения

Для того чтобы уточнить полученные при геологическом анализе общие представления о гидрогеологическом строении месторождения, проводят крупномасштабную гидрогеологическую съемку и гидрогеологическое бурение, а также геофизические работы гидрогеологической направленности. Кроме того, осуществляют гидрогеологические наблюдения в процессе бурения скважин различного назначения.

*Гидрогеологическая съемка* должна быть направлена прежде всего на выяснение условий питания и разгрузки подземных вод.

*Бурение* дополнительных (опорных) скважин специально для уточнения гидрогеологического строения необходимо лишь на тех месторождениях со сложными и особенно сложными условиями, где площадь

гидрогеологического изучения превышает площадь, охваченную геологической разведкой (см. разд. 5.1).

Ценный материал для уточнения гидрогеологического строения и постановки опытных фильтрационных работ дают наблюдения за появлением и установлением уровня подземных вод, за поглощением промывочной жидкости и температурой воды, а также кратковременные пробные откачки, желонирования или наливов (в частности, с расходомеристией) в моменты остановок при бурении. В последнее время в практике исследований широко используется метод опережающего опробования проходимых скважин, позволяющий ускорить выполняемые операции и резко увеличить объем получаемой информации.

Вместе с тем при проведении наблюдений за уровнями подземных вод и поглощением промывочной жидкости при бурении необходимо учитывать следующее:

в пористых и мелкогравелистых водоносных породах при бурении с глинистым раствором, как правило, происходит заиливание прискважинной зоны, так что получаемые в этих случаях данные наблюдений за уровнями могут рассматриваться как достаточно надежные лишь при условии предварительной разглинизации путем прокачки скважины;

при разведочном бурении обычно не производится надежной изоляции одного водоносного горизонта от другого, что также может существенно повлиять на результаты замеров.

Для уточнения гидрогеологических условий месторождений полезных ископаемых применяются *геофизические исследования*, причем наибольший эффект дает электроразведка, благодаря достаточной разработанности методики, простоте применяемого оборудования и сравнительно надежной интерпретации данных.

Геофизические работы, результаты которых используют для решения гидрогеологических задач, разделяются на съемочные (обнаружение и прослеживание тектонических нарушений и закарстованных зон, контактов водоносных и водоупорных пород) и каротажные, проводимые для оценки степени обводненности пород и получения ориентировочных количественных характеристик водоносных горизонтов по скважинам.

Геофизической съемкой (вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) электропрофилирование) следует покрывать участки со сложным геологическим строением (для увязки имеющихся разрезов по скважинам) и участки предполагаемого питания подземных вод (для детализации гидрометрических и гидрогеологических данных). Каротажные работы проводят для уточнения положения водоупорных слоев и определения их фильтрационных свойств на геологоразведочных и специальных гидрогеологических скважинах. Весьма широкое применение находят методы расходомерии, резистивиметрии и термометрии, которые могут рассматриваться как особый класс гидрогеофизических методов.

Наряду с перечисленными видами работ ценный материал для уточнения гидрогеологического строения месторождения могут давать из-

учение режима уровней и химизма подземных вод по наблюдательным скважинам; инженерно-геологические изыскания с проведением буровых и горных разведочных работ, а также лабораторных исследований физических и водных свойств пород; опытные (полевые) гидрогеологические опробования.

### 5.3. ИЗУЧЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОД ОПЫТНЫМИ ПОЛЕВЫМИ РАБОТАМИ

Основная цель полевых опытно-фильтрационных работ (ОФР) — определение фильтрационных параметров; при этом попутно могут решаться и некоторые другие вопросы, такие как выявление связи водоносных горизонтов между собой и с поверхностными источниками питания, изучение влияния тектонических нарушений на процесс фильтрации и др.

Методика этих исследований подробно излагается в других курсах, в частности в курсе "Динамика подземных вод" [7], поэтому здесь мы ограничимся общими аспектами проблемы и некоторыми специфическими моментами, важными именно для разведки месторождений твердых полезных ископаемых.

#### 5.3.1. Виды опытно-фильтрационных работ

Для определения фильтрационных параметров водоносных комплексов в период разведки месторождения наиболее широко используются полевые опытные опробования (ОФО); подчиненную роль играют опытно-фильтрационные наблюдения (ОФН), которые рассмотрены в разд. 5.4. Среди опробований основное значение имеют откачки или выпуски, меньшее — нагнетания и наливы. Эти работы сопровождаются запусками индикатора и геофизическими исследованиями в скважинах. Для опробования пород зоны аэрации чаще всего проводят опытные наливы в шурфы, реже — в скважины.

Преимущество *откачек* перед другими видами опытных работ заключается в том, что они наиболее достоверно моделируют процесс осушения под влиянием водоотлива. Кроме того, при откачке выносятся лишь мелкие фракции из грунта, так что, если изменение фильтрационных свойств пород в процессе опыта и происходит, то оно лишь дает некоторый запас при прогнозах водопритоков.

Одиночные откачки, как правило, относительно кратковременные, обычно дают ориентировочные сведения о фильтрационных свойствах (проводимости) водоносных горизонтов. Результаты их зависят от ряда трудно учитываемых факторов, таких как сопротивление фильтра и прифильтровой зоны, инерционность скважин, степень вскрытия водоносного горизонта и равномерность работы насоса.

Более надежные результаты дают одиночные откачки из скважин, пройденных без промывки, а также с промывкой водой или специаль-

160

ными (например, меловыми, водогипановыми и др.) растворами, при использовании которых не происходит кольматация околостволового пространства. В то же время откачки из скважин, пройденных с применением глинистого раствора, дают обычно резко заниженные расчетные параметры. Кратковременность одиночных откачек во многих случаях также приводит к тому, что картина фильтрации не может быть проинтерпретирована достаточно детально. Поэтому одиночные откачки применяют в основном для сравнительной оценки проницаемости водоносных слоев (прежде всего, по величине удельного дебита) и ориентировочной оценки проводимости на базе построения корреляционных связей с данными кустовых откачек.

Расшифровке результатов одиночных откачек в многослойных толщах, а также в закарстованных и неравномерно трещиноватых породах во многом способствует расходометрия скважин.

Кустовые откачки позволяют решить значительно больший круг задач и с большей точностью. В силу значительной длительности такой откачки, ее результаты нередко помогают уточнить граничные условия для ограниченных водоносных горизонтов. Наконец, так как в период детальных исследований обычно имеется ряд наблюдательных скважин на различные водоносные комплексы, их также можно использовать для сбора обширной информации при проведении достаточно длительных и мощных кустовых откачек.

Все это позволяет считать кустовую откачку (и опытное водопонижение) наиболее надежным методом исследований фильтрационных свойств пород в период разведки и, следовательно, основным методом определения исходных расчетных параметров.

*Нагнетания* могут использоваться для более детального изучения фильтрационных свойств трещиноватых пород: они дают возможность по величине удельного водопоглощения пород дифференцированно оценить относительную водопроницаемость различных горизонтов вскрываемой скважиной толщи. Однако нагнетания имеют ряд хорошо известных недостатков, как принципиальных (кольматация трещин или их расширение при больших давлениях, разные свойства природной и закачиваемой в пласт воды, выделение газов, в ряде случаев неясность картины фильтрации и т.д.), так и технических (сложность изоляции опробуемого интервала от выше- и нижележащих пород, нередкое отсутствие источника снабжения скважин водой).

Для высокой точности результата максимальные напоры при нагнетаниях не должны существенно превышать глубину залегания подошвы опробуемого интервала: опытами по искусственному трещинообразованию установлено, что, например, в угленосных толщах "гидрорасчленение" слоев начинается уже при дополнительном давлении порядка сотых долей мегапаскала.

Проведение *наливов* проще, чем проведение нагнетаний, однако данные по наливам характеризуют проницаемость толщи пород лишь суммарно и для расшифровки результатов требуется больший объем до-

полнительных наблюдений. Наливам свойственны те же принципиальные недостатки, что и нагнетаниям. Кроме того, ими подчас опробуется не тот комплекс пород, который будет дренироваться (например, при наливе в безнапорные водоносные горизонты).

Поэтому нагнетания и наливов в одиночные скважины обычно могут в какой-то степени заменить лишь одиночные откачки, особенно при большой их глубине<sup>1</sup> или при невозможности добиться заметного понижения имеющимся насосным оборудованием. Эти опыты следует рассматривать как вспомогательное средство для примерной (и часто относительной) оценки фильтрационных свойств, а также для выявления отдельных наиболее трещиноватых или закарстованных зон, установления глубины распространения интенсивно трещиноватых пород и т.п. В большинстве случаев следует сочетать эти опыты с расходометрией.

Точность результатов кустовых нагнетаний и наливов при условии их достаточной продолжительности близка к точности кустовых откачек. Самостоятельное значение наливов и нагнетаний приобретают при оценке проницаемости пород в зоне аэрации.

Для опробования покровных образований, как правило, используются *наливы в шурфы*, хотя качество этих опытов обычно крайне низкое. Коренное их улучшение возможно лишь при резком увеличении масштабов и продолжительности наливов, а также при условии применения прямых методов наблюдения за фронтом увлажнения [7].

К числу все шире применяемых специальных полевых работ относятся *гидрогеофизические исследования* в скважинах. Так, резистивиметрические и термометрические опробования скважин позволяют выделить проницаемые и водоупорные слои и количественно охарактеризовать их проницаемость. В неравномерно трещиноватых и закарстованных породах, а также в многослойных водоносных толщах, хорошие результаты дает применение расходометрии.

Повышению информативности ОФО способствуют также индикаторные запуски по ходу их проведения (см. разд. 7.2).

### 5.3.2. Постановка опытных опробований

При постановке ОФО необходимо учитывать их направленность на определение конкретных геофильтрационных параметров, которые отражаются в результатах опыта по-разному в зависимости от схемы и масштаба опробования. Вместе с тем эффективность опробования существенно зависит от того, проводится ли оно "вообще" или для последующего проектирования конкретного инженерного сооружения. По-

---

<sup>1</sup> При больших глубинах залегания уровня воды наливов с постоянным уровнем даже предпочтительнее одиночных откачек, поскольку при этом резко снижается роль скин-эффекта и инерционности скважины.

этому расположение опытного куста и выбор схемы ОФО желательно увязать хотя бы с самыми общими представлениями о возможном расположении и характере работы объекта (горная выработка, дренаж). Это делает более ясными цели откачки (важнейшие параметры, подлежащие определению); позволяет выявить предпочтительные зоны постановки опробований, которые должны отвечать требованию максимальной детальности изысканий на ключевых участках области фильтрации (участки расположения карьера, прилегающие к нему граничные зоны пласта и т.п.); дает возможность увязать схему опробования гидрогеологического разреза с ожидаемым при эксплуатации характером взаимодействия водоносных пластов (например, потребуется в прогнозах параметр перетекания или нет).

Опытные работы проводятся в пределах намеченных глубин и площади изучения гидрогеологического строения месторождения (см. разд. 5.1).

Кустовые откачки проводят в основном вблизи предполагаемого участка первоочередного вскрытия, если его можно наметить по результатам предварительной разведки. В противном случае их приурочивают к наиболее характерным участкам в пределах площади месторождения, намечаемой к разработке (участки максимальной и средней проводимости).

Кроме того, кустовые откачки иногда целесообразны вблизи намеченных границ водоносного горизонта (реки, крупные тектонические нарушения и т.п.), находящихся в пределах площади месторождения или в непосредственной близости от него (ориентировочно — в зоне влияния строительного водопонижения [см. формулу (5.1)]), если характер условий на этой границе не установлен с необходимой достоверностью и не может быть выявлен с помощью режимных наблюдений (см. разд. 5.4). В частности, связь подземных вод с реками, имеющими закольматированное русло, нередко проще выявить по данным режимных наблюдений в паводковый период, чем опытными работами.

Для окончательного выбора участков проведения кустовых откачек весьма полезно и даже необходимо предварительное опробование водоносного горизонта с помощью одиночных откачек (или нагнетаний — в трещиноватых породах). Поэтому основной объем кустовых откачек обычно приходится на последние стадии гидрогеологических исследований, когда для наблюдений можно использовать и скважины режимной сети.

На остальной (не охваченной кустовыми откачками) части площади, подлежащей изучению, можно ограничиться более простыми и дешевыми видами опытных работ — одиночными откачками, нагнетаниями (в трещиноватых породах), наливками (для изучения проницаемости поровых отложений), геофизическими исследованиями.

Важнейшее правило, которое необходимо соблюдать при постановке конкретного опробования — ограничение разумным минимумом круга



решаемых задач, причем этот круг должен быть по возможности очерчен определенной (априорно ожидаемой) схемой интерпретации. Отсюда следует, что грамотная постановка опытного опробования обычно исключает или сводит к минимуму наложение различных осложняющих факторов с тем, чтобы каждый из них изучался отдельными экспериментами или, по крайней мере, на разных, достаточно длительных стадиях эксперимента.

Согласно этому правилу, расположение опытного куста должно по возможности гарантировать простейшую (плоскорадиальную) структуру потока и исключить влияние на результаты опыта плановых границ пласта или контактов зон с резко различающимися проводимостями (кроме тех случаев, когда изучение условий на границе или вблизи нее является целью опыта). В первом приближении это правило соблюдается в том случае, когда все скважины куста удалены от границы на расстояние, превышающее интервал между центральной и дальней наблюдательной скважинами.

Большое значение для повышения качества ОФО имеет внедрение эффективных методов контроля за ходом экспериментов, а также сочетание откачек с другими видами исследований. Следует отметить важность предварительного лабораторного изучения ряда физико-механических свойств пород, и в первую очередь сжимаемости, на образцах, отобранных из водоносных и разделяющих слоев [5]. Очень важным условием, особенно при исследовании слоистых и трещиноватых сред, является проведение при опытных откачках расходометрических и резистивиметрических наблюдений.

В связи с большой сложностью фильтрационного процесса при откачке обоснование постановки и структуры опытного опробования следует давать на основе предварительного прогноза его режима; другими словами, качественное проведение эксперимента предполагает его заблаговременное планирование хотя бы в основных чертах. Упомянутый прогноз (разведочный расчет) выполняют, исходя из возможной фильтрационной схемы, ориентировочных значений основных расчетных параметров и предполагаемой схемы опытного куста. При прогнозе рассчитывают ожидаемые понижения уровня в наблюдательных скважинах в пределах возможной продолжительности откачки и при заданном ее дебите, а также делают прикидочные оценки чувствительности эксперимента по отношению к тем или иным параметрам. Понятно, что определение параметров, по отношению к которым эксперимент оказывается нечувствительным, должно заранее исключаться из круга задач, решаемых откачкой.

Один из главных факторов, определяющих эффективность откачки, — ее продолжительность. Поскольку возможности одиночных опробований с точки зрения представительности и надежности результатов ограничены и мало зависят от продолжительности опыта, то их длительность может не превышать 0,5–2 сут. Продолжительность кустового опробования существенно зависит от условий на участке эксперимента и поэтому не может жестко регламентироваться. В первом приближении ее следует назначать с учетом результатов предшествующих изысканий,

исходя из условий достаточно полного проявления всех изучаемых процессов.

Наиболее четким критерием для прекращения кустовой откачки в изолированных напорных пластах гомогенных пород служит выход на общую асимптоту комбинированных графиков  $S = f[\ln(t/r^2)]$ , построенных для различных наблюдательных скважин ( $S$  — понижение;  $t$  — время;  $r$  — расстояние до наблюдательной скважины). Следует отметить, что уменьшение скорости понижения в скважине до величин, близких к погрешности измерения, в общем случае не является признаком достижения установившегося режима фильтрации и, следовательно, не может быть основным показателем для прекращения откачки.

Особую значимость при обосновании продолжительности опробования имеет его направленность на определение тех или иных геофильтрационных параметров. При этом следует иметь в виду некоторые положения, вытекающие из теоретического анализа:

1) роль проницаемости или проводимости опробуемого пласта проявляется уже при сравнительно небольшом размере зоны опробования и, следовательно, для ее определения достаточно проведения относительно кратковременных опытов (обычно в пределах суток, если только при этом обеспечивается надежная интерпретация результатов эксперимента);

2) характер емкостных свойств пласта и роль процессов перетекания из разделяющих слоев проявляются при достаточно больших размерах области влияния, который достигается обычно в течение нескольких суток для напорных систем и в течение 10–20 сут для безнапорных;

3) взаимодействие с поверхностными водотоками и водоемами для расположенных поблизости опытных скважин чаще всего проявляется в течение 10–15 сут, но это время может существенно изменяться в зависимости от степени кольматации дна водотока или водоема и удаления от него опытного куста;

4) взаимодействие между различными водоносными пластами, разделенными выдержанными по мощности слабопроницаемыми слоями, проявляется только при мощных и длительных откачках, продолжительность которых часто измеряется неделями и даже месяцами.

Большую продолжительность должны иметь также опробования трещинно-жильных вод и откачки в массивах закарстованных пород, где большие емкостные запасы в сочетании со сравнительно малыми уклонами депрессионной кривой часто приводят к завышению расчетной проводимости при интерпретации кратковременных откачек. Следует, однако, иметь в виду, что целесообразность постановки опытных откачек увеличенной продолжительности должна быть предварительно тщательно и всесторонне проанализирована: нередко информативность откачек при увеличении их продолжительности не повышается и упор разумнее делать на опытно-эксплуатационные работы.

В процессе проведения опыта предварительно намеченную продолжительность его уточняют по данным наблюдений за уровнями: первые результаты наблюдений обрабатывают в соответствии с заранее намеченной методикой и опыт продолжают до получения надежного результата.

Обязательным элементом определения допустимости прекращения эксперимента являются составленные в процессе откачки индикаторные графики (например,  $S = f(\ln t)$ ). Откачка, как правило, может быть прекращена лишь после получения четко выраженной картины временной изменчивости уровней, характерной для данных условий.

### 5.3.3. Объемы опытных работ

Вопрос об объемах опытных работ на месторождении — один из наиболее сложных: согласно принципу обратной связи (см. разд. 5.5.3), при его решении должны учитываться условия работы горного предприятия, которое будет проектироваться по результатам разведки. В настоящее время назначаемые объемы опытных работ не имеют достаточно четкого теоретического обоснования, так что ниже мы попытаемся осветить лишь общие подходы к такому обоснованию и некоторые конкретные (весьма ориентировочные) рекомендации, которые были разработаны для периода детальной разведки месторождений, *намеченных к освоению открытым способом*.

Для предварительного определения объемов опытных работ введем понятие условного притока в карьер, под которым будем понимать величину притока в выработку с приведенным диаметром 500 м на момент времени  $t = 1$  год при понижении уровня на контуре карьера до отметки подошвы водоносного горизонта, вскрываемого карьером, или (при не вскрытом водоупоре) до ориентировочной отметки заглубления карьера в течение строительного периода.

Таблица 5.1

Степень сложности месторождений	Условные притоки, $\text{м}^3/\text{ч}$	Число одиночных скважин на $1 \text{ км}^2$ при различной величине опробуемой площади			Общее число кустовых опробований
		$< 5 \text{ км}^2$	$5 - 15 \text{ км}^2$	$> 15 \text{ км}^2$	
Простые	$< 100$	0,5–0,7	0,3–0,5	0,2–0,3	1
	100–400	0,7–1,2	0,5–0,7	0,3–0,5	1–2
	$> 400$	1,2–1,5	0,7–1,2	0,5–0,7	2–3
Сложные	200–700	1,2–1,5	0,7–1,2	0,5–0,7	2–3
	700–2000	1,5–2,0	1,2–1,5	0,7–1,2	3–4
	$> 2000$	2,0–3,0	1,5–2,0	1,2–1,5	3–4 и
					мощная кустовая откачка*
Особенно сложные	$> 1000$	2,0–3,0	1,5–2,0	1,2–1,5	3–4 и ОВ или ОЭВ**

\* Продолжительность мощной кустовой откачки порядка 1–2 мес.

\*\* ОВ — опытное водопонижение; ОЭВ — опытно-эксплуатационное водопонижение.

Ориентировочные объемы опытных работ на *каждый водоносный горизонт* могут проектироваться в зависимости от величины условного притока из него и площади, подлежащей изучению (табл. 5.1).

При необходимости дополнительного изучения условий на границе области фильтрации рекомендуемое в табл. 5.1 число кустовых откачек может быть увеличено за счет откачки, проводимой вблизи границы. При назначении такой откачки следует предварительно путем расчетов или моделированием убедиться в том, что в зависимости от условий на границе расчетные притоки могут существенно меняться. И наоборот, если вблизи намечаемого карьера находятся река или водоем, которые могут заранее обоснованно рассматриваться как источник обеспеченного питания опробуемого горизонта и определять основные притоки к карьору, приводя к быстрому установлению уровня при проведении водопонижения, то число кустовых откачек может быть сокращено в 1,5–2 раза, а от мощной кустовой откачки можно отказаться.

При одиночных опробованиях обычно ставится задача определения проводимости, при кустовых – оцениваются оба основных расчетных параметра (проводимость и смкость).

При необходимости изучения связи между отдельными горизонтами оцениваются и параметры перетекания; однако постановку длительных откачек специально для учета "перетекания" через слабопроницаемые слои глинистых пород мощностью более 5 м (при отсутствии в них достаточно выраженной трещиноватости) следует признать в общем случае нецелесообразной, так что необходимо ориентироваться на изучение этого процесса опытно-эксплуатационным (опытным) водопонижением или по наблюдениям при строительстве карьера.

При частом переслаивании водоносных и водоупорных пород выделение в разрезе отдельных водоносных горизонтов затруднительно или лишено смысла и весь комплекс рассматривается как единая водоносная толща. Откачками в этом случае опробуется многослойная толща в целом, причем для дополнительной расшифровки результатов должна использоваться расходометрия.

Предварительно намеченные объемы опытных работ постепенно уточняются в процессе исследований: после проведения первых опытов получают расчетные параметры и по ним делают пересчет условных притоков; затем проводят второй цикл опытов, определяют усредненные параметры, уточняют условные притоки и т.д.

Указанный подход к выбору объемов опытных работ следует рассматривать лишь как некоторую приближенную схему, от которой в каждом конкретном случае возможны те или иные отклонения. Например, если вблизи изучаемого участка в аналогичных условиях работает карьер или шахта, то число откачек может быть значительно уменьшено. Если на месторождении есть скважины иного назначения, но пригодные для проведения опытных работ, то их также следует использовать для проведения опытных откачек. Стоимость опыта будет в этом случае невелика и результаты его в дальнейшем полностью оправдают затраты, поскольку надежность расчетных параметров будет повышена.

Необходимо подчеркнуть, что установление прямой зависимости между объемами опытных работ и плотностью сети разведочных скважин представляется необоснованным, так как сложность гидрогеологических условий месторождения не всегда определяется только сложностью его геологического строения.

## **5.4. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Опыт осушения месторождений полезных ископаемых показывает, что проектная схема осушения, разработанная на основе данных детальной разведки, не во всех случаях оказывается оптимальной. Необходимость уточнения или изменения первоначально запроектированной схемы осушения обусловлена тем, что материалы детальной разведки, даже выполненной на высоком уровне, часто не могут дать достаточно полного представления о гидрогеологических условиях месторождения. Кроме того, многие процессы, развивающиеся в результате вскрытия и дренирования месторождения, нередко не могут быть заранее описаны количественными закономерностями из-за сложности математической интерпретации процесса или трудностей определения соответствующих расчетных параметров.

Материалы, необходимые для уточнения и корректировки проектной схемы осушения, а также составления проектов осушения последующих очередей отработки месторождения, могут быть получены на основании специально поставленных исследований и наблюдений за подземными и поверхностными водами в период строительства и эксплуатации горного предприятия, которые имеют, таким образом, две функции – контрольную и опытную. Основной объем материала данного раздела дается на примере открытых горных работ; специфика подходов при подземной разработке рассмотрена в гл. 3.

### **5.4.1. Основные цели и задачи гидрогеологических наблюдений**

*Основные цели гидрогеологических наблюдений следующие:*

осуществление гидрогеологического надзора на месторождении для соблюдения нормальных условий строительства и эксплуатации карьера, обеспечения безаварийной работы осушительных устройств и предупреждения опасных деформаций пород в откосах;

уточнение принятых в проекте технологических и расчетных схем, а также основных расчетных параметров для внесения необходимых изменений в первоначальную схему осушения;

– уточнение прогноза режима подземных вод по результатам первого этапа осушительных работ;

обобщение опыта осушительных работ.

Наблюдения позволяют также полнее использовать принцип аналогии при проектировании осушения новых карьеров.

---

Гидрохимические аспекты этих наблюдений рассмотрены в разд. 7.3.

Наблюдения и гидрогеологические исследования при строительстве и эксплуатации горного предприятия проводятся его гидрогеологической службой в следующих *основных направлениях*: а) стационарные режимные наблюдения за подземными водами (по сети наблюдательных скважин); б) наблюдения за строительством и эксплуатацией дренажной системы; в) наблюдения в карьере и на отвалах; г) наблюдения при опытно-эксплуатационном водопонижении; д) наблюдения за поверхностными водами для выявления их связи с подземными водами.

*Уточним основные вопросы, подлежащие изучению.*

1. В процессе вскрытия месторождения и проходки дренажных выработок уточняется гидрогеологическое строение: положение и строение водоносных и водоупорных комплексов, местонахождение пониженных участков водоупорного ложа, степень трещиноватости пород (в том числе и глинистых) и ее изменение по площади, наличие тектонических нарушений, карстовых полостей и характер их заполнения и т.д.

2. Наблюдения за уровнями подземных вод должны дать возможность уточнить условия питания и взаимодействия отдельных водоносных горизонтов: выявить связь подземных вод с поверхностными водоемами, реками, болотами и т.п.; установить изменение этой связи во времени; найти участки интенсивного инфильтрационного питания; определить степень развития процессов перетекания через слабопроницаемые слои; установить наличие "окон" в водоупорных слоях; выяснить взаимосвязь отдельных водоносных комплексов на тех участках, где они контактируют.

3. Наблюдениями уточняются основные расчетные параметры (коэффициент фильтрации, проводимость, водоотдача, уровень или пьезопроводность) и оцениваются их изменения по отдельным участкам области фильтрации; уточняются или определяются заново коэффициенты фильтрации пород, слагающих русло рек и дно водоемов, подпитывающих водоносные горизонты, а также коэффициенты фильтрации слабопроницаемых разделяющих слоев. Следует отметить, что точность оценки расчетных параметров по данным наблюдений гораздо выше, чем по данным опытных опробований, по ряду причин: большие размеры "области влияния" и градиенты фильтрации, большее время фильтрации.

4. Наблюдениями выявляются параметры депрессионной (пьезометрической) воронки и притоки в карьер и дренажные выработки. Эти данные в сочетании со сведениями об основных расчетных параметрах должны быть положены в основу прогнозов величин расходов и уровней на последующие годы эксплуатации карьера.

5. На основании обследования дренажных скважин, данных об расходах и химизме подземных вод должны изучаться процессы зарастания и колюматации фильтров и изыскиваться средства для увеличения водозахватной способности скважин.

6. В результате наблюдений за состоянием дренажных выработок должны уточняться критерии их устойчивости и приниматься дополнительные меры по ее обеспечению.

7. Наблюдениями за фильтрующими откосами устанавливается зависимость масштабов фильтрационных деформаций от расходов и градиентов потока и уточняются допустимые удельные притоки к откосам (см. разд. 1.2 и 1.4) с учетом возможной концентрации высачивающихся вод на участках понижения водоупорного ложа (степень концентрации также уточняется наблюдениями).

8. Наблюдениями за откосами в сочетании с испытаниями образцов пород, взятых вблизи поверхности откоса, оценивается изменение во времени и с глубиной прочностных свойств глинистых пород в результате процессов набухания

(см. разд. 1.3) с целью более полного учета этих процессов при выборе углов откосов.

9. На месторождениях, в разрезе которых присутствуют легкорастворимые породы, наблюдениями устанавливаются условия, устраняющие интенсивное развитие процессов растворения.

10. С помощью специально заложенных реперов контролируется оседание поверхности, вызванное водопонижением (см. разд. 1.1).

11. На внутренних отвалах, сложенных склонными к "разжижению" (см. разд. 1.1) пылеватыми породами, контролируется мощность зоны полного водонасыщения. В ряде случаев посредством специальных датчиков определяют избыточное поровое давление, возникающее в глинистых породах отвалов большой высоты. Эти наблюдения способствуют более обоснованному выбору параметров отвалов.

12. Систематический отбор проб полезного ископаемого на участках борта, характеризующихся различной степенью обводненности, позволяет оценить изменение влажности полезного ископаемого в процессе вскрышных работ и осушения карьера (см. разд. 1.4). На основании таких оценок можно уточнить представления о влиянии дренажных работ на влажность полезного ископаемого.

13. Наблюдения за проведением вскрышных и добычных работ при различной обводненности забоев дают возможность более объективно оценить влияние подземных вод на условия работы оборудования, а также роль дренажа с точки зрения улучшения этих условий (см. разд. 1.4).

14. На основании результатов наблюдений должны вырабатываться экономические критерии, позволяющие установить оптимальные изменения в проектной схеме дренажа карьера.

Необходимость изучения тех или иных перечисленных выше факторов определяется сложностью гидрогеологического строения месторождения, а также принятыми схемами горных и дренажных работ.

В заключение следует подчеркнуть неразрывную связь гидрогеологических наблюдений с инженерно-геологическими [5].

#### **5.4.2. Наблюдения за строительством и эксплуатацией дренажной системы**

Бурение водопонижающих скважин, сквозных фильтров и поглощающих скважин обычно сопровождается гидрогеологическими наблюдениями и составлением гидрогеологической документации.

Рассмотрим более подробно *наблюдения при проходке подземных дренажных выработок*. При составлении геологической и гидрогеологической документации (в частности, в процессе проведения в выработках гидрогеологической съемки масштаба 1:2000 – 1:5000) следует уделять особое внимание участкам интенсивных водопроявлений, фиксируя не только величины притоков, но и состав и объем выносимого рыхлого материала. Если водопроявление приурочено к трещине, то необходимо изучить состав заполнителя, чтобы оценить возможность прогрессирующего выноса его напорными водами (см. разд. 1.4).

При проходке подземных дренажных выработок в закарстованных породах, а также в массивах, разбитых многочисленными дизъюнктивными нарушениями, необходимо вести постоянные наблюдения за водо-

проявлениями в опережающих скважинах с целью предотвращения неожиданных прорывов.

При проходке дренажных штреков под водоносными горизонтами в условиях малой мощности водоупорных пород в кровле выработок следует проводить регулярный контроль мощности водоупорной кровли и напоров на нее с помощью зондировочных скважин. По полученным данным оценивают устойчивость кровли (по зависимостям, известным из механики горных пород) и прогнозируют участки возможных прорывов подземных вод (см. разд. 3.5). Для обнаружения зон обводненности в ряде случаев успешно используются геофизические методы.

*Наблюдения за работой дренажных устройств* — поземных дренажных выработок, сквозных и забивных фильтров, водопонижающих скважин и т.п. — предусматривают систематический контроль их состояния и расходов воды. Так, для определения расхода в штреке устраивают водомерные посты, на которых проводят замеры водомером или "вертушкой". На выпускную часть фильтра обычно надевают отвод с вентилем, с помощью которого производят замеры расхода фильтра не реже одного-двух раз в месяц (в паводок чаще).

Контроль дебитов дренажных устройств позволяет ликвидировать недостаточно эффективно работающие водопонижающие скважины и наметить участки, требующие дополнительного дренажа или интенсификации работы действующих устройств. Кроме того, полученные данные в сочетании с результатами наблюдений за уровнями позволяют провести количественную интерпретацию процесса дренирования месторождения.

Наблюдения за работой дренажных устройств часто оказываются незаменимыми и для оценок, которые невозможно получить по данным разведки. Так, для многих пластовых месторождений или при слонстом строении кровли продуктивной залежи (Яковлевское, Южно-Белозерское железорудные и другие месторождения) величина возможных водопритоков в горные выработки часто определяется вертикальной проницаемостью, точнее — составляющей, нормальной к напластованию. Ясно, что оценка этой величины по данным разведочных работ практически невозможна, поэтому прогнозные построения в таких случаях должны ориентироваться на данные наблюдений за водопритоками в период подготовительных работ, когда проводятся первые горизонтальные горные выработки.

Ценный материал могут дать также замеры уровней в дренажных скважинах (когда это возможно) или по затрубным пьезометрам: он позволяет оценить сопротивление прифилтровой зоны скважины, обусловленное как сопротивлением фильтра, так и процессами коагуляции.

При организации наблюдений за работой насосов открытого водоотлива особое внимание необходимо уделять контрольным объемным замерам расходов канав и трубопроводов, по которым вода поступает к открытым водосборникам, а также выявлению факторов, осложняющих работу средств открытого водоотлива в зимних условиях.

Гидрогеологическая служба рудника должна систематически накапливать фактические данные об экономической эффективности действующих дренажных устройств, обращая внимание, в первую очередь, на та-



кие экономические показатели, как стоимость проходки 1 м дренажных скважин и подземных выработок, стоимость 1 м<sup>3</sup> откачанной воды, стоимость проходки и оборудования 1 м наблюдательных скважин, стоимость укладки горизонтального прибортового дренажа и т.д. Только оперируя такими показателями, можно составить объективное мнение о преимуществах и недостатках тех или иных средств дренажа и внести в первоначальную схему обоснованные изменения.

### **5.4.3. Стационарные наблюдения за режимом подземных вод**

Цель режимных наблюдений — уточнение разделения толщи на отдельные водоносные горизонты, изучение режима уровней, химического состава, а также условий питания и стока подземных вод. При этом собственно гидрогеологические наблюдения должны сочетаться с метеорологическими и гидрологическими.

Для изучения режима подземных вод в районе месторождения ведутся систематические наблюдения за уровнями по сети наблюдательных скважин. Для наблюдений могут использоваться различные скважины: соответствующим образом оборудованные разведочные, специально проходимые гидрогеологические, а также скважины наблюдательной сети действующих шахт и карьеров. Основное требование к оборудованию наблюдательной скважины — сохранение естественных условий фильтрации в районе ее расположения и прежде всего недопущение перетекания по ее стволу при оборудовании на отдельные водоносные горизонты. Поэтому при включении в наблюдательную сеть геологоразведочных скважин, не оборудованных соответствующим образом, следует относиться к их показаниям достаточно осторожно.

Наблюдениями охватываются все водоносные горизонты или комплексы, которые подлежат глубинному дренажу, в том числе и водоносные горизонты лежащего блока, из которых возможен прорыв воды в карьер или которые оказывают заметное влияние на устойчивость бортов. При открытом дренаже проводятся наблюдения в водоносных горизонтах, приуроченных к рыхлым несвязным породам, если ожидается значительное оплывание их в откосах, а также в водоносных комплексах трещиноватых пород на тех участках, где, благодаря наличию непроницаемых перемычек, можно ожидать консервации высоких напоров в бортах карьеров.

На каждый из этих водоносных горизонтов (комплексов) должны оборудоваться обособленные пьезометры. Оборудование наблюдательных скважин на первый от поверхности водоносный горизонт обязательно во всех случаях, поскольку площадное питание подземных вод инфильтрующимися осадками оказывает наибольшее влияние на положение уровней грунтовых вод.

Необходимо стремиться к тому, чтобы к началу водопонижительных работ надежно функционировали следующие скважины:

1) внутри водопонижающего контура (если он существует) или на площади разрезной траншеи;

2) по линии дренажного контура (при наличии дренажных штреков можно использовать пьезометры, пройденные из дренажных выработок);

3) за водопонижающим контуром (или за пределами разрезной траншеи) в пределах площади предполагаемого влияния водопонижения;

4) дополнительные вблизи границ водоносных пластов, на участках крупных тектонических нарушений, на стыках слоев с резко различными проводимостями, а также вблизи открытых водоемов, рек, участков вторичного поглощения и других участков притания подземных вод.

На высоких отвалах глинистых пород целесообразно организовать наблюдения за поровым давлением (см. разд. 1.1) по системе специальных датчиков.

Необходимое число наблюдательных скважин определяется многими факторами: сложностью гидрогеологического строения месторождения, размером карьерного поля, площадью распространения дренируемых водоносных горизонтов или ожидаемыми границами развития депрессионной воронки, влиянием подземных вод на условия ведения горных работ, намеченным объемом дренажных работ. Число таких скважин трудно однозначно регламентировать. Для сугубо ориентировочных оценок в условиях выдержанных по площади водоносных горизонтов можно использовать следующие рекомендации:

к началу водопонижения внутри дренажного контура или по площади разрезной траншеи должно располагаться не менее 15 скважин на основной водоносный горизонт и не менее пяти на прочие горизонты, отмеченные выше;

на участках откосов, где может ожидать возникновение оползневых явлений или значительных фильтрационных деформаций, вызванных действием подземных вод, следует иметь "лучи" из двух-трех наблюдательных скважин на каждые 300–600 м протяженности участка (скважины проходят вблизи откоса);

по линии дренажного ряда следует иметь одну наблюдательную скважину на каждые 200–300 м ряда в период строительного водопонижения и на каждые 300–600 м в период эксплуатации (на основной водоносный горизонт);

для остальной площади предполагаемого влияния водопонижения целесообразное число скважин можно ориентировочно назначать в соответствии с рекомендациями, приведенными в табл. 5.2 (без скважин, расположенных на площади разрезной траншеи или в пределах дренажного контура).

Таблица 5.2

Расчетные притоки к карьеру на конец стро- ительного периода, $\text{м}^3/\text{ч}$	Число наблюдательных скважин на $1 \text{ км}^2$ при различной площади ожидаемого влияния водопонижения		
	$< 5 \text{ км}^2$	$5 - 25 \text{ км}^2$	$> 25 \text{ км}^2$
$< 200$	0,7–1,0	0,5–0,7	0,3–0,5
200–300	1,0–1,3	0,7–1,0	0,5–0,7
300–700	1, 1,6	1,0–1,3	0,7–1,0
700–1500	1,6–2,0	1,3–1,6	1,0–1,3
1500–3000	2,0–2,5	1,6–2,0	1,3–1,6
$> 3000$	2,5–3,0	2,0–2,5	1,6–2,0

Эти скважины в основном определяются по нескольким "лучам", сгущаясь к карьру (водопонижающему контуру).

Число дополнительных скважин вблизи рек, крупных нарушений и других границ водоносного пласта определяется в каждом конкретном случае в зависимости от их удаленности от карьера и протяженности.

Для контроля работы наблюдательных скважин следует проводить периодические замеры их глубины, а также пробные наливов или откачки и желонирования с целью выявления возможной глинизации фильтра.

Частота замеров уровней соизмеряется с амплитудами и скоростями их колебаний, поскольку важно зафиксировать как абсолютные максимумы и минимумы графика колебаний уровня, так и характер поведения уровней в меженьный период. В целом замеры уровней в скважинах обычно проводятся не реже, чем 2—3 раза в месяц, а в периоды паводков, снеготаяния и интенсивных дождей — через каждые три—пять дней. Это позволяет достаточно надежно установить связь колебаний уровней с климатическими факторами — количеством осадков, величиной поверхностного стока, атмосферным давлением и т.д.

По результатам режимных наблюдений составляют следующие документы: карту гидроизогий на характерные моменты времени; графики изменения уровней в наблюдательных скважинах по времени; хронологический график количества осадков; графики изменения дебита дренажных выработок и карьерного водоотлива (по участкам).

Остальные данные, например результаты определения химического состава подземных вод, достаточно иметь в виде журналов и таблиц.

Результаты режимных наблюдений интерпретируют в соответствии с общими принципами решения обратных задач фильтрации [11]. Для этого можно использовать методы и расчетные зависимости, рассмотренные в гл. 4.

В целом замеры уровней в наблюдательных скважинах дают исключительно ценный для оценки эффективности дренажных работ материал. Поэтому следует признать совершенно недопустимым дренирование месторождений в условиях почти полного отсутствия наблюдательных скважин. Затраты на бурение и оборудование наблюдательной сети полностью окупаются увеличением эффективности дренажа, которое становится возможным благодаря анализу результатов наблюдений. Например, на многих буроугольных карьерах ГДР функционирует от нескольких десятков до нескольких сотен наблюдательных скважин, в том числе десятки пьезометров на внутренних отвалах; это позволяет осуществлять надежный контроль за состоянием дренажа и резко дифференцировать его интенсивность в пределах карьерного поля.

Наряду с замерами уровней необходимо проводить регулярный отбор проб подземных вод на химический анализ, который помогает получить представление об участии различных источников питания в формировании подземных вод в период осушения (см. разд. 7.3).

Для определения доли пополнения естественных запасов подземных вод за счет инфильтрации атмосферных осадков на ряде месторождений (особенно в карстовых районах) целесообразна организация гидрометеорологических станций с опорными дожде- и снегомерными постами. Одновременно следует продолжать начатое в период разведки изучение гидрологического режима района месторождения для определения участков и величины поглощения поверхностных вод. С этой целью проводят балансово-гидрометрические стационарные наблюдения на специально оборудованных постах. Особенно важны эти наблюдения в карстовых районах и в районах, приуроченных к замкнутым гидрогеологическим структурам.

#### **5.4.4. Опытнo-эксплуатационное водопонижение**

В ряде случаев, на месторождениях со сложными гидрогеологическими условиями, материалов детальной разведки недостаточно для обоснованного выбора схемы осушения карьерного поля. Причем проведение дополнительных исследований разведочного характера нередко признается нецелесообразным по экономическим соображениям или ввиду сжатых сроков предпроектного периода. В подобных случаях задачу получения дополнительных сведений, необходимых для доработки проекта, а также окончательного выбора и обоснования схемы осушения месторождения (в процессе поэтапного проектирования) решают с помощью опытнo-эксплуатационного водопонижения. Оно может оказаться целесообразным на месторождениях:

1) со сложными условиями питания подземных вод, когда в результате детальной разведки остаются невыясненными условия на границах водоносных пластов (например, река с заиленным руслом) или положение этих границ;

2) в гидрогеологическом строении которых участвует несколько взаимодействующих водоносных горизонтов, характеризующихся достаточно высокой водообильностью (точнее, горизонтов, требующих глубинного дренажа);

3) приуроченных к закрытым мульдообразным структурам;

4) приуроченных к достаточно обводненным, неоднородно трещиноватым или закарстованным породам, проницаемость которых резко изменяется на отдельных участках осушаемого массива.

Во всех перечисленных случаях предварительный расчет осушительного эффекта на основе данных, полученных при проведении опытных откачек, является весьма условным, так как опытные откачки, в силу их относительной кратковременности и ограниченности охватываемой ими территории, нередко не позволяют в подобных условиях выявить достаточно подробно гидрогеологическую обстановку: в первом случае — граничные условия водоносных горизонтов; во втором — значение процессов перетекания; в третьем — скорость возможного истощения водо-

носных пластов; в четвертом — емкостные запасы вод и возможные динамические притоки.

Опытно-эксплуатационное водопонижение проводят по специальному проекту. Схема и время производства такого водопонижения, а также объемы соответствующих дренажных работ намечаются, с одной стороны, с учетом требований по обеспечению нормальных условий ведения работ на участке первоочередного вскрытия (в соответствии со схемами осушения разрезных траншей, изложенными в гл. 2), а с другой, исходя из учета гидрогеологических факторов, подлежащих дополнительному изучению в процессе водопонижения.

Опытно-эксплуатационное водопонижение при достаточно однородном в плане строении водоносных комплексов обычно целесообразно осуществлять контурной системой равноотстоящих водопонижающих скважин (реже в этих целях может использоваться система сквозных или забивных фильтров), окружающих участок первоочередного вскрытия; при наклонном залегании водоносных пластов лучше использовать линейную систему. В условиях неоднородного (в плане) строения водоносных комплексов скважины располагаются в пределах зон с максимальной проводимостью, с пониженными отметками водоупорного ложа и т.д., приуроченных к участку первоочередного вскрытия.

Откачка скважинами ведется из основного водоносного горизонта, если его можно обоснованно выделить в гидрогеологическом строении месторождения. При частом переслаивании водоносных и водоупорных пород целесообразно вести откачку из всей изучаемой водоносной толщи.

Перед проведением водопонижения обязательно оборудуют сеть наблюдательных скважин.

Продолжительность и интенсивность опытно-эксплуатационного водопонижения ориентировочно оценивают расчетом, исходя из требований горных работ и из условия, чтобы подлежащие изучению процессы успели проявиться в достаточной мере. В дальнейшем продолжительность работ уточняют по мере проведения наблюдений за водопонижением, но обычно она составляет 3—6 мес и более.

Откачку лучше всего вести при неизменном режиме, т.е. при постоянных расходах водопонижающих скважин (контролируемых объемами замерами). В процессе водопонижения наряду с замерами уровней подземных вод и дебитов скважин осуществляют комплексные наблюдения по заранее разработанной программе.

## **5.5. ПРИНЦИПЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМАТИЗАЦИИ В СВЯЗИ С ПОСТАНОВКОЙ ОПЫТНЫХ РАБОТ И НАБЛЮДЕНИЙ**

Под гидрогеологической схематизацией (ГГС) понимается совокупность операций, с помощью которых реальная гидрогеологическая обстановка на конкретном объекте упрощается до некоторой расчетной модели. При этом упускаются малозначащие детали, но сохраняются

принципиальные черты изучаемого процесса, определяющие условия функционирования природного и (или) инженерного объекта. Надежная схематизация подразумевает эффективное использование накопленной гидрогеологической информации. В частности, ГГС обеспечивает стыковку общего гидрогеологического анализа, проводимого на качественном уровне, и математической модели процесса. Связывая геологическую основу с ее математическим описанием, ГГС является важнейшим звеном гидрогеологических прогнозов, во многом предопределяющим их точность и надежность.

Вместе с тем положение ГГС на стыке геологического и механического анализов делает ее сложнейшим элементом гидрогеологических исследований, и именно при ее проведении наиболее полно проверяется компетентность специалиста гидрогеолога, его способность сочетать в одном лице геолога и математика-механика. Только такое понимание создает объективную основу для практической реализации эффективных принципов ГГС, предопределяющих ее методы, надежность и связь с решением другой важной проблемы — обеспечением полноты и качества исходной гидрогеологической информации при проведении гидрогеологических изысканий: здесь имеются в виду принципы непрерывности, адаптации и обратной связи.

### 5.5.1. Принцип непрерывности

Это — наиболее очевидный из принципов ГГС, предполагающий последовательное проведение схематизации на всех стадиях освоения объекта на основе преемственности: от первых до последних стадий разведки, далее — к проекту, и, наконец, — к гидрогеологическим наблюдениям при строительстве и эксплуатации инженерного сооружения. В соответствии с этим принципом, ГГС рассматривается как непрерывный многоэтапный процесс построения гидрогеологической модели объекта, уровень точности и надежности которой возрастает от этапа к этапу. Необходимость принципа непрерывности вытекает из принятой на практике последовательности гидрогеологических работ (в частности, разведки) и стадийности накопления информации. Сложности получения и интерпретации этой информации делают непрерывный подход к ГГС единственно эффективным.

В основе этих сложностей прежде всего лежит сильное проявление различных масштабных (пространственно-временных) эффектов, часто делающих невозможным получение достоверной информации по данным сравнительно мелкомасштабных экспериментов, обычно характерных для периода разведки месторождения. К тому же такие эксперименты нередко сильно искажены влиянием трудно учитываемых технических факторов. Здесь достаточно сослаться на все известные [11] ограничения и недостатки опытно-фильтрационных работ, особенно одиночных откачек и экспресс-опробований. Наиболее типичным примером могут служить месторождения, приуроченные к массивам закарстованных карбо-

натных пород, где недостатки такого рода проявляются особенно резко.

Добавим к этому возможность коренных изменений в гидрогеологической ситуации при строительстве и эксплуатации инженерного объекта, трудно учитываемых или вообще не прогнозируемых по данным разведки, — инверсии поверхностных водотоков, которые из областей разгрузки часто превращаются в контуры питания; резкого усиления взаимосвязи пластов в результате перетекания или поступления воды из разделяющих слоев; интенсивного питания и загрязнения подземных вод за счет вновь возникающих технических водоемов, причем характер граничных условий на контуре такого водоема, часто зависящий от наличия в его ложе слабопроницаемых техногенных грунтов, остается неопределенным; техногенных изменений проницаемости в результате деформаций горных пород над подземными выработками.

Отсюда следует, что в довольно широком диапазоне условий с помощью гидрогеологических изысканий практически нельзя получить с необходимой полнотой и достоверностью исходные данные для построения расчетной модели объекта. В подобных ситуациях схематизация результатов разведки на первых этапах должна быть направлена на обоснование самого факта существования неизученных параметров и на их выявление, на доказательство их важности для конечной расчетной модели изучаемого объекта. На основе анализа фактического материала схематизация должна констатировать принципиальную невозможность оценки этих параметров применяемыми методами, вовремя ограничить наращивание объемов соответствующих (с этой точки зрения — бесполезных) видов изысканий и дать доказательную основу для составления программы последующего изучения упомянутых параметров путем более крупномасштабных экспериментов или (что чаще) гидрогеологических наблюдений.

Роль наблюдений в обеспечении непрерывности и преемственности схематизации трудно переоценить: во-первых, в их результатах обычно исключается или сводится к минимуму влияние масштабного эффекта; во-вторых, значения наблюдаемых возмущений (понижений напоров, изменений концентрации вещества и т.п.), как правило, имеют один порядок с ожидаемыми при эксплуатации сооружения, что позволяет избежать серьезных погрешностей прогноза, связанных с недоучетом возможной нелинейности [7] процессов (например, в проявлении емкостных свойств пород); в-третьих, в результатах наблюдений находит отражение влияние техногенных факторов, в том числе тех, которые практически невозможно учесть по данным предварительных изысканий. Эффективным методом схематизации, базирующимся на результатах наблюдений, является решение обратных задач, направленных на определение и корректировку исходных параметров фильтрации или миграции.

В непрерывности схематизации заложены предпосылки для реализации следующих двух принципов.

### 5.5.2. Принцип адаптации

Этот принцип предполагает тесную взаимосвязь схематизации с ростом объема и повышением качества гидрогеологической информации, причем важнейшим в таком определении является именно взаимный характер этой связи. С одной стороны, в процессе непрерывной схематизации проводятся постоянное обновление и перестраивание расчетной модели объекта в соответствии с новой информацией, поступающей на каждой стадии изысканий и наблюдений; с другой, схематизация управляет процессом накопления информации при гидрогеологических изысканиях и наблюдениях, которые, в свою очередь, приспосабливаются к требованиям модели, "самообучаются" через ее посредство. Короче говоря, модель помогает получить новую информацию, через нее осуществляются руководство разведочным процессом, его оптимизация. Уровень такой взаимной адаптации постепенно повышается по мере проведения изысканий и наблюдений. Проследим это на примере опытно-фильтрационных исследований.

На первом этапе схематизация обычно позволяет включить изучаемый водоносный комплекс в типовые классификационные рамки [7]. На следующем этапе этот первый вариант расчетной модели используют уже для уточнения целесообразных видов опытных опробований и методики их проведения, причем главный упор пока делают на сравнительно недорогие – мелкомасштабные и кратковременные – опробования (например, пробные и одиночные откачки). Оценка данных первой серии таких опробований (в частности, при сопоставлении с единичными контрольными экспериментами более крупного масштаба) позволяет охарактеризовать их достоверность и наметить целесообразные объемы. Для этого используют различные статистические оценки, отражающие изменения совокупности расчетных параметров (например, среднего квадратичного отклонения) по мере роста числа однотипных опробований. Новый этап опытных работ характеризуется гораздо более широким привлечением крупномасштабных и более длительных опробований (кустовых откачек), причем выбор участков их проведения и планы этих экспериментов отталкиваются от расчетных моделей, обоснованных предшествующими опробованиями. Дальнейшая адаптация проводится непосредственно по ходу экспериментов с использованием их индикаторных графиков.

Разумеется, подобное оперативное планирование изысканий требует от специалиста достаточно ясного понимания теоретических основ фильтрационных процессов при опытных опробованиях: проводя схематизацию, он должен все время ориентироваться на возможную в данных условиях расчетную модель процесса. И наоборот, адаптация расчетной модели проводится наиболее эффективно при привлечении к анализу различного рода аналогий, базирующихся прежде всего на личном опыте специалиста, на его умении комплексно оценить и увязать в единой модели разнородную информацию.



Наконец, высший уровень адаптации отвечает проектированию и проведению гидрогеологических наблюдений в соответствии с требованиями расчетной модели, полученной на последних этапах изысканий. В таком варианте реализации принципа адаптации особенно тесно связана с необходимостью соблюдения принципа обратной связи, хотя во многих рассмотренных примерах эта связь также предполагалась.

### 5.5.3. Принцип обратной связи

Этот принцип определяет позицию схематизации как связующего звена между гидрогеологическими изысканиями и наблюдениями, с одной стороны, и назначением инженерного сооружения, с другой. Из него следует, что эффективность гидрогеологической разведки решающим образом зависит от степени учета (при ее постановке и проведении) требований, вытекающих из предполагаемых гидродинамического и гидрохимического режимов подземных вод в процессе возведения и эксплуатации инженерного сооружения. Так, при разведке месторождения вблизи крупной реки основная задача опытных опробований сводится к определению проводимости на участке между рекой и будущей горной выработкой: ввиду предполагаемой быстрой стабилизации режима фильтрации выяснению емкостных свойств пласта может отводиться подчиненная роль. Наоборот, при разведке пластового месторождения, приуроченного к закрытой мульдообразной структуре, надежность оценки именно емкостных свойств пород должна иметь решающее значение для прогноза динамики водопритоков в горные выработки.

Другой пример относится к угольному месторождению, где ниже пласта угля под мощным пластом водоупорных аргиллитов залегает слой песчаников с напорными водами. Если месторождение будут разрабатывать подземным способом, то опытно-фильтрационные исследования в песчаниках можно вообще не проводить, так как этот водоносный горизонт не будет влиять ни на водопритоки в шахту, ни на устойчивость горных выработок. Наоборот, при разработке карьером именно для этого водоносного горизонта, способного вызвать крупные оползни, необходимо проектирование специальных дренажных мероприятий и, следовательно, разведка должна обеспечить определение его фильтрационных параметров.

Эти примеры показывают значение схематизации, учитывающей условия работы сооружения, для постановки изысканий. Но сама схематизация не может быть эффективной, если она не учитывает эти условия: схематизация "вообще", схематизация геологического объекта как такового, в инженерной гидрогеологии лишена смысла.

Важнейшим аппаратом для реализации принципа обратной связи является анализ чувствительности. В простейшем варианте он сводится к сопоставительной оценке условий работы сооружения при независимых вариациях расчетных параметров. Например, если, согласно предвари-

тельной схематизации, основные притоки к карьеру связаны с наличием ограниченной по простиранию зоны высокопроницаемых карбонатных пород, то проводят серию "прикидочных" расчетов по средним значениям параметров этой зоны (найденных к данному моменту изысканий) и их усредненным отклонениям в неблагоприятную сторону. По различиям в результирующих значениях водопритока оценивают полноту и качество исходной информации. Так, благодаря анализу чувствительности расчетной модели выделяются участки, на которых необходимо первоочередное наращивание информации, причем ясно указывается, какие именно расчетные параметры нуждаются в серьезном уточнении, а какие являются малозначимыми. И здесь мы приходим к идее "самообучения" гидрогеологических изысканий и наблюдений, реализация которой имеет решающее значение для их оптимизации. Последнее особенно справедливо для гидрогеологических наблюдений, когда принцип "двигаясь, учись" оказывается обязательным условием эффективного инженерного решения.

На рис. 5.1 представлен схематический разрез водоносных комплексов, которые могут принимать участие в обводнении горных выработок при добыче железной руды на одном из месторождений КМА. Верхний комплекс, представленный горизонтально залегающими карбонатными породами, наиболее водообилен, проводимость его составляет примерно  $100 \text{ м}^2/\text{сут.}$  Нижний комплекс крутопадающих рудно-кристаллических пород имеет относительно высокую проницаемость в пределах рудной полосы шириной около 400 м: здесь его проводимость достигает  $70 \text{ м}^2/\text{сут.}$  Водоносные комплексы разделены толщей относительно водоупорных пород, которая, однако, практически выклинивается в пределах рудной полосы.

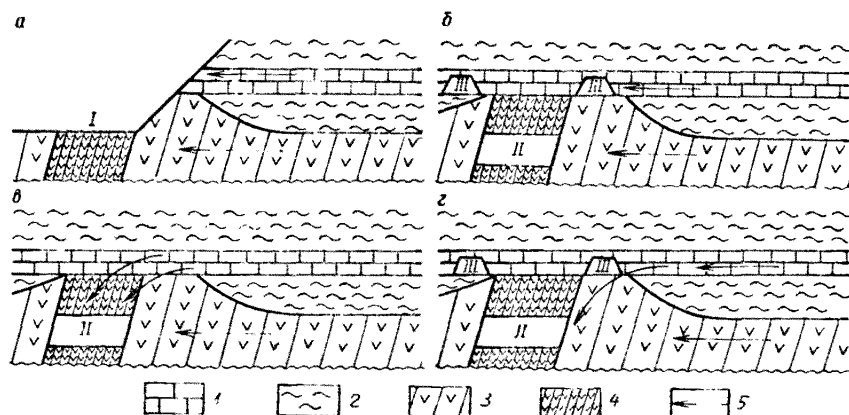


Рис. 5.1. Схемы фильтрационных потоков к горным выработкам:

*а* — при вскрытии месторождения карьером; *б-г* — при подземной выемке руды. *1* — карбонатный водоносный комплекс; *2* — относительно водоупорные породы; *3* — рудно-кристаллический водоносный комплекс; *4* — породы рудной полосы; *5* — преобладающее направление движения подземных вод. *I* — карьер; *II* — подземные добычные выработки; *III* — дренажные штреки

При разработке месторождения карьером оба водоносных горизонта будут вскрыты горной выработкой, и фильтрация к ней будет носить преимущественно плановый характер (см. рис. 5.1,а), поэтому опытно-фильтрационные исследования могли бы, как обычно, ограничиться оценкой горизонтальной проницаемости водоносных комплексов (наряду с емкостными свойствами), которая отражена в приведенных выше значениях проводимости. Однако при подземной разработке добычные горные выработки будут вскрывать лишь рудно-кристаллическую толщу, так что карбонатный комплекс будет обводнять их не непосредственно, а за счет вертикального перетока в основном в пределах рудной полосы (см. рис. 5.1,б). Оценить этот процесс можно лишь при наличии данных о вертикальной проницаемости разделяющих, а также рудно-кристаллических пород; получение таких данных по результатам опытных опробований весьма затруднительно. По крайней мере, на рассматриваемом месторождении они отсутствовали. Оценим возможные отрицательные последствия, связанные с неполнотой информации; при этом будем ориентироваться на проектный вариант дренажа, согласно которому по карбонатной толще проходят дренажные штреки для предотвращения поступления воды из нее в добычные выработки в руде (согласно схеме, приведенной на рис. 5.1,в).

Если параметры вертикальной проницаемости окажутся низкими, то профильная структура потока действительно будет соответствовать проектным представлениям. В противном случае горные выработки, пройденные в рудно-кристаллической толще, вследствие интенсивного вертикального перетока кардинально изменят эту структуру (см. рис. 5.1,г); тогда выработки в карбонатной толще окажутся практически бесполезными.

Следовательно, в создавшейся ситуации проект не может считаться окончательным без дополнительной информации о параметрах вертикальной проницаемости. Так как эту информацию вследствие больших глубин залегания водоносных пород (более 400 м) могут дать лишь дорогие (крупномасштабные и длительные) эксперименты, следует ориентироваться на специальное водопонижение, придав ему одновременно и опытные, и эксплуатационные (т.е. целесообразные по условиям отработки месторождения) функции. Например, проводя откачку из руды группой эксплуатационных скважин, можно добиться необходимого снижения напоров на участке первоочередного вскрытия рудного тела. Если при этом будет должным образом оборудована дополнительная группа наблюдательных скважин, то такое водопонижение одновременно будет играть роль эксперимента, направленного на оценку искомых параметров вертикальной проницаемости. Обработав результаты опытно-эксплуатационного водопонижения, можно будет принять окончательные проектные решения относительно схемы дренажа месторождения.

В целом, последовательная реализация трех рассмотренных принципов схематизации позволяет подойти к изысканиям и наблюдениям как к элементам единого процесса моделирования гидрогеологических условий изучаемого объекта. Роль собственно схематизации в этом процессе весьма многогранна. В частности, важно, что она позволяет увязать разнородную информацию в рамках единой расчетной модели, оценить полноту и качество информации, достоверность модели в целом (точнее — возможность модельного представления объекта на требуемом уровне адекватности). Наконец, ясно, что именно посредством последовательной схематизации, поэтапного построения расчетной модели осуществляется управление разведочным процессом.

1. Какая исходная информация нужна гидрогеологу для решения вопросов, связанных с осушением месторождений твердых полезных ископаемых?
2. Почему требования к глубине и площади изучения гидрогеологических условий, как правило, значительно шире аналогичных требований к изучению чисто геологических аспектов строения месторождения? Почему при гидрогеологической разведке месторождений нельзя ориентироваться на рекомендации, предполагающие размещение разведочных выработок по жесткой сетке?
3. Поясните, каким образом наличие даже тонких "водоупорных" прослоев в толще песков может отразиться на расчетных схемах фильтрации? Как влияет "блоковая" тектоника на характер водопритоков в горные выработки и дренажных мероприятий.
4. Поясните, чем опасны напорные водоносные горизонты в лежащем боку месторождений? Какие характеристики этих горизонтов следует изучить при разведке в первую очередь.
5. Какой вид опытно-фильтрационных работ (ОФР) дает наиболее полную и достоверную информацию о гидрогеологических параметрах водоносных пород? В каких случаях целесообразно ориентироваться на опытные нагнетания и наливов воды?
6. В чем заключается смысл планирования ОФР, какие действия должны предшествовать их проведению? Можно ли планировать ОФР для изучения фильтрационных свойств пород только по геологическим и гидрогеологическим сведениям о месторождении?
7. Какие цели ставятся перед наблюдениями в процессе строительства и эксплуатации горных предприятий? Каковы состав этих наблюдений и решаемые с их помощью задачи? В чем ценность режимных наблюдений? Для чего используются их результаты?
8. Когда целесообразно опытно-эксплуатационное водопонижение? Какие задачи оно решает и почему их, как правило, невозможно решить в процессе детальной разведки?
9. Назовите основные принципы гидрогеологической схематизации. Раскройте их связь с процессом гидрогеологической разведки. Может ли быть реализован принцип адаптации, если игнорировать при этом принцип обратной связи (или наоборот)? Приведите примеры использования этих принципов при гидрогеологической разведке месторождений.

## ГЛАВА 6

# ОХРАНА И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНАХ

## 6.1. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ ИСТОЩЕНИЯ И ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ГОРНЫХ РАЗРАБОТКАХ

Освоение месторождений полезных ископаемых приводит к серьезным изменениям в естественных водном и химическом балансах подземной гидросферы в пределах горнодобывающих и смежных с ними районов [2, 3, 8, 9, 12]. Региональный характер часто приобретает истощение ресурсов подземных вод, в результате которого водозаборы, попадаю-

щие в зону влияния дренажных работ, снижают производительность или выходят из строя; нарушаются условия питания открытых водоемов и водотоков; развиваются мощные зоны техногенной аэрации, что нарушает естественный влажностный режим почв и грунтов. Процессы загрязнения подземных вод обычно имеют более локальный характер; они являются неизбежным результатом отвода, сброса и накопления в поверхностных бассейнах рудничных и технических вод, а также прямым следствием смещения естественных гидрохимических границ при дренаже и водоотливе из горных выработок.

Все это превращает горнодобывающие районы в наиболее "горячие" точки планеты с позиций охраны подземных вод от истощения и загрязнения. Глобальный характер проблемы подтверждается практикой горных разработок в подавляющем большинстве стран. Среди наиболее известных примеров такого рода можно упомянуть Курскую магнитную аномалию (КМА), Донбасс, Криворожский железорудный бассейн, соленосные бассейны Предкарпатья и Предуралья, железорудные провинции Восточной Сибири, буроугольные бассейны ФРГ и ГДР, соленосные и железорудные бассейны ФРГ, США, Канады и Австралии, а также районы разработки медно-никелевых и полиметаллических руд в Канаде, США и Австралии. Исключительная практическая значимость и крупные масштабы проявления упомянутых процессов наряду с их высокой сложностью предопределили интенсивное их изучение во многих странах.

Накопленный опыт доказывает, что проблема охраны подземных вод в горнодобывающих районах имеет серьезную специфику, обусловленную технологией горного производства. Решение этой проблемы требует коренного пересмотра принципов гидрогеологической разведки месторождений и проектирования систем их осушения: подземная вода, традиционно воспринимаемая горняками как "враг производства", должна рассматриваться и как первостепенный экологический фактор, и как важнейшее полезное ископаемое.

Рассмотрим происходящие здесь процессы подробнее. Влияние горного дренажа максимально проявляется в закрытых артезианских структурах, где отмечается необратимое сокращение ресурсов подземных вод. При этом может происходить их перераспределение между отдельными водоносными комплексами в зависимости от условий вскрытия последних горными или дренажными выработками, а также проницаемости разделяющих пластов. Кардинальное перераспределение наблюдается на участках подземных разработок системами с обрушением кровли, где за счет техногенной трещиноватости над выработками образуется зона резко нарушенной сплошности "водоупоров" (см.разд.3.2.).

Иллюстрацией возможных масштабов изменений в гидродинамике напорных водоносных систем могут служить данные об эксплуатации Южно-Белозерского месторождения (см.разд.3.3.). Анализ этих данных показывает, что дренажные работы на месторождении (обеспечившие снижение напоров по контуру рудной залежи более чем на 250 м) привели к формированию в бучакском водоносном горизонте депрессионной воронки радиусом около 30 км (рис. 6.1). В зону влияния горного дренажа попал ряд крупных городских водозаборов, заметно снизивших производительность. Ситуация усугубляется ограниченными возможностями использования дренажных вод, которые подвержены процессам засоления природными глубинными рассолами.

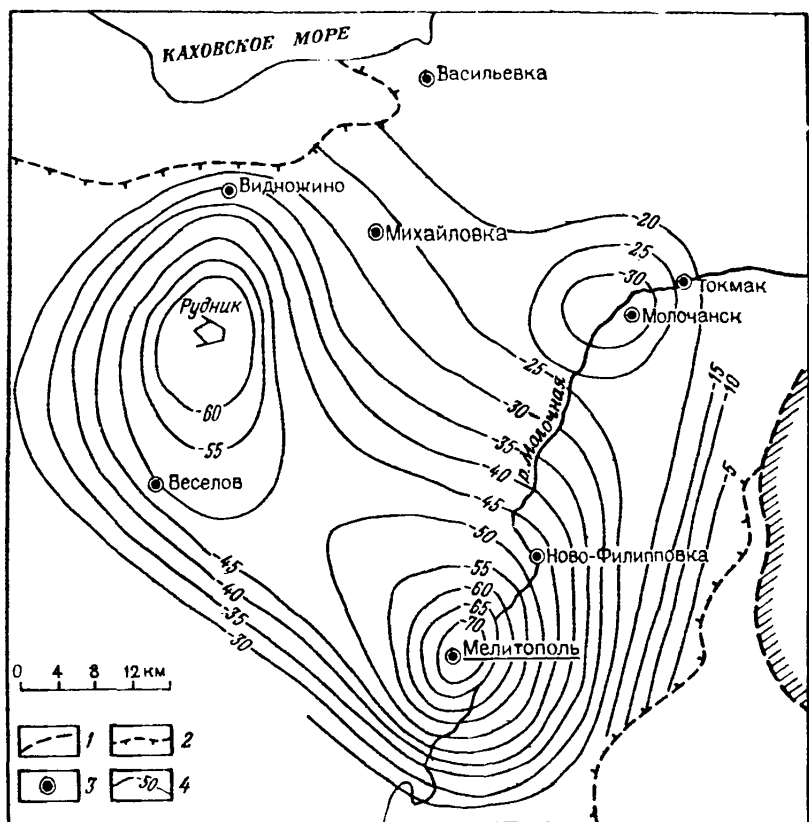


Рис. 6.1. Схема пьезоизогипс бучакского водоносного горизонта:

1 – границы между Приазовским кристаллическим массивом и Причерноморской впадиной; 2 – граница распространения бучакских отложений; 3 – водозабор; 4 – пьезоизогипсы бучакского горизонта, м

Изменение гидродинамического баланса открытых водоносных структур при прочих равных условиях обычно локализуется на меньших площадях. Основную роль в такой локализации играют следующие факторы: 1) естественные водотоки и водоемы, претерпевающие инверсию и из областей стока превращающиеся в области питания; 2) инфильтрационное питание, интенсифицирующееся вследствие нарушения рельефа, частичной ликвидацией покровных отложений и понижения уровней грунтовых вод; 3) крупные технические водоемы, благодаря наличию которых в ряде районов со временем формируется устойчивый воднобалансовый цикл, – объем воды, откачиваемой дренажными системами, частично или даже полностью компенсируется фильтрацией из гидроотвалов, хвостохранилищ и т.п.

Достаточно типичными, в плане рассматриваемых закономерностей формирования нарушенного режима подземных вод, являются горнодобывающие районы КМА. Так, в пределах Губкинско-Стойленского железорудного района [3, 15] основные запасы пресных вод связаны с меловым водоносным комплексом (см. разд. 2.5.) , питание которого осуществляется за счет атмосферных осадков и искусственно созданных водоемов (хвостохранилищ Лебединского и Стойленского горнообогатительных комбинатов, Старооскольского водохранилища и др. (рис. 6.2). Разгрузка подземных вод с интенсивностью около 11 тыс. м<sup>3</sup>/ч происходит в дренажные системы Лебединского и Стойленского карьеров.

Строительство и эксплуатация горнопромышленных предприятий, а также отбор воды для хозяйственного и питьевого водоснабжения привели к значительному нарушению гидродинамического режима подземных вод прилегающей территории и условий их взаимосвязи с поверхностными водами (см.рис. 6.2). Понижение напоров на контурах карьеров достигло 130 м, что вызвало частичное осушение вблизи них меломергельного горизонта. Заметное увеличение региональной депрессионной воронки в широтном направлении обусловлено и действием городских водозаборов. Интенсивные утечки из бассейнов способствовали формированию обширных куполов растекания техногенных вод, во многом определяющих структуру фильтрационных потоков. Менее выраженный характер имеет взаимодействие регионального потока с инфильтрационными водами мелких природных водотоков (р.Осколец и ее притоки) и водоемов, которые из областей стока при нарушенном режиме превратились в источники питания подземных вод.

Резко нестационарный режим фильтрации подземных вод, характерный для первых этапов эксплуатации месторождений, довольно быстро сменился стационарным, что обусловлено относительной близостью дренажных систем к упомянутым выше мощным источникам дополнительного питания водоносных горизонтов. Это способствовало возникновению в районе замкнутого воднобалансового цикла: значительная доля откачиваемой при водопонижении воды после участия в различных технологических процессах возвращается в водоносные пласты.

Отмеченные изменения в подземной гидродинамике во многом определяет возможность, масштабы и специфику загрязнения водоносных комплексов в горнодобывающих районах: интенсифицируется поступление загрязнений с поверхности, в первую очередь, за счет фильтрационных потерь из бассейнов промышленных стоков и поверхностных водотоков, содержащих загрязняющие компоненты; из-за резкого увеличения скорости (как горизонтальной, так и субвертикальной) фильтрации подземные воды становятся активными переносчиками загрязнений; негативные тенденции в изменении качества подземных вод усиливаются благодаря изменению характера и условий взаимосвязи водоносных горизонтов, содержащих воды различного (в том числе некондиционного) состава; отмечается активизация физико-химических процессов как в зоне аэрации (при региональном снижении уровней подземных вод), так и в глубоких зонах обводненного разреза (вследствие поступления вод иного состава).

Изменение исходной гидрохимической обстановки обусловлено прежде всего инфильтрацией из поверхностных техногенных бассейнов (хвосто- и шламохранилищ, прудов-отстойников, гидроотвалов и т.п.) сточных растворов горного производства. Кроме того загрязненные воды поступают с поверхности, нарушенной горными и строительными ра-

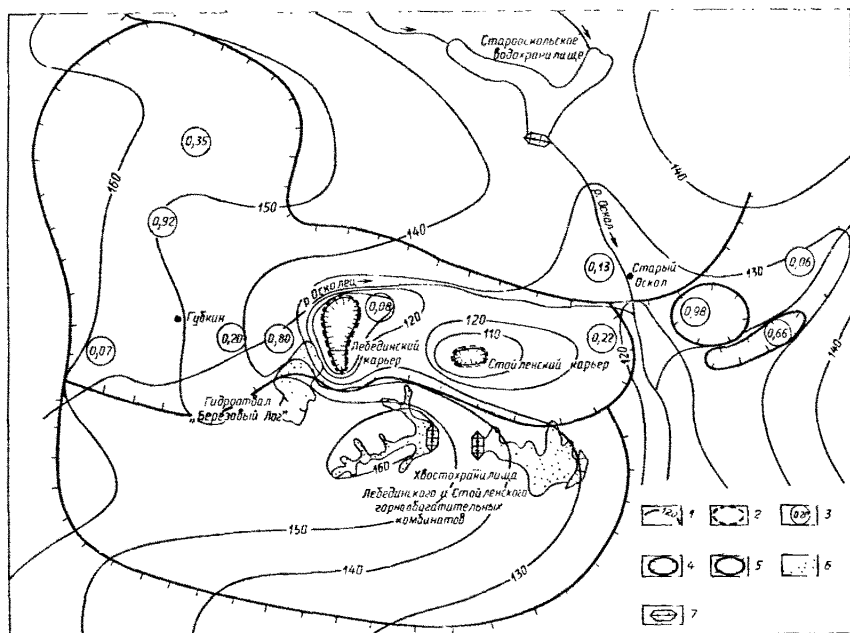


Рис. 6.2. Схема расположения карьеров, гидросооружений и водозаборов подземных вод, совмещенная с картой гидроизогипс (Губкинско-Стойленский горно-промышленный район):

1 - гидроизогипсы; 2 - контуры дренажных систем; 3 - действующие водозаборы подземных вод (цифрами дана производительность, тыс. м³/ч); 4, 5 - области с нарушенным режимом подземных вод с пониженным (4) и повышенным (5) уровнем подземных вод (купола растекания); 6 - намывные отложения; 7 - плотина

ботами (в частности, складированием отвалов), из старых горных выработок или загрязненных естественных водоемов и водотоков.

Например, под действием перечисленных факторов природные подземные воды в Губкинско-Стойленском железорудном районе на значительных площадях частично или полностью заместились техногенными стоками, что обусловило опасность прогрессирующего ухудшения качества воды, отбираемой водозаборами и горными дренажами. В наименьшей степени защищен от загрязнения в этом районе меломергельный водоносный горизонт (см.рис. 2.11), являющийся, наряду с нижележащим песчаным пластом, активным переносчиком компонентов, мигрирующих от поверхности бассейнов промышленных стоков. Интенсивность миграции загрязняющих компонентов к ближайшим контурам разгрузки (дренажные системы, удаленные на несколько километров от карьеров) контролируется преимущественно градиентами техногенного планового потока и внутрипластовыми обменными процессами (см.разд. 7.4.2.).

Наиболее серьезные изменения качества подземных вод наблюдаются на участках накопления в поверхностных бассейнах сильноминерализованных (с повышенной плотностью) промышленных стоков. О масштабе и характере процессов



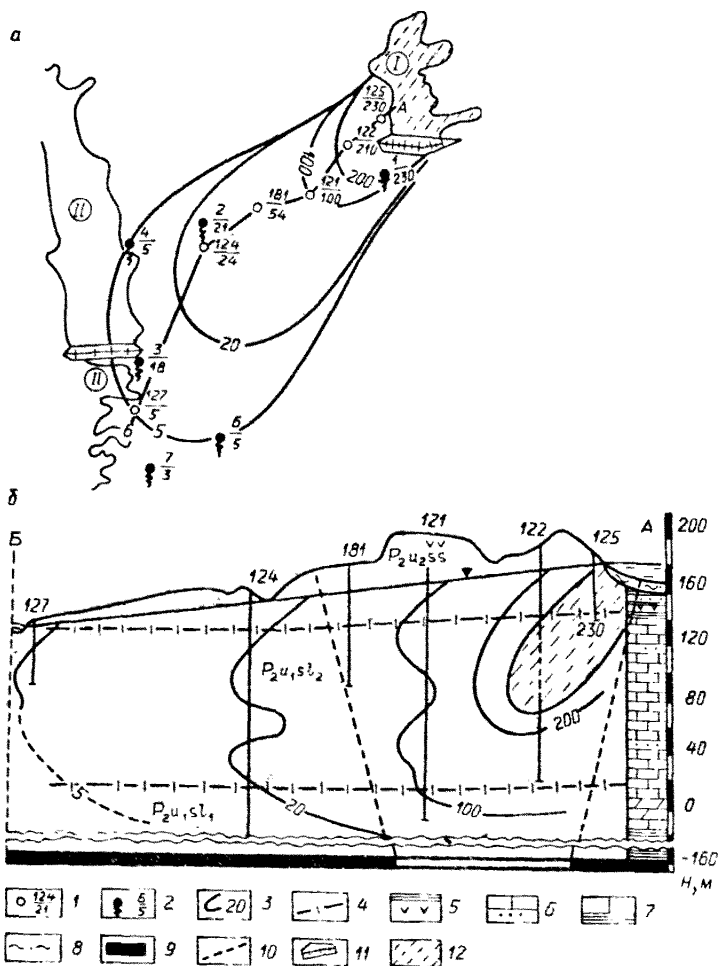


Рис. 6.3. Схема загрязнения подземных вод минерализованными растворами на участке шламохранилище I – долина реки (водохранилище II):

*а* – ореол засоления подземных вод в плане; *б* – гидрохимический профиль (составленный по общей минерализации воды). 1, 2 – скважина и источник (в числителе – номер, в знаменателе – средняя минерализация, г/л); 3 – изолиния величины минерализации, г/л; 4 – стратиграфическая граница; 5 – пестроцветная толща; 6 – терригенно-карбонатная толща; 7 – глинисто-мергелистая толща; 8 – четвертичные отложения в основании шламохранилища; 9 – продуктивный пласт калийных солей; 10 – граница зоны сдвижения пород над горными выработками; 11 – плотина; 12 – исходный рассол

засоления водоносных массивов можно судить по данным, полученным на одном из калийных месторождений Предуралья. Через два-три года после введения в эксплуатацию шламохранилища, куда сбрасывалась пульпа с содержанием солей в жидкой фазе до 250 г/кг, начали проявляться первые признаки засоления водоносного горизонта, представленного терригенно-карбонатными породами. Повышение минерализации отмечалось также в водохранилище (область частичной разгрузки фильтрационного потока), расположенном в нескольких километрах от шламохранилища (рис. 6.3.)

В плане (см.рис. 6.3,а) поперечные размеры ореола загрязнения растут по направлению подземного потока: ширина области засоления подземных вод от источника загрязнения к местам их естественной разгрузки увеличивается примерно в 2 раза. Это свидетельствует о широком развитии в трещиноватых породах процессов планового поперечного перераспределения вещества – смешения сточных и естественных вод, причем, в отличие от описанного выше примера КМА, эти процессы происходят при слабом влиянии утечек из бассейна на общую структуру естественного фильтрационного поля (удельные потери на фильтрацию и удельный расход регионального потока соизмеримы).

В разрезе ореола (см.рис. 6.3,б) отмечается существенная гидрохимическая неоднородность. Наиболее сильно миграционный поток деформируется вблизи источника загрязнения, где четко выражены изменения минерализации как по горизонтали, так и по вертикали. Обращает на себя внимание интрузия неразбавленных рассолов, которая свидетельствует о том, что направленность процесса миграции в значительной степени определяется развитием гравитационной конвекции [7], вызванной различиями в плотности сточных и пластовых вод. Существенная "растянутость" во времени процессов засоления водоносного комплекса объясняется буферными свойствами среды с двойной емкостью: значительный объем соли, поступающей в пласт, идет на насыщение пористых блоков трещиноватых пород.

Кроме того, в период эксплуатации хвостохранилища отчетливо проявились дополнительные факторы, увеличившие активность загрязнения подземных вод. Так, возникновение техногенной трещиноватости в процессе сдвижения пород при их подработке подземными горными выработками (см.рис. 6.3,в) способствовало усилению интенсивности солепереноса в пласте. В зону активного сдвижения горных пород попал также участок чаши шламохранилища, что привело к нарушению сплошности его экрана и усилению гидродинамической связи промышленных стоков с подземными водами. Техногенные изменения проницаемости глинистых экранов, т.е. потеря ими водоупорных свойств, связаны также с их засолением и физико-химической деградацией в результате взаимодействия концентрированных растворов с глинистыми отложениями.

Наконец анализ полученных гидрогеохимических материалов позволил выявить на фоне хорошо выраженных гидродинамических механизмов миграции рассолов физико-химические процессы (в первую очередь – ионный обмен), приводящие к заметной метаморфизации вод в пределах ореола засоления: с удалением от источника загрязнения формируются зоны различных по химическому составу вод – от хлоридных калиево-натриевых (с минерализацией 140 – 210 г/л) до хлоридных магниевых (с минерализацией 1–50 г/л).

Миграция промышленных стоков от поверхностных бассейнов – не единственный путь загрязнения подземных вод. В ряде горнодобывающих районов снижение напоров при дренажных работах и развитие техногенной трещиноватости (см.разд. 3.2) способствуют интенсификации процессов перетекания из смежных (обычно более глубоких) горизонтов, воды которых отличаются худшим качеством, отжатию минерализованных поровых растворов из слабопроницаемых слоев и блоков, перетоку некондиционных вод через незатампонированные скважины и т.д.

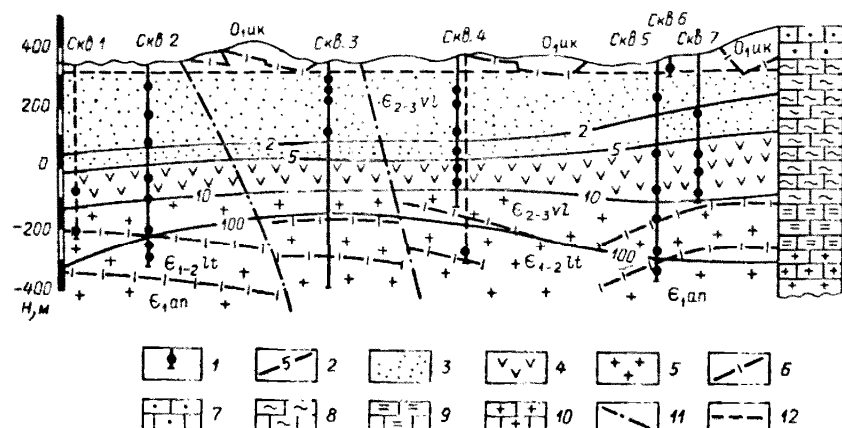


Рис. 6.4. Схематический гидрогеохимический разрез Коршуновского месторождения:

1 – скважина (точкой показана середина интервала гидрохимического опробования); 2 – изолиния минерализации подземных вод, г/л; 3–5 – гидрохимические типы вод (3 –  $\text{Ca-SO}_4$ ; 4 –  $\text{Na-Ca-Cl-SO}_4$ ; 5 –  $\text{Na-Cl}$ ); 6 – стратиграфическая граница; 7–10 – литологические типы пород (7 – доломитизированные известняки, 8 – глинистые известняки, мергели и аргиллиты, 9 – доломиты, 10 – известняки и доломиты с прослоями солей); 11 – тектоническое нарушение; 12 – уровень подземных вод

Так, на Коршуновском железорудном месторождении Восточной Сибири в разрезе водоносных пород, обрамляющих штокообразную рудную залежь, существует несколько водоносных горизонтов, существенно различающихся по фильтрационным свойствам и гидрохимическим показателям качества подземных вод (рис. 6.4). Наблюдаемая естественная гидрохимическая зональность является неблагоприятной, поскольку при эксплуатации месторождения возникает субвертикальное перемещение водных масс к дренажным контурам карьера. Действительно, резкое снижение напоров (более чем на 100 м в центре депрессионной воронки) в верхних, устькутском и верхоленском, горизонтах при осушении месторождения создало условия для разгрузки высоконапорных минерализованных вод нижнего гидродинамического этажа (литвинцевский и ангарский водоносные горизонты) в дренажную систему карьера. Это подтверждается как гидрохимическими данными, по которым отчетливо вырисовывается купол подтягивания глубинных рассолов (рис. 6.5), так и высокими вертикальными градиентами напоров вблизи рудного тела (рис. 6.6), вполне сопоставимыми с перепадами напоров по горизонтали (в естественных условиях отмечалась обратная картина – питание нижних горизонтов происходило за счет перетекания вод из верхних горизонтов). Обратное влияние оказывает другой важный фактор – повышенная плотность рассолов, затрудняющая их подток.

Сходными причинами вызвано засоление дренажных вод на Южно-Белозерском месторождении: резкое смещение границы пресных и соленых вод, первоначально расположенной в рудно-кристаллическом комплексе на глубине 150–300 м, считая от контура дренирования (рис. 6.7), здесь было зафиксировано уже на стадии опытно-эксплуатационного водопонижения. В настоящее время гидрохимический режим дренажных вод, минерализация которых изменяется от 0,7 до 80 г/л при суммарном расходе около  $2000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , полностью контролируется условиями

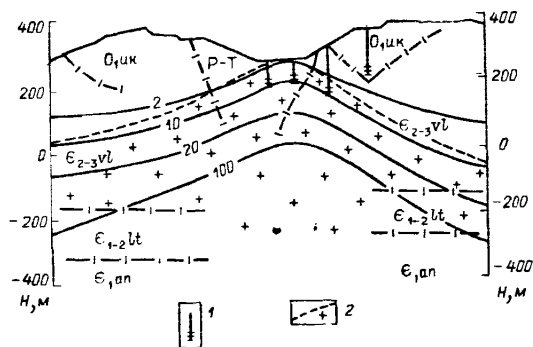


Рис. 6.5. "Купол подтягивания" соленых вод к контуру дренажа Коршуновского месторождения:

1 – водопонижительная скважина; 2 – граница подъема контура хлоридных натриевых вод. Остальные условные обозначения см. на рис. 6.4

гидродинамической взаимосвязи горизонтов, а также особенностями развития горных работ. Так, на северном фланге месторождения воды в основном пресные и слабоминерализованные, что объясняется переливом больших объемов воды из бучакского горизонта в непосредственно залегающий под ним рудно-кристаллический (см. рис. 6.7); а на южном, где обводненные бучакские пески изолированы от рудно-кристаллического горизонта слабопроницаемыми меломергельными отложениями, в горные выработки разгружаются (300–350 м<sup>3</sup>/ч) неразбавленные глубинные рассолы. При этом проблема сброса и утилизации откачиваемых высокоминерализованных вод приобрела на месторождении большое (техничко-экономическое) значение.

Еще одним источником загрязнения подземных вод служат отвалы вскрышных пород. При взаимодействии с ними атмосферной влаги происходит выщелачивание отдельных минералов, дающих разнообразные компоненты-загрязнители, поступающие затем с инфильтрационными водами в водоносные горизонты. Достаточно типичным для железорудных и полиметаллических месторождений является выщелачивание из пород сульфидных минералов.

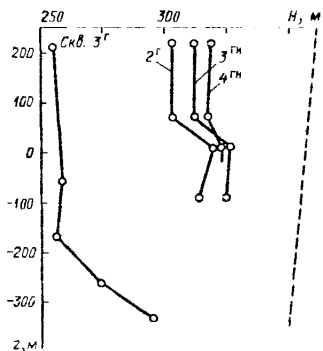


Рис. 6.6. Распределение гидростатических напоров  $H$  по мощности водоносной толщи  $z$  (Коршуновское месторождение, участок расположения дренажных узлов) под влиянием водопонижения.

Пунктиром дан график  $H(z)$  для ненарушенного режима подземных вод

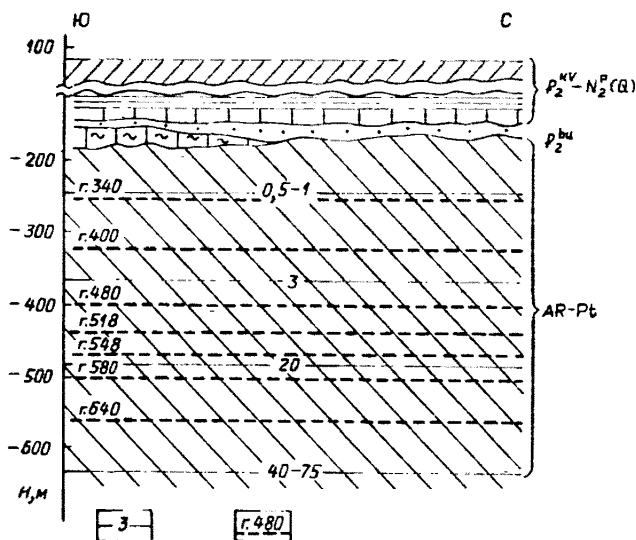


Рис. 6.7. Схематический разрез Южно-Белозерского месторождения и закономерности изменения минерализации воды рудно-кристаллического горизонта по глубине (до начала работ по осушению месторождения):

1 — изолиния минерализации, г/л; 2 — горизонты отработки

Например, на Ковдорском железорудном месторождении окисление пирротина и пирита (содержание этих минералов в отвалах колеблется от 0,5 до 5%) послужило причиной сульфатного загрязнения подземных вод (рис. 6.8), разгружающихся в карьер на западном фланге месторождения, где под отвалы заняты значительные площади. Максимальные концентрации сульфатов в дренажных водах отмечаются в летние месяцы, когда активизируется жизнедеятельность микроорганизмов, играющих роль катализаторов в реакциях окисления. Соответствующие средние значения составляют 150–200 мг/л, что многократно (в 10–50 раз) превышает фоновые концентрации (3–5 мг/л). Одновременно с накоплением сульфат-ионов происходит повышение pH воды (см. рис. 6.8), что объясняется параллельным развитием реакций гидролиза щелочных и ультраосновных пород, а также растворением карбонатитов. В результате всех этих процессов формируется уникальный тип техногенных вод — сульфатные калыцевые, щелочные.

В целом гидрохимическая обстановка в районах разработки месторождений обычно резко меняется к худшему и для обеспечения экологического равновесия и нормальных условий водоснабжения нередко требуется проведение дополнительных дорогостоящих водоохраных мероприятий.

В заключение следует отметить, что процессы загрязнения и истощения ресурсов подземных вод в горнодобывающих районах часто тесно связаны между собой: с одной стороны, осушение водоносных горизонтов интенсифицирует миграцию техногенных растворов и природных не-

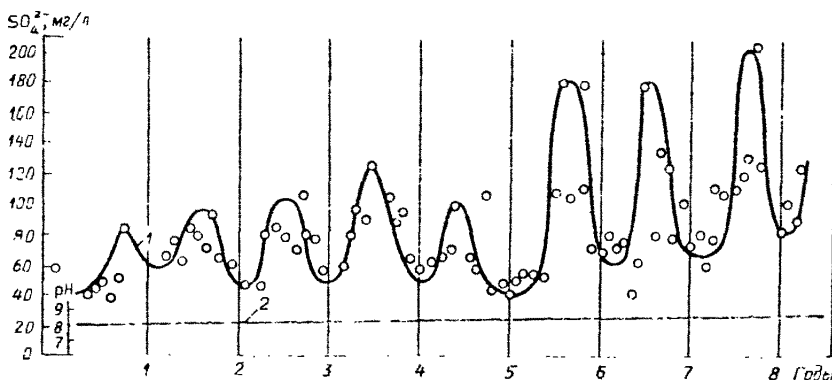


Рис. 6.8. Изменения концентрации ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  (1) в подземных водах и показателя pH (2) на западном фланге Ковдорского железорудного месторождения

кондиционных вод, резко увеличивая опасность загрязнения подземных вод; с другой, загрязнение непосредственно приводит к сокращению ресурсов подземных (а в ряде случаев и поверхностных) вод, делая их частично или полностью непригодными для использования в народном хозяйстве. Такая взаимосвязь определяет комплексный характер проблемы управления ресурсами и качеством подземных вод при горных разработках.

## 6.2. ИСТОЩЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И СПОСОБЫ БОРЬБЫ С НИМ

### 6.2.1. Проблема сохранения водных ресурсов горнодобывающих районов

Под истощением подземных вод понимается сокращение их естественных запасов, обусловленное превышением темпов водоотбора при дренировании водоносных пластов над интенсивностью их питания. Если при этом происходит бесцельный сброс дренажных вод в речную сеть, то такое истощение наносит прямой экологический ущерб или приводит к существенному ухудшению условий водопользования в горнодобывающем и смежных с ним районах. В противном случае, когда отбираемые дренажные воды целиком используются в народном хозяйстве, истощение подземных вод в разумных пределах является экономически оправданным. В этом проявляется некоторая условность понятия "истощение подземных вод", которое в зависимости от выбранной схемы использования водных ресурсов горнодобывающего района может носить сугубо негативный характер или быть достаточно рациональным.

Отбор подземных вод в количестве, превышающем установленные эксплуатационные запасы, приводит к истощению эксплуатационных ресурсов подземных вод. Тем самым создается ситуация, когда осуше-

ние месторождения приводит к сокращению планируемых сроков эксплуатации водозаборов хозяйственно-питьевого назначения. Она обычно усугубляется интенсивным загрязнением дренажных вод, частично или полностью исключаяющим их использование в качестве частичной компенсации ущерба, наносимого водным ресурсам района. Поэтому опасность истощения эксплуатационных ресурсов обуславливает необходимость проведения мероприятий по их охране.

Истощение эксплуатационных запасов подземных вод обычно является следствием многочисленных и разнообразных изменений в гидродинамической обстановке под влиянием горного производства, поэтому важно выделить основные факторы, обуславливающие возможность и масштабы этого процесса. Если говорить о природных факторах, то главными из них являются те, которые определяют условия питания и разгрузки водоносных комплексов, степень их взаимосвязи с поверхностными водоемами и водотоками, а также между собой. Немаловажное значение имеют, конечно, фильтрационные свойства водоносных и относительно водоупорных пластов. По характеру проявления этих факторов можно выделить три основных источника формирования эксплуатационных запасов подземных вод, предопределяющих водопитоки к дренажным устройствам и в горные выработки: 1) упругие запасы; 2) привлекаемые ресурсы смежных с эксплуатируемым водоносных горизонтов; 3) привлекаемые ресурсы поверхностного стока и инфильтрация из поверхностных (в том числе техногенных) бассейнов. Привлечение, в частности целенаправленное, такого рода искусственных ресурсов нередко снижает интенсивность истощения подземных вод или полностью исключает его.

Среди факторов техногенного характера выделим следующие:

1) способ ведения горных работ: при прочих равных условиях открытые работы, сопряженные с необходимостью дренажа, как минимум, всех водоносных горизонтов вскрышной толщи, способствуют более интенсивному истощению подземных вод;

2) схема горных работ и соответствующие ей требования к степени осушения пород. В частности, в условиях открытой разработки эти требования минимальны при использовании на вскрышных работах средств гидромеханизации, создающих наиболее благоприятные условия для сохранения ресурсов подземных вод. При подземной разработке наиболее благоприятны системы с закладкой выработанного пространства, наименее — системы с полным обрушением кровли и другие с интенсивным развитием процессов сдвижения;

3) принятая схема и требуемые сроки дренажа месторождения. В частности, предварительный дренаж обычно вызывает более интенсивное истощение, чем параллельный, причем оно возрастает с увеличением заглубления дренажных устройств. Минимальное истощение наблюдается при использовании непроницаемых завес (барражей);

4) характер техногенных изменений в условиях взаимосвязи поверх-

ностных и подземных вод, происходящих, например, в процессе заполнения технических водоемов двухфазными стоками или при отводе речных вод за границы месторождения;

5) схемы оборотного водоснабжения, сброса и использования дренажных вод.

Таким образом, основные меры по защите подземных вод от истощения определяются проектными решениями по горным работам, дренажу месторождения и схеме водоотвода и сброса рудничных вод, а также по строительству и эксплуатации бассейнов промышленных стоков и гидротехнических сооружений, сопутствующих горному производству. Из дополнительных мероприятий специального характера важно отметить искусственное восполнение запасов подземных вод (см. разд. 6.2.3).

Из всего сказанного следует, что важнейшее условие эффективного управления ресурсами подземных вод и охраны их от истощения в горнодобывающем районе — это тесная увязка проектируемых систем осушения месторождений со схемой водообеспечения района по линии максимального использования дренажных вод для технического и по возможности хозяйственно-питьевого водоснабжения. Такого рода возможность должна рассматриваться для всех месторождений, где предполагается дренирование водоносных пластов, содержащих воду хорошего качества. Соответствующие решения, касающиеся хозяйственно-питьевого водоснабжения, базируются на оценке запасов подземных вод и прогнозе их качества с учетом возможных мероприятий по защите водоносных горизонтов от истощения и загрязнения (а иногда и дополнительных по очистке дренажных вод). Такую оценку необходимо проводить уже на стадии детальной разведки месторождения.

Для анализа влияния освоения месторождения на водные ресурсы горнодобывающего района выполняются гидродинамические прогнозы. Основной способ решения региональных прогнозных задач геофильтрации — математическое моделирование в плановой постановке [7]. Надежность решения такого рода задач определяется, в первую очередь, точностью аппроксимации граничных условий и обоснованностью выбора исходных расчетных параметров. С этой точки зрения наиболее трудный аспект построения прогнозной модели — это задание на ней характеристик, отражающих интенсивность фильтрации из водотоков и водоемов с экранированным ложем, а также водообмен между дренируемыми и недренируемыми горизонтами (параметры перетекания). Поэтому для прогнозных оценок необходима, в частности, информация о фильтрационных параметрах экранирующих отложений (см. разд. 7.1.1). Надежность гидрогеологических прогнозов возрастает в случае использования при моделировании данных о потерях воды из водоемов, полученных при проведении специализированных гидродинамических наблюдений на действующих объектах (см. разд. 7.1.2).

Для изучения параметров перетекания предварительно решается комплекс обратных задач геофильтрации. Кроме того, широко привлека-



ются результаты режимных наблюдений, полученные на первых этапах разработки и дренирования месторождения. Недочет перетекания в гидродинамических прогнозах может привести к принципиально неверным представлениям об истощении водоносных структур под влиянием горного дренажа (в частности, об истощении ресурсов пластов, не дренируемых непосредственно в процессе разработки месторождения). Существенным элементом водного баланса при этом может оказаться перетекание на участках развития техногенной трещиноватости над подземными горными выработками. Для закрытых водоносных структур важнейшим аспектом гидродинамического прогноза является учет постепенной сработки емкостных запасов структуры, часто сопровождаемой практически полным их истощением.

### **6.2.2. Использование дренажных вод в хозяйственно-питьевом водоснабжении**

В соответствии с "Основами водного законодательства", использование водных ресурсов должно быть рациональным и прежде всего удовлетворять питьевые и бытовые нужды населения. Между тем до сих пор громадные объемы подземных вод, извлекаемые из недр при осушении месторождений полезных ископаемых, нередко сбрасываются в поверхностные водоемы и водотоки, хотя во многих районах, прилегающих к дренируемым карьерам и шахтам, чистой воды не хватает. Такая ситуация объясняется тем, что для использования дренажных вод в системе хозяйственно-питьевого водоснабжения требуется специальное обоснование их запасов и обеспечение нормативного качества. Связанные со всем этим затруднения часто носят не столько технический, сколько организационный характер, что во многом обусловлено разобщенностью ведомств, ответственных за принятие необходимых комплексных решений. Требуется тщательная предварительная увязка проектируемых систем осушения с задачами водоснабжения района в целом.

Параллельное решение задач осушения и водоснабжения базируется на оценке эксплуатационных запасов подземных (дренажных) вод. Ввиду того, что для новых месторождений она должна основываться на данных разведки и в то же время проводиться применительно к вероятной схеме дренажа (водозабора), чаще всего изучаемые месторождения подземных вод должны рассматриваться как находящиеся в особенно сложных условиях, а запасы — оцениваться преимущественно по низким промышленным категориям ( $C_1$  или  $C_2$ ). Однако, если говорить об оценке качества дренажных вод, даже эти ограниченные требования не всегда могут быть выполнены на практике: такие оценки на стадии разведки часто ненадежны из-за отсутствия необходимой информации об условиях и параметрах миграции (см. разд. 6.4.2). Поэтому обоснование запасов дренажных вод по качественным показателям, по-видимому, может быть выполнено лишь по результатам доразведки или на опытно-эксплуатационном уровне — на основе данных режимных наблюдений.

По этим причинам гораздо проще оценить запасы дренажных вод на действующих горнодобывающих предприятиях. В этом случае фильтрационные расчеты систем осушения по существу являются также оценкой эксплуатационных запасов с тем лишь дополнением, что необходимо доказать превышение среднего минимального расхода откачиваемых дренажных вод над требуемым по условиям водоснабжения для всего расчетного периода. Однако комплексное использование подземных вод повышает требования к надежности и достоверности этих расчетов, поскольку "запас" с точки зрения осушения является просчетом при оценке эксплуатационных ресурсов. В частности, при прогнозных расчетах должна учитываться общая тенденция перераспределения расхода фильтрационного потока между внешними и внутренними контурами дренажа в процессе увеличения глубины отработки полезного ископаемого. Кроме того, расчетный период для проектной оценки условий эксплуатации водозабора не определяется сроками амортизационных отчислений самого водозабора, но должен назначаться исходя из комплексных показателей эффективности, учитывающих задачи и намечаемые сроки как осушения, так и водоснабжения. Традиционное ограничение понижений на водозаборе с учетом задач дренажа здесь должно быть снято.

Наконец, поскольку дренажные воды по существу представляют собой вторичный продукт горного производства и затраты на их откачку и отведение входят в себестоимость полезного ископаемого, а стоимость дополнительных мероприятий и сооружений, связанных с собственно водоснабжением, незначительна, то необходимость специального утверждения запасов подземных вод на водозаборах-дренажах обычно отпадает. Однако проекты использования дренажных вод подлежат согласованию в установленном порядке с местными органами санитарно-эпидемиологической службы, геологического контроля и регулирования использования и охраны вод.

Вместе с тем требование увязки осушения с водоснабжением прилегающих территорий предполагает пересмотр некоторых принципов проектирования дренажных систем и с точки зрения соблюдения мер их санитарной охраны. В частности, при выборе способа осушения и размещения дренажных устройств следует принимать во внимание необходимость дифференцированного отбора подземных вод разного качества, наличие которых обуславливается естественной гидрохимической зональностью и глубинами откачки, подтягиванием глубинных минерализованных вод к водозаборным устройствам при снижении напоров в верхних, осушаемых, водоносных горизонтах, влиянием технологических процессов отработки месторождения и схемы водоотвода на качество подземных вод, а также возможностью интенсивного проникновения техногенных загрязнений с поверхности в верхние водносные горизонты.

Обычно особенно резко различаются по своим качественным показателям воды двух категорий: 1) дренажные воды, принимаемые внешними контурами глубинного дренажа (водопонижающими скважинами, сквозными и забивными фильтрами), которые, как правило, дос-

таточно хорошо защищены от воздействий извне, приводящих к ухудшению качественного состава откачиваемых вод; 2) карьерные и шахтные воды, принимаемые внутренними дренажными контурами (прежде всего, различными системами прибортового открытого дренажа) или непосредственно горными выработками и открытыми водоотводными канавами, а также нерегулируемый сток шахтных вод и атмосферных осадков. Воды второй категории в наибольшей степени подвержены загрязнению при эксплуатации месторождения (см. разд. 6.3.2), для них трудно выполнить требования по санитарной охране водозборов. Поэтому обычно рассматриваемые здесь системы водоснабжения должны ориентироваться на внешние устройства глубинного дренажа, находящиеся к тому же за пределами области интенсивных смещений.

В целом при существующей тенденции увеличения глубин горных разработок наиболее серьезным фактором, сдерживающим использование дренажных вод в хозяйственно-питьевых целях, будет подсос минерализованных вод к водопонижающим установкам из нижних зон гидрогеологических разрезов. Как показывает опыт освоения месторождений, в подобных условиях активно протекает засоление дренажных вод, отбираемых внутренними дренажными узлами. В то же время качество воды на внешних дренажных контурах, вынесенных за пределы технических границ карьерных и шахтных полей, как правило, слабо меняется во времени.

Впервые в практике работы Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых (ГКЗ СССР) одновременно с запасами железной руды были утверждены запасы (по категориям  $B + C_1$ ) дренажных вод на двух месторождениях КМА – эксплуатируемом Лебединском и проектируемом Приоскольском. На первом к категории В (в количестве 150 тыс. м<sup>3</sup>/сут) по фактически достигнутому приросту водопритока в минимальные по водности годы отнесены запасы мелового водоносного комплекса, формирующиеся за счет искусственных источников (техногенных бассейнов). К категории  $C_1$  (25 тыс. м<sup>3</sup>/сут) отнесены запасы, рассчитанные по разнице между прогнозными запасами этого комплекса, полученными с учетом расширения дренажного комплекса карьера, и запасами категории В. Для Приоскольского месторождения запасы подземных вод составили 102 тыс. м<sup>3</sup>/сут; соответствующие оценки основывались на фильтрационных расчетах дренажных систем.

Несмотря на обнадеживающие прогнозы, объем использования дренажных вод на карьере КМА остается довольно низким. В частности, в Губкинско-Стойленском промышленном районе для хозяйственно-питьевых целей используется не более 10%, а для технических нужд – около 40% воды, отбираемой при осушении месторождений. "Излишки" этой воды, составляющие половину дренажного водопритока, сбрасываются в реки (данные на 1987 г.). Это значит, что увязка систем осушения карьеров КМА с задачами водоснабжения требует проведения дополнительных мероприятий, среди которых:

- 1) использование на действующих и вновь проектируемых участках внешних дренажных контуров карьеров систем водопонижающих скважин (вместо подземных систем осушения), которые могут подавать питьевую и хозяйственную воду непосредственно для горно-обогатительных комбинатов или систем водоснабжения городов;

- 2) использование отводимых из дренажных штреков вод для технических нужд, а при условии подключения сквозных фильтров к закрытым подземным коллекторам и для хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Эти мероприятия позволяют максимально использовать внутренние источники для водоснабжения и тем самым повышают рентабельность и эффективность дренажных работ.

В целом необходимость комплексного подхода к использованию минеральных ресурсов подтверждается и зарубежным опытом освоения месторождений.

Так, на угледобывающих предприятиях Силезского бассейна в ПНР для хозяйственно-питьевых целей используется около 30% дренажных вод. В ВНР имеются бокситовые шахты, на которых дополнительные денежные поступления от продажи откачиваемых дренажных вод внешним потребителям позволяют снизить себестоимость бокситов на 10–15%.

### 6.2.3. Искусственное восполнение запасов подземных вод

На фоне других объектов гидрогеологических исследований, где в последнее время уделяется повышенное внимание проблеме искусственного восполнения запасов подземных вод, опыт ее решения в горном деле пока крайне ограничен. Тем не менее, рассматривая это мероприятие как наиболее активную форму защиты запасов подземных вод от истощения, его следует признать целесообразным для всех горнодобывающих районов с напряженным водным балансом. Наряду с сохранением ресурсов водоносных комплексов, осушаемых при освоении месторождений, перед искусственным восполнением могут ставиться задачи улучшения качества вод на водозаборах или предупреждения процессов их загрязнения.

Соответствующие инфильтрационные сооружения располагают, исходя из конкретных геолого-гидрогеологических, геоморфологических и гидрологических условий месторождения с учетом требования ограниченного влияния восполнения на водопритоки к горным и дренажным выработкам. При этом используются два основных метода восполнения: 1) из поверхностных бассейнов инфильтрационного типа (открытые инфильтрационные сооружения); 2) через нагнетательные или наливные скважины (закрытые инфильтрационные сооружения).

Первый метод используют для пополнения безнапорных водоносных горизонтов. Он особенно эффективен в условиях, когда и обводненная, и осушенная зоны пласта представлены породами с достаточно высокой проницаемостью ( $k = 10-20$  м/сут и более). Наличие в приповерхностной толще слабопроницаемых отложений заметной мощности (3–5 м и более) обуславливает необходимость мероприятий по усилению гидравлической взаимосвязи поверхностных и подземных вод, например путем проходки колодцев, засыпаемых хорошо фильтрующим материалом.

Другой важный фактор, контролирующий эффективность инфильтрационного восполнения запасов подземных вод, – кольматация (заиливание) пористых материалов в основании бассейнов взвешенными в воде частицами. Борьба с кольматацией осуществляется как путем предварительной очистки вод, подаваемых в инфильтра-

ционное сооружение, так и посредством периодической регенерации фильтрующих отложений в самом бассейне.

Второй метод восполнения — нагнетание — предусматривает использование скважин, через которые вода подается в пласт под давлением. При глубоком залегании уровня подземных вод возможно восполнение путем свободного налива. Удовлетворительная проницаемость, по крайней мере на первых этапах нагнетания, достигается при гидравлической проводимости пласта не менее первых сотен квадратных метров в сутки. Так же, как при свободной инфильтрации, проницаемость закрытых систем восполнения со временем падает, что обуславливается колюматацией фильтров скважин. Для борьбы с этим явлением используют химические и механические (вибрационный, ударный и др.) методы регенерации, а также промывки инъекционных скважин.

Режим работы системы искусственного восполнения может носить периодический характер. Поскольку потребность в воде в летний период больше, чем в зимний, часто целесообразно создание систем восполнения сезонного действия, обеспечивающих *магасинирование* паводкового стока.

В целом выбор источника восполнения — один из основных вопросов организации рассматриваемых систем: этим источником могут быть и речные, и паводковые воды рассредоточенного поверхностного стока (интенсифицирующегося в период снеготаяния и ливневых осадков). Наряду с поверхностными и атмосферными водами для питания инфильтрационных сооружений можно использовать и часть шахтных вод, прямая подача которых для хозяйственно-питьевого водоснабжения признается на текущий момент нецелесообразной или требует больших затрат (обусловленных необходимостью их дополнительной очистки).

Здесь мы подошли к другому важному аспекту гидрогеологического обоснования систем восполнения — прогнозу качества подземных вод на участках их инфильтрационного подпитывания. Такого рода прогнозы базируются на данных об очищающей способности грунтов, получаемых в период опытных и опытно-эксплуатационных исследований миграционного характера на конкретных участках. Первостепенное значение имеет оценка параметров сорбции и деструкции химических загрязнителей [2, 8], а также показателей очищения воды от бактериального заражения. Опыт эксплуатации систем искусственного восполнения показывает, что в песчаных водоносных горизонтах существенное улучшение всех показателей качества вод, нормируемых ГОСТом, происходит уже на отрезках пути миграции инфильтрационных вод, измеряемых несколькими десятками метров.

Для проведения детальных прогнозных расчетов при обосновании возможности искусственного восполнения запасов подземных вод в процессе гидрогеологических исследований требуется определить следующие показатели: 1) общие объемы воды, поступающей в инфильтрационный бассейн, глубина и время его заполнения, содержание взвешенных частиц и химический состав поверхностных вод; 2) фильтрационные и миграционные параметры пород зоны аэрации и грунтов ложа водоема, их механический состав и грязесемкость; 3) изменение фильтрационного сопротивления ложа водоема и соответственно скорости инфильтрации из него в результате колюматации и образования глинистой корки; 4) скорость инфильтрации, изменение ее во времени и режим фильтрации из бассейна; 5) возможность целенаправленного изменения фильтрационных свойств пород ложа водоема; 6) эксплуатационные запасы подземных вод в условиях искусственного их восполнения; 7) миграционные параметры водоносного пласта и пород зоны аэрации.

С этой целью до заполнения бассейна и в опытно-эксплуатационный период проводятся гидрогеологические работы (опробования и наблюдения), методические принципы организации которых подобны рассматриваемым в гл. 7.

### 6.3. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ФАКТОРЫ ЕГО ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ

#### 6.3.1. Загрязнение и его критерии

Под загрязнением подземных вод в широком смысле этого слова понимается ухудшение их исходного качества (физических, органолептических, химических и биологических свойств), приводящее к ощутимому экономическому или социально-экологическому ущербу – явному или предполагаемому. Более строгое определение требует ориентации на количественные критерии загрязнения, зависящие от характера использования подземных вод или от влияния их сброса и утилизации при крупном водоотборе на окружающую среду, прежде всего, на поверхностные воды.

Очевидно, что для водоносных горизонтов, содержащих пресные воды, критерии загрязнения должны связываться с санитарно-гигиеническими показателями качества вод питьевого назначения, регламентированными ГОСТ 2874–82.

Важнейшим из них является показатель допустимого бактериального загрязнения подземной воды, определяемый общим содержанием в ней бактерий (не более 100 в 1 мл) и количеством бактерий группы кишечной палочки (не более 3 в 1000 мл; соответственно коли-индекс не более 3). Наряду с этим в лимитирующие показатели качества вод включаются нормы (предельно допустимые концентрации – ПДК) содержания биологически активных макро- и микрокомпонентов (в том числе радиоактивных), появление которых наиболее вероятно при техногенном или сельскохозяйственном загрязнении подземных вод.

Обобщенным показателем качества вод по макрокомпонентному составу является величина сухого остатка (близкая к общей минерализации воды), которая не должна превышать 1 г/л при общей жесткости не более 10 мл-экв/л. Среди микрокомпонентов, нормируемых ГОСТ 2874–82, можно выделить две основные группы [4]: первая включает элементы, ПДК которых обычно много больше их фоновых концентраций в слабоминерализованных водах (например, ионы меди, молибдена, свинца, цинка); вторая объединяет элементы, ПДК которых близки к фоновым (например, ионы железа, марганца, фтора, селена, бериллия). При изучении естественных вариаций химического состава подземных вод особое внимание должно уделяться второй группе элементов. Однако в нарушенных гидрогеохимических условиях загрязнение подземных вод часто определяется аномальным ростом концентраций элементов первой группы.

Если вода содержит компоненты с одинаковыми показателями токсичности, то сумма концентраций этих веществ, выраженная в долях от максимально допустимых концентраций, не должна превышать 1 (действие фтора, нитратов и радиоактивных веществ оценивается отдельно по соответствующим ПДК).

Требования к качеству и соответственно критерии загрязнения подземных вод могут заметно изменяться, если по тем или иным причинам отбираемые воды сбрасываются в поверхностные водотоки и водоемы. Такая ситуация типична для районов с горнодобывающей промышленностью, где широко используется подобный способ борьбы с излишками некондиционных рудничных (шахтных) вод. Важно подчеркнуть, что критерии загрязнения, рассчитываемые с учетом процессов разбавления

рудничных вод в речных потоках, могут быть как менее жесткими (например, по содержанию взвешенных частиц), так и, наоборот, более жесткими (например, по сульфатам) по сравнению с требованиями хозяйственно-питьевого водоснабжения.

### 6.3.2. Загрязняющие растворы и компоненты

Характеристика загрязняющих растворов и компонентов традиционно основывается на выделении типичных ассоциаций химических соединений в составе промышленных стоков с учетом минерализации последних. С этих позиций предлагается выделять четыре категории промышленных стоков.

*Первая категория* объединяет пресные (с минерализацией  $M < 1$  г/л) воды с невысоким содержанием бытовых загрязнителей, привнос которых определяется контактом этих вод с атмосферой, земной поверхностью и техническим оборудованием. К таким загрязнителям наряду с патогенными микроорганизмами относятся водорастворимые нефтепродукты, а также азотные соединения (в форме ионов  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NH}_4^+$ ), содержания которых обычно не слишком сильно превышают ПДК, а чаще находятся в их пределах. В условиях пласта воды интенсивно очищаются от этих загрязнителей, так что процессы загрязнения водоносных горизонтов обычно носят узко локальный характер и относительно легко прогнозируются.

В горнодобывающем производстве образование сточных растворов данной категории происходит, например, в технологических циклах безфлотареагентного обогащения полезного ископаемого. Подобный уровень загрязнения отмечается в исходных пресных водах и при их вовлечении в систему внутрикарьерного или шахтного водоотлива. Воды этой категории формируются на ряде железорудных месторождений – Лебединском, Стойленском, Михайловском (КМА), Соколовско-Сорбайском, Лисаковском, – находящихся в зоне активного водообмена.

*Вторая категория* включает пресные и слабоминерализованные ( $M \approx 3\text{--}5$  г/л) стоки с повышенным содержанием токсичных компонентов, среди которых тяжелые металлы (главными являются свинец, кадмий, стронций, цинк, медь, никель, марганец, ртуть), мышьяк, фосфаты, фториды, флотареагенты (цианиды, фенолы, поверхностно-активные вещества), радиоактивные элементы и др. Их концентрации могут многократно превышать ПДК. Наряду с перечисленными веществами, контролирующими санитарное состояние сточных растворов, в них могут присутствовать загрязнители, характерные для первой категории промышленных стоков. В самоочищении вод от токсичных веществ ведущую роль играют внутрипластовые физико-химические процессы, прогнозирование которых требует детальных миграционных построений, учитывающих, в частности, многокомпонентный характер стоков.

К рассматриваемой категории растворов относятся многие виды рудничных (шахтных) вод, откачиваемых непосредственно из горных выработок и существенно отличающихся по составу от фильтрующихся

подземных вод. Важную роль в таких изменениях играют процессы химического и механического взаимодействия вод с рудоносными и вмещающими породами в почве горных выработок, рудничной атмосферой и горнотранспортным оборудованием, а также процессы смешения вод, поступающих в горные выработки из различных гидрохимических зон разреза. Определяющее влияние вида полезного ископаемого на качество рудничных вод подтверждается приведенными ниже примерами.

На *угольных месторождениях*, особенно при разработке сернистых пластов, образуются кислые ( $\text{pH} < 3-4$ ) шахтные воды (характерны для месторождений Донского, Московского, Кизеловского, Челябинского и других бассейнов). Окисление серы и сульфидов в присутствии углерода в рудничной атмосфере приводит к накоплению сульфатов, ионов железа и других металлов, причем катализатором этого процесса является биологическая деятельность микроорганизмов.

Шахтные воды *месторождений горючих сланцев* отличаются повышенными содержаниями фенолов (до десятков микрограммов на литр), образующихся в результате гидролиза органических соединений – керогена и гуминовых кислот.

На *полиметаллических месторождениях* в кислых шахтных водах накапливаются ионы цинка, свинца, меди и железа, содержание которых достигает сотен миллиграммов на литр; резко увеличивается концентрация таких высокотоксичных компонентов, как бериллий, мышьяк, кобальт, ванадий и кадмий. Металлонасыщение может достигать промышленных концентраций. Такой уровень концентрирования в шахтных водах редких щелочных элементов отмечается на некоторых месторождениях.

Для *апатит-нефелиновых месторождений* более типичны щелочные ( $\text{pH} 8-10$ ) воды с повышенным содержанием ионов и ионных комплексов алюминия.

Весьма характерными загрязняющими компонентами для рудничных вод являются оксиды азота, поступление которых обусловлено использованием на рудниках взрывчатых веществ, содержащих аммонийные соли. Как правило, все рудничные воды загрязнены механическими взвесями (до сотен миллиграммов на литр), содержат нефтепродукты, бактериально заражены; кроме того, они агрессивны по отношению к бетону и металлоконструкциям.

Наконец, повышение минерализации рудничных вод может объясняться вовлечением в систему дренажа глубинных рассолов нижних гидродинамических зон. При этом происходит формирование вод, которые целесообразно отнести к следующей категории стоков.

*Третью категорию* стоков образуют соленые воды ( $M=5-35$  г/л) и рассолы ( $M > 35$  г/л). Как правило, в этих растворах, обладающих повышенной плотностью, с ростом минерализации увеличивается содержание микрокомпонентов, свойственных предшествующей категории стоков. Однако основным показателем, контролирующим качество подземных вод в области их загрязнения, является общая минерализация, на которую ориентируются все практические прогнозы. Хотя при этом используются в основном однокомпонентные модели миграции, их построение осложняется необходимостью учета гравитационной конвекции, обусловленной различиями в плотности пластовых вод и промышленных стоков.



К четвертой категории промышленных стоков относятся техногенные растворы и вещества с особыми (специфическими) свойствами: а) высококонцентрированные растворы органических кислот, спиртов и фенолов; б) нефтепродукты в исходном состоянии (нефть, бензин, керосин, разнообразные масла и др.); в) двухфазные стоки, например пульпы (смесь продуктов дробления горной массы и воды) обогатительных фабрик горно-перерабатывающих предприятий. Не только химические, но и физические свойства (плотность, вязкость) перечисленных стоков резко отличаются от соответствующих свойств пластовых вод, что делает прогнозы загрязнения особенно сложными.

### 6.3.3. Условия загрязнения подземных вод и их типизация

**Характеристика источников загрязнения и мигрантов.** По происхождению источники загрязнения дифференцируются на техногенные и естественные. Они могут находиться на земной поверхности (хвостовые и шламохранилища, гидроотвалы, загрязненные природные водоемы и водотоки, отвалы вскрышных пород и т.п.), а также непосредственно в водоносном комплексе (естественные бассейны некондиционных вод). В последнем случае гидрохимическая зональность может иметь как профильный, так и плановый характер. Подземные очаги загрязнения могут иметь и техногенное происхождение (например, участки закачки промышленных стоков или потоки кислых вод, образующиеся в результате интенсификации процессов окисления при дренаже).

По степени гидродинамического влияния на подземные воды поверхностные источники дифференцируются на гидродинамически активные и пассивные – в зависимости от вызываемых изменений в структуре исходного потока; эти изменения, очевидно, определяются соотношением между расходом утечек промышленных стоков из бассейна и расходом естественного фильтрационного потока, контролирующим интенсивность смешения техногенных и пластовых вод.

С точки зрения возможных физико-химических превращений и процессов взаимодействия загрязняющих компонентов (растворов) с подземными водами и горными породами, основные мигранты, рассмотренные в разд. 6.3.2, подразделяются на следующие типы: а) нейтральные в физическом и химическом отношении – трассеры; б) подверженные физико-химическим и (или) микробиологическим превращениям и взаимодействиям, но не вызывающие существенного изменения исходной плотности (вязкости) подземных вод – физически нейтральные промышленные стоки; в) существенно влияющие (из-за высокой концентрации компонентов) на плотность (вязкость) подземных вод – тяжелые или легкие промышленные стоки.

**Характеристика водоносной системы и условий геофильтрации.** На основании литолого-генетического описания водовмещающих комплексов, играющих основную роль в переносе загрязнений, выделяют сле-

дующие комплексы пород: а) пористые осадочные (неметаморфизованные) песчано-глинистые; б) трещиноватые изверженные или сильнометаморфизованные осадочные; в) трещиновато-пористые, главным образом умеренно метаморфизованные осадочные (значения пористости заметно превышают степень трещиноватости). В такой дифференциации находят отражение не только генетические и петрографические признаки водовмещающих пород, но и физическая природа их емкостных (массообменных) и фильтрационных свойств.

Гидродинамическая характеристика водоносной системы должна даваться в соответствии с известными принципами типизации геофильтрационных условий (см. разд. 6.4.1), но детальность этой характеристики должна быть повышенной по следующим направлениям:

выделение среди основных фильтрующих комплексов прослоев (зон) пород со значительно более высокими коэффициентами действительной скорости движения подземных вод — с учетом возможного подъема уровня за счет фильтрации из технических водоемов;

оценка (по крайней мере, качественная) вертикальной проницаемости пород на участках расположения поверхностных источников загрязнения и возможного подтягивания к дренажам глубинных рассолов;

оценка (по крайней мере, качественная) вертикальной проницаемости отложений, непосредственно экранирующих дно бассейнов промстоков.

**Характеристика миграционного процесса.** Среди преобладающих механизмов массопереноса выделяют конвективный, молекулярно-диффузионный и гидродисперсионный [16]. Связь этих механизмов с реальной макроструктурой и фильтрационными свойствами водоносных систем дает основу для дифференциации последних по уровням протекания миграционного процесса. С этой точки зрения различают следующие виды систем: а) относительно однородные гомогенные с одноуровневым протеканием миграционного процесса (однородные песчаные или глинистые комплексы, сравнительно равномерно трещиноватые скальные породы); б) гетерогенные с двухуровневым протеканием миграционного процесса (упорядоченно-слоистые комплексы песчано-глинистых пород, сравнительно однородные комплексы трещиновато-пористых пород, комплексы трещиноватых полускальных пород при наличии отдельных зон дробления, резко повышенной трещиноватости и т.п.); в) гетерогенные с многоуровневым протеканием миграционного процесса (комплексы песчано-глинистых пород неупорядоченного строения, комплексы трещиновато-пористых пород, осложненные отдельными зонами дробления, резко повышенной трещиноватости и т.п.).

Таким образом, процессы загрязнения подземных вод характеризуются высокой сложностью и исключительным разнообразием действующих факторов, что делает детальную типизацию условий загрязнения задачей повышенной трудности. Наибольший интерес представляют следующие подразделения:

1) по характеру источника загрязнения — поверхностные источники промышленных стоков и подземные бассейны некондиционных вод естественного происхождения;

2) по характеру структуры миграционного потока — ореолы растекания, ореолы рассеяния и области инфильтрации загрязнений;

3) по характеру мигрирующих загрязнений — трассеры, физически нейтральные стоки, тяжелые или легкие стоки.

Перейдем к более детальной характеристике этих основных категорий типизации и начнем с дифференциации по характеру источников загрязнения. Первые из них — *поверхностные источники* — в подавляющем большинстве случаев техногенного происхождения; имеют довольно четкие плановые границы; располагаются на удалении от техногенных контуров разгрузки подземных вод, обычно существенно превосходящем мощность водоносного комплекса, что предопределяет распространение загрязнений в условиях плановой фильтрации; имеют относительно длительную фазу "скрытого" загрязнения, не проявляющегося в дренажных водах эксплуатируемых водозаборных сооружений; предопределяют сравнительно небольшие глубины проникновения основной массы загрязнений; воздействие их существенно зависит от защитных свойств естественных покровных или техногенных отложений; в ограниченных масштабах возможна регулировка их связи с подземными водами путем осуществления различного рода экранирующих мероприятий; состав их воды заметно отличается от исходного состава подземных вод (а это, наряду со значительной длиной и временем переноса, создает предпосылки для интенсивного самоочищения загрязненных вод). Все это, вместе взятое, обычно резко отличает этот тип источников загрязнения от второго.

*Подземные бассейны некондиционных вод* чаще всего имеют естественный генезис, хотя не исключается и искусственное возникновение такого рода бассейнов при растворении пород вследствие техногенного изменения физико-химической обстановки в водоносных пластах. Располагаются они на сравнительно больших глубинах от исходного уровня подземных вод. В более редких случаях подземное образование некондиционных вод связано с естественной плановой гидрохимической зональностью в водоносном пласте. Во всех вариантах решающим фактором, определяющим возможность и степень загрязнения, является водоотбор: процесс контролируется главным образом заглублением водоприемных выработок и интенсивностью водопонижения. Наблюдения за изменением качества подземных вод существенно облегчаются благодаря возможности контроля непосредственно через водозаборные устройства, где, кстати, эти изменения отражены наиболее резко. "Скрытая" фаза загрязнения может быть относительно кратковременной, если, например, соответствует лишь периоду подтягивания некондиционных вод из глубины водоносного пласта. В то же время поступление некондиционных вод в эксплуатируемый горизонт из разделяющих слабопроницаемых толщ

может иногда проявиться только после длительной эксплуатации водозабора (дренажа).

Дальнейшая типизация для поверхностных источников развивается путем выделения двух характерных видов полей загрязнения — ореолов растекания и ореолов рассеяния. Первые, сопровождающиеся подчиненным развитием плановой поперечной дисперсии [7, 8], характерны для гидродинамически активных источников загрязнения (бассейнов промышленных стоков), интенсивность фильтрации из которых заметно превосходит расчетный расход естественного потока. Наоборот, при развитии ореолов второго вида, характерных для гидродинамически пассивных источников (сильно экранированные бассейны, промышленные площадки, "сухие" отвалы и т.д.), интенсивность инфильтрации из них заметно уступает расчетному расходу естественного потока и поперечная дисперсия играет важнейшую роль. Наряду с этими двумя характерными типами площадей загрязнения особо выделяется непосредственно прилегающая к источнику область инфильтрации (преимущественно, нисходящей) загрязнений, играющая исключительно важную роль в их миграции (см. разд. 7.3.2).

Следующий шаг типизации — выделение трех типов мигрантов — стоков: 1) трассеры (полностью нейтральные стоки, содержащие техногенные консервативные компоненты); 2) физически нейтральные (но химически активные); 3) тяжелые (или, наоборот, легкие). Такая дифференциация, отражающая, в частности, роль самоочищения и гравитационного перераспределения загрязнений, учитывает постепенное усложнение изучаемого физико-химического процесса.

Наконец, внутри каждой из выделенных категорий при необходимости учитываются другие факторы, не нашедшие в приведенной типизации прямого отражения, например дифференциация литолого-генетических комплексов пород — пористых и существенно трещиноватых — при разных обобщенных характеристиках их профильной фильтрационной изменчивости (однородные, упорядоченно-неоднородные, неоднородные неупорядоченные).

Данная типизация позволяет не только систематизировать факторы, контролирующие загрязнение подземных вод, но и обосновывать задачи, состав и методику специализированных опытных работ на участках потенциально опасного или действующего загрязнения водоносных горизонтов (см. разд. 7.3). При этом необходимо иметь хотя бы общие представления о требованиях, предъявляемых к проектированию горных предприятий по охране подземных вод.

#### **6.4. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТАМ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗУЧЕННОСТИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В СВЕТЕ ЗАДАЧ ОХРАНЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

##### **6.4.1. Требования к проектам горных предприятий**

Проекты горных предприятий должны предусматривать выполнение комплекса основных требований, связанных с предотвращением или ограничением вредного воздействия горных работ и обогатительного производства на подземные воды:

1) схемы горных работ, дренажа и водоотлива должны отвечать требованиям оптимальности, т.е. нормальные условия горных работ должны обеспечиваться при минимально возможной интенсивности дренажа, в частности при минимальном вовлечении в дренажный водооборот комплексов, используемых для водоснабжения, или, наоборот, глубоких высокоминерализованных вод; при этом, как правило, предусматривают раздельный дренаж водоносных комплексов, содержащих воды резко различного качества (исключения из этого правила должны иметь специальные обоснования);

2) следует исключить или, по крайней мере, ограничить допустимыми пределами поступление в водоносные пласты загрязненных вод из поверхностных источников техногенного характера, а также через вновь проектируемые и ранее пройденные горные выработки и скважины, в противном случае соответствующие технологические решения в области горных работ, дренажа и обогатительного производства должны обосновываться на опытно-эксплуатационном уровне (т.е. до составления окончательного проекта) или считаться априорно недопустимыми как не отвечающие водоохранному законодательству;

3) схемы отвода, сброса и утилизации дренажных или шахтных вод должны обеспечивать сокращение до минимума бесполезных потерь извлекаемых подземных вод, с одной стороны, и предотвращение ошунитого (недопустимого) загрязнения ими подземных и поверхностных вод, с другой, что предполагает, в частности, комплексное использование подземных вод (в том числе и для хозяйственно-питьевого водоснабжения) или повторный их сброс в водоносные пласты без заметного дополнительного загрязнения последних.

Реализация этих требований будет эффективной только в том случае, если к началу строительства вводится в строй система оперативного контроля за изменениями режима подземных вод под влиянием горного производства.

Проект любого горного предприятия должен содержать специальный раздел, посвященный охране и рациональному использованию подзем-

---

Для краткости в этом разделе приведены и требования, связанные с охраной от источника.

ных вод (в рамках более широкого раздела, рассматривающего проблемы охраны окружающей среды). В этом разделе, в частности, должны быть обоснованы и представлены:

1) прогнозы возможного загрязнения и истощения водоносных комплексов, попадающих в сферу влияния горнодобывающих предприятий и предприятий обогатительного цикла, с экологической оценкой условий работы действующих или проектируемых водозаборов, а также других объектов, использующих подземные воды;

2) перечень контрольных мероприятий, обеспечивающих систематическое получение информации о качестве подземных и поверхностных вод в границах предполагаемых ореолов загрязнения и о динамике уровней подземных вод,

3) перечень водоохранных мероприятий, направленных на предотвращение или существенное снижение интенсивности техногенного воздействия на подземные воды, а также на комплексное использование откачиваемых дренажных вод.

Таким образом, раздел проекта, рассматривающий проблемы охраны окружающей среды, должен включать комплексный анализ обстановки и рекомендации по охране подземных (и связанных с ними поверхностных) вод во всей зоне влияния горнодобывающих предприятий, определяемой положением Дренирующих выработок и источников загрязнения, с одной стороны, и границ влияния дренажа или загрязнения, с другой. Ясно, однако, что соответствие проекта этим требованиям решающим образом зависит от полноты и качества исходной информации.

Для многих месторождений с относительно сложными гидрогеологическими и горнотехническими условиями эксплуатации всестороннее обследование проектов исходными данными, полученными в период разведки, часто оказывается невозможным, поскольку остаются неопределенными многие инженерные решения по отработке и по обогатительному производству, которые впоследствии могут оказать решающее влияние на условия загрязнения подземных вод и на схемы водоохранных мероприятий. Кроме того, как будет видно из дальнейшего, ряд важных гидрогеологических параметров принципиально не может быть получен в разведочный период.

Все это не позволяет исключить возможность недопустимого загрязнения подземных вод при выбранных технологических решениях. Поэтому, если дальнейшее наращивание априорной (предпроектной) гидрогеологической информации признается неэффективным или невозможным, то при реализации этих решений следует ориентироваться на *опытно-эксплуатационный подход в соответствии с концепцией контролируемого загрязнения подземных вод* [8]. Последнее понимается как потенциально опасный для качества подземных вод процесс, последствия которого предполагается, однако, удержать на ориентировочно предсказуемом допустимом уровне благодаря контролирующим (регулирующим) процессам механизмам самоочищения подземных вод и контрольно-профилактическим (управляющим) инженерным мероприятиям.

Среди процессов самоочищения водоносной системы, протекающих, как показывает их название, без специальных инженерных мероприятий, следует упомянуть разбавление, отток загрязняющих компонентов в слабопроницаемые слои и блоки, сорбцию, ионный обмен, осаждение, де-струкцию и др. Благодаря им происходят иммобилизация или разрушение вредных компонентов и, как следствие, локализация загрязнения или резкое сокращение зоны его распространения (для заданных временных диапазонов).

Что же касается контрольно-профилактических мероприятий, то здесь главную роль играют мероприятия по предотвращению или снижению утечек из бассейнов промышленных стоков и загрязненных водотоков; управление фильтрационным процессом через действующие (т.е. не создаваемые специально для борьбы с загрязнением) в районе водозаборные или водопоглощающие сооружения (в частности, использование различных эффектов межпластового взаимодействия для попутного разбавления загрязненных вод) и, конечно, режимные гидрогеохимические наблюдения — мониторинг подземных вод, данные которого лежат в основе долговременных прогнозов. Подчеркнем, что концепция контролируемого загрязнения не ориентируется заранее на проведение мероприятий (обычно весьма дорогостоящих) по устранению развитого загрязнения водоносной системы или по ликвидации его последствий<sup>1</sup>: она "покоится на трех китах" — самоочищении, инженерной профилактике и мониторинге, связанных между собой последовательно уточняемым (на основе результатов наблюдений) гидрогеологическим прогнозом.

Целесообразность вводимой концепции, основанной на использовании "консервативности" водоносной системы и гибкого инженерного подхода, достаточно очевидна. Прежде всего, она во многом примиряет требования к охране подземных вод с инженерной реальностью, допускающая сознательное — ограниченное и контролируемое — загрязнение подземных вод. Кроме того, она признает ограниченные возможности гидрогеологической разведки в смысле получения необходимых для прогноза исходных данных, т.е. принимает во внимание сильную неопределенность наших исходных представлений об ожидаемом развитии процесса загрязнения и его последствиях; при этом инженер ориентируется на наиболее разумный, а часто и наиболее безопасный в таких условиях опытно-эксплуатационный подход, который обеспечивается, в частности за счет хорошо поставленных наблюдений, и опытными функциями. Наконец, данная концепция является единственно приемлемой для тех ситуаций с неясными экономическими и социально-экологическими последствиями, в которых загрязнение подземных вод может считаться допустимым в настоящее время, но, вероятно, недопустимым в будущем, а также для аварийноопасных ситуаций, с возможностью возникновения

---

<sup>1</sup> Хотя не исключается, что необходимость в таких мероприятиях может возникнуть по ходу наблюдений, если выявится перерастание потенциально опасного загрязнения в недопустимое.

которых необходимо считаться при складировании или захоронении особо токсичных и радиоактивных стоков (независимо от принятых защитных мер).

Главное же во всем этом конечно, опытно-эксплуатационный подход, который становится не исключением, а нормой для широкого круга условий. Вместе с тем подчеркнем еще раз, что концепция контролируемого загрязнения рассчитана на потенциально опасный процесс и, следовательно, принятие ее в каждой конкретной ситуации должно базироваться на убедительных инженерных доводах и гидрогеологических прогнозах: последние, не будучи исчерпывающими, должны все же подтвердить достаточно большую вероятность того, что предполагаемое загрязнение, с одной стороны, не выйдет за допустимые пределы, но, с другой, не может гарантированно рассматриваться как несущественное снижение качества подземных вод. Таким образом, ключевая роль при определении характера загрязнения (а тем самым, косвенно, и его экономических или социально-экологических последствий) отводится гидрогеологическому прогнозу, непрерывно уточняемому по данным наблюдений.

#### **6.4.2. Требования к исходной информации**

Гидрогеологическое изучение месторождений предполагает оценку ряда показателей, характеризующих влияние источников загрязнения на водоносные горизонты и интенсивность миграции поступающих в них компонентов.

Гидродинамическое влияние поверхностных источников загрязнения — бассейнов промышленных стоков — во многом определяется характером граничных условий на их контурах. Эти условия контролируются проницаемостью естественных и техногенных отложений, экранирующих дно бассейнов, а также режимом нисходящей инфильтрации стоков в условиях полного или частичного водонасыщения пород. При постановке исследований необходимо учитывать, что в процессе эксплуатации бассейнов свойства экранирующих образований могут изменяться. Например, заполнение бассейна двухфазными шламовыми растворами (пульпой) приводит к постоянному наращиванию мощности донных отложений, что увеличивает их фильтрационное сопротивление. Этот эффект усиливается благодаря уплотнению исходных суглинистых экранов под действием веса намываемых шламов. Однако сброс в бассейн высококонцентрированных рассолов, как правило, приводит к потере глинистыми породами экранирующих свойств: проницаемость их при засолении увеличивается в результате агрегирования глинистых частиц и образования трещин, обусловленных осмотической усадкой (осмос приводит к оттоку исходных, относительно пресных, поровых вод и соответственно к появлению в породе растягивающих напряжений).

На участках возможного загрязнения подземных вод необходимо с исключительным вниманием относиться к изучению фильтрационного



строения водоносных толщ и структуры фильтрационных потоков. Здесь требуется повышенная детальность исследований, направленных на выделение в разрезе и опробование зон с аномальной проницаемостью, на оценку показателей профильной анизотропии фильтрационных свойств (определяющих, в частности, интенсивность процессов вертикальной конвекции в водоносных пластах), на расшифровку поля скоростей фильтрации путем прямых их замеров в различных точках пласта.

Прогноз нарушений в гидрогеохимическом режиме подземных вод требует определения показателей, так или иначе отражающих интенсивность техногенного загрязнения и природного самоочищения подземных вод. С этой целью наряду с характеристиками гидродинамического режима и фильтрационными свойствами пород оцениваются миграционные параметры водоносных пластов, а также параметры переноса загрязняющих веществ через зону аэрации. Одновременно изучается физико-химическая и биологическая трансформация мигрантов, поступающих в подземные воды извне. Кроме того, должны определяться показатели, необходимые для прогноза возможного подтока естественных высокоминерализованных растворов или подземных вод пониженного качества, образующихся в результате растворения и выщелачивания пород в зоне интенсивного водообмена, обусловленного горным дренажем.

Перечень необходимых миграционных параметров, характеризующих динамику переноса инертных (не вступающих в физико-химическое взаимодействие с породой) загрязняющих компонентов, во многом определяется литолого-структурными особенностями пород. Так, для комплексов, представленных песчано-глинистыми разностями, в подавляющем большинстве случаев достаточно определения пористости. Для коллекторов подземных вод с трещинной проницаемостью важны значения коэффициентов трещиноватости и дисперсионных характеристик. Наконец, для гетерогенных трещиновато-пористых пород наряду с этими показателями должны оцениваться пористость блоков и коэффициент молекулярной диффузии в них, а также средние размеры блоков пород.

Для прогноза процессов миграции загрязняющих компонентов через зону аэрации дополнительно определяют скорость движения фронта просачивания инфильтрационных вод под действием гравитационных и сорбционно-капиллярных сил. Она характеризует защищенность водоносных пластов от поверхностного загрязнения.

Если не исключена возможность загрязнения водоносных горизонтов за счет развития процессов перетекания ("подтягивания" снизу) минерализованных вод, свойственных породам нижних структурных этажей, то необходимо также определить параметры миграции пород, залегающих значительно ниже границы отработки месторождений (наряду с оценкой их вертикальной проницаемости). При этом изучение естественной гидрохимической зональности проводится на всю мощность водовмещающих пород, включая зону замедленного водообмена, располагаю-

шуюся обычно заметно ниже предполагаемого базиса дренажа месторождения.

В комплекс гидрохимических исследований включается получение показателей химических и физических свойств сточных растворов, накапливаемых в технических бассейнах или в старых выработках. Для оценки процессов самоочищения загрязненных подземных вод дополнительно должны изучаться показатели сорбционного обмена, деструкции и др.

Для оценки степени и характера влияния горных отвалов на загрязнение пород зоны аэрации и качество подземных вод дополнительно определяют показатели процессов растворения и выщелачивания пород, складываемых на земной поверхности.

Для получения перечисленного комплекса исходных показателей первоначально используются специальные лабораторные и полевые работы, проводимые в рамках гидрогеологической разведки месторождения (см. разд. 7.1–7.3.) Нужно, однако, учитывать, что многие из этих показателей реально могут быть оценены лишь по данным специализированных наблюдений при строительстве и эксплуатации горного предприятия (см. разд. 7.4.).

## **6.5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОХРАНЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

Все водоохранные мероприятия можно разделить на две группы:

- 1) профилактические, направленные на предотвращение загрязнения;
- 2) активные, задача которых — ограничение или ликвидация реально проявившегося загрязнения.

### **6.5.1. Профилактические мероприятия**

Специфику профилактических мероприятий целесообразнее всего рассмотреть применительно к поверхностным источникам загрязнения подземных вод (ЗПВ) — разнообразным накопителям промышленных стоков (хвосто- и шламохранилища, пруды-отстойники и т.п.), отвалам, каналам транспортировки отходов и т.д. Следует отметить, что до 80% загрязнений связано с накопителями промышленных стоков п р у д к о - в о г о т и п а. И м ы и у д е л и м о с н о в н о е в н и м а н и е.

Основная задача профилактических мероприятий заключается в максимальном ограничении фильтрационных потерь. Во многом она может быть решена еще на стадии изысканий и проектирования обоснованным выбором участка. Для создания такого накопителя следует выбирать участки, имеющие хороший естественный экран — относительно водонепроницаемые покровные образования — и (или) прилежащие к областям разгрузки подземных вод, где более вероятен "поднятый" режим фильтрации в бортах хранилища в течение всего периода его эксплуатации. Даже

в худшем из вариантов это даст возможность резко сократить утечки из накопителя и (или) локализовать их нижним бьефом ограждающей дамбы (плотины) и тем самым значительно облегчить борьбу с загрязнением. Соответственно следует ориентировать и изыскания: не ограничиваясь контуром будущей акватории накопителя, они должны обязательно установить условия движения подземных вод, включая местные области их разгрузки.

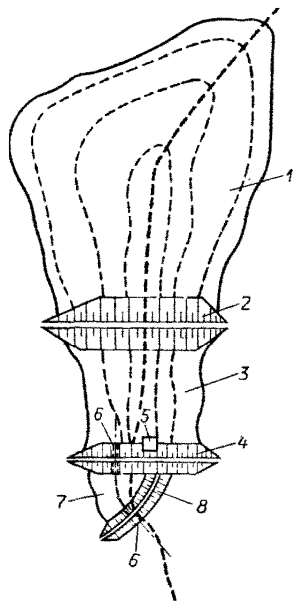
К числу простейших профилактических мероприятий можно отнести также заблаговременную тщательную ликвидацию всех разведочных скважин на исследуемом участке; целенаправленное распределение твердой фазы стоков различного гранулометрического состава на площади технического водоема с целью, в частности, замыка тонкодисперсными фракциями наиболее фильтрующих участков его ложа и бортов: использование жидкой фазы стоков в системе оборотного водоснабжения, поддержание уровней в технических водоемах на возможно более низких отметках с целью уменьшения площади акватории с соответствующим снижением потерь на фильтрацию. Этого можно добиться также путем отсеечения всех мелководных частей специальными ограждающими дамбами с дренажем.

Чаще всего, однако, полностью избежать потерь промышленных стоков на фильтрацию из поверхностных накопителей не удастся даже при создании глухих ограждающих дамб, хороших противифльтрационных экранов и дренаже основания накопителя (см. ниже). Поэтому стремятся заблаговременно локализовать утечки через дамбу и ее основание, перехватывая их дренажной системой на низовом откосе. Если потери невелики, то профильтровавшиеся стоки можно без очистки перекачивать обратно в накопитель. При значительных потерях на фильтрацию предусматривается предварительная очистка стоков, после которой они используются в системе оборотного водоснабжения или сбрасываются в местную гидросеть.

На хвостохранилищах с практически пресной жидкой фазой (но с повышенным содержанием вредных компонентов, например ионов тяжелых металлов) основную плотину часто делают проницаемой (при условии, что утечки локализованы в ее створе), используя как фильтр на первом этапе очистки.

Пример организации перехвата промышленных стоков при наличии фильтрующей дамбы показан на рис. 6.9: в хранилище площадью 7,4 км<sup>2</sup> складываются хвосты горно-обогатительного комбината медного рудника (фирма "Килборн", Канада). Основная дамба 2 создается намывом из твердой фазы пульпы (суспензии), причем крупность намываемого материала уменьшается к ядру дамбы. Такая дамба пропускает большие объемы жидкой фазы пульпы в нижний бьеф, где устраивается пруд-отстойник осветленной воды 3 с хорошей изоляцией основания. Низовая дамба 4 пруда-отстойника отсыпается из просеянных хвостов, но в ее конструкции закладывается ядро из пластичного глинистого материала и каменная наброска на откосах (таким образом, эта дамба практически водонепроницаема). Осветленная вода из пруда-отстойника частично перекачивается насосной станцией 5 в систему оборотного водоснабжения или обратно в хвостохранилище 1. Другая (меньшая) часть осветленной воды через выпуск 6 сбрасывается в пруд-очиститель 7, где стоки проходят окончательную обработку известью для осаждения со-

Рис. 6.9. Компоновка сооружения для складирования, очистки и сброса промышленных стоков горно-обогатительного комбината (фирма "Килборн", Канада)



лей тяжелых металлов и нейтрализации кислой среды. Полностью очищенная вода через выпуск в глухой низовой дамбе 8 пруда-очистителя сбрасывается в гидросеть.

В группу особенно важных профилактических мероприятий нужно выделить создание противofiltrационных экранов (ПФЭ), которые делятся на грунтовые, пленочные, комбинированные и специальные.

**Грунтовые экраны.** Естественные отложения существенно глинистого состава (глины, тяжелые суглинки) иногда можно оставлять в качестве ПФЭ — при выдержанной их мощности (не менее 3 м) и только для резервуаров чистой воды или накопителей слабоминерализованных, нетоксичных и химически неагрессивных стоков. При этом нужно иметь в виду, что такие экраны характеризуются довольно высокой проницаемостью ( $k = 10^{-2} - 10^{-3}$  м/сут).

Искусственные глинистые экраны мощностью 0,3 м и более создаются путем послойной укладки и уплотнения глинистых грунтов до оптимальных значений влажности и плотности. Однако в процессе укладки в них неизбежно появляются трещины усыхания, т.е. резко возрастает проницаемость, поэтому во многих странах (в первую очередь, в США) от использования искусственных глинистых экранов практически отказались. К другим недостаткам грунтовых ПФЭ относятся подверженность размыванию поверхностными водами, т.е. необходимость создания специальной защиты из каменной наброски; химическая деградация глинистых грунтов под влиянием агрессивных промышленных стоков (например, рассолов), приводящая к резкому (на порядок и более) увеличению их проницаемости в сравнении с первоначальной.

Для улучшения пластических свойств и повышения химической стойкости грунтовых экранов предпринимались попытки использовать различные добавки к глинам: органику, жидкое стекло, растворы солей (аналогичные по составу промышленным стокам), поверхностно-активные вещества (ПАВ), бентонит, цемент, различные смолы и др., но в большинстве случаев стойкого улучшения противofiltrационных свойств экранов добиться не удалось.

Специфическим типом являются формирующиеся в процессе складирования отходов экраны из шламов — твердой фазы пульпы, сбрасываемой в накопители. Целенаправленное складирование отходов позволяет существенно снизить и даже практически ликвидировать утечки жидкой фазы отходов из накопителей. Например, в экспериментах с отходами обогащения калийных предприятий [8] коэффициент фильтрации опытных экранов из шламов составил  $10^{-4} - 10^{-6}$  м/сут, что обеспечивает вполне приемлемые с водоохраных позиций условия эксплуатации шламохранилищ. К несомненным достоинствам ПФЭ из шламов нужно отнести их устойчивость к агрессивным стокам (так как они формируются в той же среде) и низкую стоимость.

**Пленочные экраны.** Такие покрытия хранилищ промышленных стоков получили распространение с середины 1960-х гг. В этих целях используется широкая гамма синтетических пленок и материалов на резинобитумной основе. Они абсолютно непроницаемы (если иметь в виду сам материал), устойчивы к различным видам агрессивных воздействий, пластичны, длительное время (15 лет и более) сохраняют исходные свойства. В то же время у пленочных покрытий много существенных недостатков, среди которых сильная подверженность механическим повреждениям, трудности обеспечения герметичности при больших площадях покрытия, чувствительность к растягивающим усилиям (особенно по швам стыковки), довольно высокая стоимость. Поэтому за рубежом пленки в качестве ПФЭ используются преимущественно при создании резервуаров чистой воды и небольших (до нескольких тысяч квадратных метров) бассейнов промышленных стоков (в том числе, агрессивных).

**Комбинированные экраны.** Наибольшей надежностью отличаются комбинированные ПФЭ, сочетающие элементы грунтовых и пленочных экранов с дренажем. Синтетическая пленка укладывается между двумя слоями слабопроницаемых глинистых грунтов с добавками цемента, битумов, смол, бентонита и других компонентов. Эти слои выполняют также защитную функцию по отношению к пленке.

Наиболее широко распространены грунтово-цементные смеси. Так, в США и Канаде уже в 1982 г. существовало 250 хранилищ опасных жидких отходов, построенных с применением таких смесей. Толщина слоев (глина — 80%, цемент и вода — по 10%) составила всего 13 см, но во всех случаях была обеспечена высокая герметичность покрытия.

В грунтово-пленочных экранах с дренажем профильтровавшиеся через слой слабопроницаемого грунта и пленку загрязненные воды перехватываются систематическим дренажем.

Пример такого многослойного комбинированного экрана приведен на рис. 6.10 (свалка коммунальных отходов, штат Пенсильвания, США). Эти экраны весьма эффективны, несложны в исполнении, но имеют высокую стоимость и поэтому могут быть рекомендованы в наиболее сложных случаях (агрессивные, высокоминерализованные и токсичные стоки).

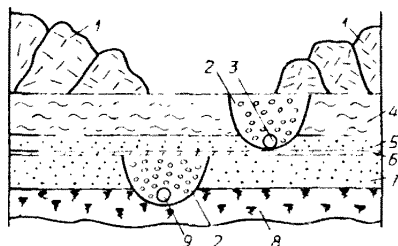


Рис. 6.10. Конструкция комбинированного экрана:

1 — хвосты; 2 — гравийный фильтр; 3 — перфорированная труба для сбора стоков; 4 — глинистый слой мощностью 30 см; 5 — слой песка мощностью 15 см; 6 — полихлорвиниловая пленка; 7 — слой песка мощностью 30 см; 8 — естественное основание; 9 — дренаж для сбора загрязненных вод, проникших через пленку

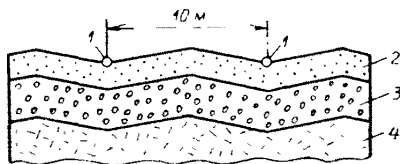


Рис. 6.11. Принципиальная схема экрана с "капиллярным барьером" для предотвращения выщелачивающей инфильтрации (по Д. Гуду):

1 — трубчатые дренажи для перехвата поверхностного стока; 2, 3 — слои тонко- и грубозернистого песка; 4 — тело отвала

**Специальные экраны.** К специальным ПФЭ относятся, например, покрытия, использующие экранирующий эффект капиллярной каймы. Такой экран впервые был использован в США для предотвращения выщелачивающей инфильтрации на отвалах коммунальных отходов. Принципиальная схема "капиллярного" экрана показана на рис. 6.11. При инфильтрации осадков, не перехваченных на поверхности системой дренажных труб, в верхнем слое тонкозернистого (0,1 мм) песка, толщина которого не превышает высоты капиллярного поднятия, формируется подвешенная капиллярная кайма, препятствующая просачиванию воды в нижний слой грубозернистого песка.

Основная сложность при создании таких экранов заключается в правильном подборе гранулометрического состава смежных слоев песка: соотношение фракций должно обеспечивать существенную разницу в величине капиллярного всасывания на границе раздела слоев. Наиболее надежны многослойные экраны такой конструкции, представляющие собой частое переслаивание тонко- и грубозернистого материала. Многослойные "капиллярные" экраны перспективны и в качестве покрытий хранилищ промышленных стоков: эксперименты показывают, что в этом случае создается многоярусный капиллярный барьер, суммарная величина капиллярного давления в котором способна "погасить" вертикальную фильтрацию даже при значительной (в несколько метров) толщине слоя воды в хранилище промышленных стоков.

Защитные свойства "капиллярного" экрана могут быть усилены одно-двухъярусным систематическим дренажем (например, в средней и нижней частях покрытия).

Необходимо упомянуть и о других поверхностных источниках ЗПВ: промышленных площадках предприятий, инженерных коммуникациях,

отвалах горных пород и т.д. Интенсивность ЗПВ со стороны этих источников обычно не столь высока, и проблема охраны подземных вод от загрязнения, как правило, удовлетворительно решается четкой организацией простейших профилактических мероприятий.

Так, для отвалов горных пород, наряду со специальным обоснованием участков отвалообразования, во всех случаях обязательно сооружение ограждающих дамб обвалования с водоотводящими траншеями для сбора и отведения в накопители загрязненных вод, стекающих с поверхности отвала и просачивающихся через отсыпаемую породу к периферии отвала.

Если основание отвала представлено слабопроницаемыми породами, то необходимость в его дренаже обычно отпадает (сильным защитным эффектом могут обладать и мощные (десятки метров) толщи трещиновато-пористых пород зоны азрации). В противном случае могут использоваться "песчаные подушки" (слой песка) или систематические дренажи различных конструкций (см. рис. 2.9). Иногда может оказаться полезной селективная отсыпка материала с укладкой более проницаемых (например, грубообломочных) пород в подошве отвала. Дренаж (или проницаемый слой) выводится в траншею, по которой дренажные воды вместе с поверхностными поступают в накопитель.

До сих пор мы говорили о профилактических мероприятиях в пределах самого источника загрязнения. Мероприятия такого рода в угрожаемом водоносном горизонте сводятся в основном к управлению фильтрационным потоком через действующие в районе (т.е. не создаваемые специально для борьбы с ЗПВ) водозаборные и водопоглощающие сооружения. Такое управление может включать:

- ограничение понижений на контуре действующих дренажных скважин теми минимальными величинами, при которых исключается продвижение загрязнения за пределы этого контура, сводится к минимуму подтягивание некондиционных подземных вод из глубоких горизонтов, снижается общий объем откачиваемых загрязненных (или некондиционных) вод и т.п.;

- увеличение нагрузки на действующие водопоглощающие сооружения для закачки дренируемых загрязненных вод;

- учет возможности разбавления загрязненных вод до допустимых концепций в процессе их откачки, когда действующие скважины расположены вблизи источников обеспеченного питания (реки, водоемы);

- раздельную откачку загрязненных и незагрязненных подземных вод;

- ограничение объема откачки (дренажа) путем ориентации только на те скважины, которые вскрыли интервалы превалирующей миграции загрязнений.

Реализация этих мероприятий может оказаться связанной с проблемой очистки, утилизации или захоронения загрязненных дренажных вод, которая должна решаться самостоятельно.

### 6.5.2. Активные мероприятия

Борьбу с реально проявившимся ЗПВ ведут по следующим основным направлениям: 1) ликвидация или дополнительная изоляция источника загрязнения; 2) локализация или откачка загрязненных пластовых вод; 3) сброс и утилизация загрязненных подземных вод, откачиваемых дренажными системами; 4) восстановление качества подземных вод в пределах сформировавшегося ореола загрязнения.

Полная ликвидация источника загрязнения с последующими мероприятиями по восстановлению качества подземных вод в зоне его влияния является, конечно, наиболее радикальной мерой борьбы с проявившимся ЗПВ. Для начала иногда целесообразно просто прекратить эксплуатацию накопителя (с переводом сброса стоков в заранее подготовленную резервную емкость) и провести его рекультивацию или реконструкцию по специальному проекту.

Альтернативой этим радикальным мерам является сокращение утечек промышленных стоков путем дополнительного экранирования источника ЗПВ (например, подводным складированием тонкозернистых "хвостов"; см. разд 6.5.1) или его изоляции оконтуривающей противофильтрационной завесой (ПФЗ). Так, "грунтовая стенка" (барраж) выполняется в виде траншеи, заполненной слабопроницаемым (обычно глинистым) материалом. Проницаемость таких перемычек может быть доведена до  $10^{-2} - 10^{-4}$  м/сут. Траншея прокладывается с помощью экскаваторов или специальных буровых агрегатов. Барражные завесы сооружаются обычно на всю мощность водоносного горизонта до относительно слабопроницаемых отложений в его основании. Освоенная глубина сооружения грунтовых барражей достигает 20 м, однако специальные барражные машины уже сейчас позволяют возводить перемычки глубиной до 50 м и более.

Локализация загрязнения в водоносном пласте возможна посредством управления фильтрационным потоком через специальные водозаборные и водопоглощающие сооружения — дренажи, гидрозавесы и их сочетания, а также посредством глубоких ПФЗ, оконтуривающих источники загрязнения.

Дренаж обычно предполагает проходку рядов откачивающих скважин (реже траншей) в пределах ореола ЗПВ (как правило, нормально направлению миграции) для перехвата загрязненной воды. Понижения

уровней на линии дренажа минимизируются по допустимому "проскоку" загрязнений, который в предельном случае принимается равным нулю. Однако вне связи с другими способами активной защиты дренаж приемлем только при ограниченных объемах откачиваемых загрязненных вод, допускающих их обратный сброс в накопители или использование для оборотного промышленного водоснабжения. Возможности дренажа расширяются при высокой степени разбавления загрязнений чистой водой в дренажных устройствах, когда оказывается допустимым сброс



дренажных вод в гидрографическую сеть без их предварительной очистки или прямое использование этих вод для технических целей. Во всех остальных случаях дренажные мероприятия в районе источника загрязнения замыкаются на предварительную очистку или подземное захоронение откачиваемых загрязненных вод (см. ниже). Ограничения на дренаж могут диктоваться и другими обстоятельствами:

высокими эксплуатационными расходами на длительную откачку воды;

возможным резким увеличением объемов откачиваемых загрязненных вод за счет роста градиентов на участке между дренажем и источником ЗПВ, а также дополнительного вовлечения в водооборот незагрязненных вод, смешивающихся при откачке с загрязненными; в противном случае необходимо вести разделную откачку более чем на одном уровне.

В то же время нельзя не отметить мобильность дренажных систем, сравнительно небольшие капитальные затраты на их сооружение и высокую техническую эффективность.

*Гидрозавесы* предполагают создание гидродинамического барьера на пути миграции загрязнений. Для этого предусматривается сооружение ряда нагнетательных скважин вниз по потоку загрязненных вод с последующей непрерывной закачкой в них чистой воды из независимого внешнего источника. Отметки пьезометрических уровней по контуру гидрозавесы должны обеспечивать создание искусственного водораздела подземных вод на пути миграции загрязнений, сдерживающего их дальнейшее продвижение по пласту.

Возможно сочетание нагнетательных скважин с откачивающими, расположенными ниже по потоку от ореола загрязнения. Откачиваемая вода при этом подается в скважины гидрозавесы. Благодаря образованию искусственного водораздела в условиях существенно установившегося движения подземных вод между линиями откачивающих и нагнетательных скважин, ореол загрязнения удерживается в определенных границах, а незагрязненные подземные воды обтекают его. Конечно, такая схема приемлема лишь при потоках загрязненных вод ограниченной ширины и интенсивности. В противном случае откачивающие скважины будут давать загрязненную воду.

К недостаткам гидрозавес, помимо значительных эксплуатационных расходов, следует отнести постепенное снижение дебита нагнетательных скважин в результате колюматации. Это требует их систематического ремонта и наличия практически стопроцентного резерва. Кроме того, подаваемая для нагнетания вода нуждается в тщательной очистке от механических примесей. В то же время эти недостатки во многом окупаются невысокими капитальными затратами на сооружение таких систем, их мобильностью и отсутствием проблемы утилизации или очистки загрязненных подземных вод. В целом все же следует признать, что надежность гидрозавес как средства локализации загрязнений меньше, чем надежность дренажа. Ни гидрозавесы, ни комбинированные системы пока не нашли широкого применения на практике для решения проблемы локализации источников ЗПВ.

Гораздо более радикальным, но и дорогостоящим средством являются глубокие ПФЗ, околитурирующие горные выработки и снимающие,

таким образом, необходимость откачки больших объемов загрязненных вод, в частности естественных рассолов. Таковы *инъекционные завесы*, сооружаемые на глубинах в сотни метров путем закачки в пласты (в основном трещиноватых пород) тампонажных смесей под давлением. Закачка осуществляется, как правило, в изолированные интервалы скважин с применением тампонирующих устройств (пакеров). При затвердевании тампонажного раствора создаются весьма эффективные ПФЗ [6], хотя часто бывает трудно проконтролировать их сплошность. По типу используемых тампонажных смесей инъекционные ПФЗ можно разделить на две группы:

а) цементные и глиноцементные завесы, используемые для защиты пресных вод и слабоминерализованных и неагрессивных стоков;

б) завесы на грунтовой основе с преобладанием в составе закачиваемого раствора местных строительных материалов глинистого состава с различными добавками, способствующими "схватыванию" раствора в трещинах и повышению его устойчивости к агрессивному воздействию загрязненных подземных вод.

Использование инъекционных ПФЗ в водоохранных целях пока сдерживается очень высокой их стоимостью и неясностью представлений о критериях надежности, способах ее обеспечения и методах контроля сплошности завесы. Тем не менее инъекционные ПФЗ следует рассматривать как весьма перспективное средство защиты подземных вод от загрязнения и истощения.

В состав активных мероприятий все чаще включают *подземное захоронение* жидких стоков и некондиционных дренажных вод. В настоящее время эта мера целесообразна при относительно небольших объемах загрязненных вод: расход закачки (на глубину 1500–2000 м и более) обычно не должен превышать  $5000 \text{ м}^3/\text{сут}$ , рядовые же расходы закачки составляют не более  $1000 \text{ м}^3/\text{сут}$  в одну скважину.

Если в качестве коллекторов для закачки загрязненных дренажных и рудничных вод используются дренируемые горизонты с некондиционными водами, то обоснование такого способа захоронения во многом подобно обоснованию искусственного восполнения запасов подземных вод (см. разд. 6.2). В частности, при высокой проницаемости пород здесь появляется реальная возможность создания системы замкнутого оборота загрязненных дренажных вод, основанной на идее гидрозавесы (Г.В.Короткевич): дренажные воды сбрасываются в поглощающие (нагнетательные) скважины, располагающиеся по периферии контура дренажа на удалении от него порядка нескольких километров (но не далее местных водоразделов депрессионной воронки). При этом попутно решается задача борьбы с истощением водоносного горизонта из-за наличия искусственного водораздела, формируемого по линии нагнетательных скважин. При захоронении загрязненных вод в более глубокие структуры выбор и оценка этих структур должны осуществляться (согласно действующим инструктивным и методическим документам) геологоразведочными ор-

ганизациями Министерства геологии СССР на стадии разведки и оценки запасов месторождения; на деле, однако, это часто происходит уже после передачи его в эксплуатацию.

Использование способа подземного захоронения сдерживается очень высокой его стоимостью даже при относительно небольших дебитах за- качки, имеющих к тому же тенденцию к снижению во времени из-за коль- матации скважин. Кроме того, часто бывает весьма трудно выдержать все технические и социальные требования, предъявляемые к таким системам [3, 4]. Тем не менее экологическая обстановка заставляет все чаще об- ращаться к этому способу.

По данным В.М.Гольдберга [3], в США в 1980 г. эксплуатировалось более 250 скважин для закачки, а объем закачиваемых стоков вырос за 7–10 лет в 2 раза. При этом отчетливо выражена тенденция использовать подземное захоронение, прежде всего, как способ решения проблемы жидких отходов производства, минуя стадию складирования их в поверхностных технических водоемах – наиболее мощ- ных источниках ЗПВ.

Наряду с подземным захоронением дренажных вод должны быть рас- смотрены возможности их утилизации и (или) предварительной очистки (в частности, с последующим сбросом в гидрографическую сеть).

*Утилизация* без очистки возможна в основном для слабоминерализо- ванных или практически пресных дренажных вод. Такие воды могут быть использованы для технического водоснабжения, в системах охлаж- дения, пылеподавления и т.д. Использование дренажных вод для техно- логических нужд часто даже предпочтительнее, чем подача воды из по- верхностных отстойников, в силу минимальной загрязненности механи- ческими примесями.

Однако чаще всего утилизация загрязненных дренажных вод (и тех- нологических стоков) возможна только после их предварительной очист- ки.

Обычные способы очистки (коагуляция, отстаивание, умягчение, фильтрова- ние, хлорирование и т.п.) неэффективны для сильно загрязненных растворов. Наи- более часто применяемые и эффективные методы очистки включают уничтожение взвешенной органики путем аэрирования; разложение органики микроорганизма- ми; окисление загрязнителей обработкой в струе воздуха (обычно сильно нагрето- го), кислорода, озона; адсорбцию гранулированным активированным углем или с помощью синтетических смол; комбинации аэрирования и адсорбции; биофизи- ческую очистку (от ионов металлов); обработку загрязнителя различными хими- ческими реагентами (например, известью для нейтрализации кислых вод и осажде- ния солей тяжелых металлов); электронейтрализацию активным током промыш- ленной частоты (очистка воды от нефтепродуктов). В ряде случаев для очистки во- ды от ионов тяжелых металлов может быть использована твердая фаза отходов обогащения, нередко обладающая высокой сорбционной способностью по отноше- нию к определенным элементам.

Не решенной пока на практике остается проблема опреснения высо- коминерализованных техногенных и естественных рассолов. Очевидно,

кардинальное ее решение заключается в создании "сухих" технологий обогащения и использовании рассолов в качестве исходного сырья для получения многих ценных продуктов (брома, йода, многих редкоземельных элементов, технической соли и др.).

Наконец, следует упомянуть о проблеме *восстановления качества загрязненных подземных вод* в пределах водоносного пласта. В большинстве случаев даже после ликвидации или надежной изоляции источников ЗПВ естественное восстановление качества подземных вод в пределах ореолов загрязнения растягивается на многие годы и даже десятилетия (например, в трещиновато-пористых коллекторах это происходит за счет процессов обратной молекулярной диффузии и десорбции загрязнителя из пористых блоков в трещины). Соответственно, длительное время остается загрязненной и местная гидрографическая сеть, в которую разгружаются некондиционные подземные воды.

Ускорение этого процесса может быть достигнуто двумя путями:

- 1) искусственным увеличением фильтрационных и концентрационных градиентов, которое обеспечивается только интенсивным и длительным дренажем в пределах ореола загрязнения: обычно приходится откачивать объемы воды, в десятки раз превышающие объем загрязненных вод;
- 2) очисткой *in situ*, практически приемлемой только для однородных в миграционном отношении сред.

Очистка *in situ* предполагает закачку в загрязненный водоносный горизонт растворов, содержащих нейтрализующие химические компоненты или микроорганизмы. Этот способ пока еще не вышел из стадии исследований. На успех в его применении можно рассчитывать лишь в тех случаях, когда тщательно изучен состав загрязнителей и уровень ЗПВ.

Известен и другой способ очистки загрязненных дренажных вод *in situ*, когда в качестве фильтра используются естественные грунты с высокой сорбционной (реакционной) способностью по отношению к данному виду загрязнителя. При этом технологическая цепочка существенно усложняется и выглядит так: откачка загрязненных вод – закачка (инфильтрация) для очистки – откачка очищенных вод. Цикл "закачка–откачка" может повторяться многократно, так что этот вариант отличается высокой стоимостью.

Разумеется, рассмотренные мероприятия далеко не исчерпывают всех возможностей борьбы с ЗПВ. Научные исследования в этом направлении ведутся широким фронтом, открывая дорогу появлению новых, более совершенных инженерных решений.

### 6.5.3. Санитарная охрана водозаборов-дренажей

Использование дренажных вод для водоснабжения (см.разд. 6.2.2) предъявляет особые требования к их санитарной охране. По аналогии со специализированным отбором подземных вод и в соответствии с существующими нормативными документами и методическими рекомендациями [2, 4], для подобных дренажных систем должна предусматриваться организация традиционных зон санитарной охраны (ЗСО): первого пояса — зоны строгого режима; второго и третьего поясов — зон ограниченных, предназначенных для защиты водоносного горизонта соответственно от микробного и химического загрязнений.

В *первый пояс ЗСО* включается территория в радиусе 30–50 м, непосредственно прилегающая к дренажу-водозабору. К оборудованию дренажных скважин должны предъявляться повышенные требования: в частности необходима их надежная изоляция от проникновения загрязнений извне, что достигается путем затрубной цементации, создания гидроизоляционной обмотки колонн труб, оборудования устья скважин водоприемными герметичными устройствами. В целом требования аналогичны требованиям, предъявляемым к обычным водозаборам.

Эти требования могут быть соблюдены сравнительно легко при использовании подземных вод, отбираемых внешними контурными системами дренажных скважин. Более того, расстояние 30–50 м может быть по-видимому, несколько сокращено со стороны водозабора, обращенной к карьеру (что является существенным моментом, учитывая тенденцию к концентрированию транспортно-эксплуатационных систем вблизи карьера): при достаточно длительном водопонижении приток подземных вод из внутренней области пренебрежимо мал по сравнению с общим водопритокком.

В отличие от подземных вод, извлекаемых внешними дренажными устройствами, воды, откачиваемые непосредственно из горных выработок, как правило, не удастся надежно защитить от загрязнения. Поэтому рудничные воды в условиях открытой разработки по возможности используют только в технических целях. Исключение могут составлять воды нерабочего борта, отбираемые закрытым горизонтальным дренажем или горизонтальными скважинами. Хозяйственно-питьевое водоснабжение с помощью такого водозабора-дренажа должно предусматривать организацию ЗСО и внутри карьера.

Размеры и конфигурация в плане *второго и третьего поясов ЗСО* определяются гидрогеологическими расчетами(см.гл. 8) с тем, чтобы исключить возможность достижения водозабора соответственно микроб-

---

Здесь этот вопрос рассматривается прежде всего применительно к районам открытых горных разработок, где учет специфики горного производства в свете соблюдения требований санитарной охраны водозаборов-дренажей имеет особое значение.

ными и химическими загрязнителями, поступающими в водоносный горизонт за пределами границ этих поясов. Таким образом, при гидрогеологическом обосновании рассматриваемых ЗСО показателями, контролирующими их размеры, являются скорости миграции загрязнений, увязанные с характерным временем  $T_c$ , необходимым для полного самоочищения подземных вод, или с периодом  $T_z$  эксплуатации водозаборного сооружения. Так, границы второго пояса ЗСО рекомендуется [2] рассчитывать по времени  $T_m$  выживаемости (утраты жизнеспособности и вирулентности) и продвижения микробного загрязнения с потоком подземных вод к водозабору  $T_c = T_m$  ( $T_m$  находится в пределах 200–400 сут).

Как правило, размеры второго пояса ЗСО значительно меньше расстояний до внешних границ ее третьего пояса, которые контролируются условиями миграции более устойчивых химических соединений. Если эти соединения не подвержены распаду, то при оценках положения границы третьего пояса ЗСО рекомендуется привязка к полному сроку эксплуатации водозаборов  $T_z$  (обычно 25–50 лет). Эти границы носят менее определенный характер, поскольку результаты соответствующих миграционных расчетов неоднозначны: они варьируют в широком диапазоне значений в зависимости от особенностей физико-химического взаимодействия различных групп возможных загрязняющих компонентов с горными породами. Поэтому ясно, что расчеты границ третьего пояса ЗСО во многом теряют смысл без привязки к конкретной геолого-гидрогеологической обстановке и к условиям существующего и возможного загрязнения. Оценка же этих границ для условно инертных компонентов во многих случаях дает неоправданный запас.

В стандартном варианте в пределах второго и третьего поясов зоны санитарной охраны запрещается проведение земляных работ с нарушением защитного слоя над водоносным горизонтом, регулируются все строительные работы и не допускается сооружение объектов, представляющих опасность с точки зрения возможности загрязнения подземных вод и нарушения нормальной эксплуатации водозабора. К сожалению, применительно к районам интенсивного ведения горных работ, в особенности открытых, формальное выполнение столь жестких требований часто затруднительно, а то и вовсе невозможно; это, однако, не исключает возможности их выполнения по существу, но требует в каждом конкретном случае внимательного обоснования, предполагающего обычно проведение специальных прогнозных оценок.

Такого рода оценки для контурных водозаборов-дренажей должны в максимальной степени учитывать возможности снижения опасности загрязнения подземных вод и улучшения их качества в результате сильного разбавления стоков как в процессе миграции, так и непосредственно на водозаборе (например, при замыкании всех дренажных устройств на общий коллектор случайного загрязнения одного из них не будет приводить к заметному изменению качества воды в целом). Эффекты внутрипластового разбавления особенно значимы в профилно неоднородных и

гетерогенных водоносных системах, а также при наличии гидродинамически несовершенных питающих границ. Эти эффекты позволяют в ряде случаев гарантировать санитарную защиту водозаборов-дренажей при случайном кратковременном и локальном сбросе загрязнений на дневную поверхность в пределах второго и третьего поясов ЗСО.

С рассмотренных позиций благоприятные перспективы для использования дренажных вод с соблюдением правил их санитарной охраны открываются в Губкинско-Стойленском районе КМА (см.разд. 6.1). Из приведенного анализа ясно, что попадание загрязняющих веществ на поверхность грунтового потока, приуроченного к трещиноватым меловым породам, не приводит к резкому ухудшению качества подземных вод: этому препятствует наличие двойной пористости у мелов и перетекание загрязнений в песчаный горизонт, где происходит их разбавление (примерно на порядок). Отсюда, в частности, следует, что размеры зоны санитарной охраны для водозаборов, ведущих откачку воды из мелов, должны быть во много раз больше, чем для водозаборов, оборудованных только на пески. В целом важнейшие требования эффективной санитарной охраны для водозаборов района сводятся к следующему:

- 1) откачку воды для хозяйственно-питьевого водоснабжения нужно вести из скважин, фильтры которых оборудованы только на песчаную толщу;
- 2) на водозаборе необходимо создать такие понижения, при которых граница депрессионной поверхности с подошвой мелов удалена от водозабора хотя бы на несколько десятков метров.

Как правило, схема оборудования дренажных устройств и величины понижений на внешних дренажных контурах карьеров удовлетворяют этим требованиям. Дополнительной гарантией санитарной охраны могут служить регулярные отборы проб на химические анализы по сети наблюдательных скважин (см.разд. 7.4.2)

## Контрольные вопросы

1. Какие главные природные и техногенные факторы определяют масштабы и характер нарушений в естественном режиме подземных вод при горных разработках? Как связаны между собой процессы истощения и загрязнения подземных вод? В чем заключается особенности формирования нарушенного режима подземных вод при разработке месторождений открытым и подземным способами? Какое влияние на экологическую обстановку в горнодобывающих районах оказывает увеличение глубин отработки месторождений?

2. Какие горно-геологические и гидрогеологические факторы можно отнести к управляемым при оценке условий охраны подземных вод от истощения в процессе освоения месторождений? Назовите основные мероприятия, обеспечивающие охрану подземных вод от истощения в горнодобывающих районах. В таких целях могут использоваться дренажные и рудничные (карьерные, шахтные) воды? Каковы основные особенности утверждения эксплуатационных запасов дренажных вод? Какие вы знаете способы искусственного восполнения эксплуатационных запасов подземных вод? Назовите факторы, контролирующие их эффективность.

3. Какими критериями пользуются при оценке влияния загрязнения на качество подземных вод? Каковы основные различия показателей качества рудничных (карьерных) вод и сточных растворов, образующихся в процессе переработки и обогащения минерального сырья? На каких принципах основана типизация условий загрязнения подземных вод? Какие характеристики гидрогеологических условий необходимы для выделения различных типов поверхностных источников загрязнения?

4. Вспомните основные требования к проектам горнодобывающих предприятий с позиций охраны подземных вод от истощения и загрязнения; всегда ли эти

требования совпадают с традиционными представлениями об эффективности дренажных мероприятий, о целесообразной степени экранирования оснований гидротехнических сооружений, о характере контрольных мероприятий? Чем оправдан опытно-эксплуатационный подход к изучению процессов загрязнения подземных вод? В каких ситуациях целесообразно обращение к концепции контролируемого загрязнения подземных вод? Какие особенности развития миграционных процессов и их опытного изучения оправдывают применение этой концепции?

5. Почему гидрогеологическая информация, необходимая для построения фильтрационной схемы месторождения, оказывается недостаточной при оценке и прогнозе техногенного загрязнения подземных вод? Какие требования предъявляются к изучению взаимосвязи поверхностных и подземных вод на участках их загрязнения техногенными стоками? Какие требования предъявляются к детальности профильного фильтрационного расчленения гидрогеологических разрезов при обосновании гидродинамических и гидрогеохимических прогнозов? Чем определяется глубина гидрогеологической разведки месторождений, при обработке которых возможен приток природных высокоминерализованных вод? Какие показатели должны определяться при их разведке? Каковы принципиальные ограничения на возможность изучения параметров и процессов загрязнения подземных вод при гидрогеологической разведке месторождений?

6. Какие типы противифльтрационных экранов вам известны? Перечислите достоинства и недостатки каждого из них. Какие существуют способы управления величинами утечек из технических бассейнов в процессе их заполнения промышленными стоками горно-обогатительных предприятий? Дайте обоснование целесообразности создания противифльтрационных завес и защитных рядов дренажных скважин в зависимости от условий формирования потоков загрязненных вод. Какие способы создания противифльтрационных завес предпочтительны в пористых (песчано-глинистых) и твердых трещиноватых породах? Чем определяется эффективность подземного захоронения карьерных и шахтных вод в изолированные геологические структуры и дренируемые водоносные горизонты (обратная закачка)?

7. Какие принципы положены в основу назначения зон санитарной охраны подземных вод? Какие гидрогеологические расчеты при этом выполняются? Сопоставьте возможности организации зон санитарной охраны при проектировании поверхностных и подземных систем осушения месторождений.

## **ГЛАВА 7**

### **ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ В СВЯЗИ С ОХРАНОЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНАХ**

Рассматриваемые в настоящей главе гидрогеологические методы направлены на всестороннее изучение и прогноз техногенного загрязнения подземных вод, а также на эффективный контроль этого процесса. Сформулированные ранее требования к гидрогеологической изученности месторождений (см. разд. 6.2) определяют следующую логическую цепь необходимых исследований: 1) изучение гидродинамической взаимосвязи техногенных водоемов с подземными водами; 2) установление миграционных и уточнение фильтрационных параметров, контролирующих интенсивность массопереноса в подземных водах; 3) наблюдения на участках загрязнения подземных вод; 4) анализ условий и прогноз миграции некондиционных растворов в водоносных пластах.



## 7.1. ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ТЕХНИЧЕСКИХ ВОДОЕМОВ С ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ

Необходимость детального изучения режима подземных вод вблизи бассейнов промышленных стоков обусловлена тем, что неверная оценка ожидаемого объема инфильтрации из гидросооружений может вызвать серьезные ошибки как в прогнозах гидродинамического режима (возможного истощения эксплуатационных запасов подземных вод) для района в целом, так и при анализе условий миграции химических компонентов в водоносных пластах (возможного загрязнения подземных вод). Для решения рассматриваемой задачи используют два подхода.

Первый основывается на гидродинамических прогнозах, для которых наряду с традиционной оценкой фильтрационных параметров водоносных пластов первостепенное значение имеет изучение проницаемости донных отложений в основании техногенных бассейнов (до их заполнения стоками) опытными наливками в шурфы и скважины. Второй подход относится к действующим водоемам и заключается в непосредственном определении инфильтрационного расхода по результатам балансовой оценки потерь воды или прямыми инструментальными измерениями на отдельных участках акватории водоема; в тех же целях могут использоваться косвенные показатели — определяемые в естественных условиях скорости и направления фильтрационного потока вблизи водоема, скорости распространения аномалий теплового поля (вызванных водоемом), данные о структуре электрического поля и т.п.

### 7.1.1. Оценка проницаемости экранирующих отложений опытными опробованиями

Наливы в шурфы — наиболее широко применяемый способ определения вертикальной проницаемости покровных отложений, в частности природных и искусственных глинистых экранов на участках проектируемых гидротехнических сооружений. Традиционные модификации наливов в шурфы могут дать информацию лишь применительно к песчаным и однородным супесчаным отложениям [7]. Распространение стандартных методик наливов на слабопроницаемые суглинистые и глинистые отложения ( $k < 0,1$  м/сут) может повлечь погрешности в определении параметров проницаемости, достигающие одного-двух порядков и более. Возникающие при этом погрешности экспериментов вызваны трудностями учета бокового растекания, капиллярных и диффузионных эффектов, а также неоднородностью слоистой среды или гетерогенностью (двойной пористостью) опробуемого массива<sup>1</sup>; иногда существенную роль могут играть и другие факторы — несоответствие напряженного состояния пород в опытных и прогнозных условиях, трудности

---

<sup>1</sup> Заметим, что внешне однородные по составу породы зоны аэрации часто могут обладать скрытой фильтрационной неоднородностью вследствие макротрещиноватости, наличия ходов землеросов, корней растений.

удаления воздуха из опробуемой породы, химический состав используемой для налива воды и др.

Снизить роль отмеченных погрешностей можно, разумно увеличивая масштаб и продолжительность, усложняя методику проведения полевого эксперимента. Так, увеличение масштаба эксперимента, а именно использование для проведения наливов шурфов (опытных площадок, котлованов) площадью до нескольких десятков квадратных метров, заметно снижает суммарное влияние эффектов бокового растекания и одновременно способствует площадному усреднению фильтрационных свойств опробуемых неоднородных отложений. Увеличение продолжительности крупномасштабных экспериментов, которая должна составлять, по крайней мере, несколько суток, позволяет наряду с повышением представительности (глубины) опробования избежать заметного проявления гетерогенности (например, путем длительного предварительного замачивания опробуемых грунтов, переходящих при этом в квазинасыщенное состояние).

Второй путь — использование прямых (гидрофизических или индикаторных) способов прослеживания перемещения фильтрующейся жидкости в массиве пород. Так, для измерения всасывающего давления влаги или гидростатического напора в опробуемых грунтах используются почвенные тензиометры.

Тензиометр состоит из пористого зонда и соединенного с ним с помощью трубок измерительного устройства в виде ртутного манометра или вакуумметра. Принцип работы тензиометра основан на определении давления влаги в грунте по значению установившегося давления воды, заполняющей зонд. Тензиометрические наблюдения в процессе опытного налива позволяют контролировать динамику фильтрационного потока по распределению давления в различных точках опробуемых толщ. Таким образом, в частности, устанавливаются размеры зон квазинасыщенного состояния грунта и бокового растекания.

Существует и прямой метод прослеживания перемещения фронта увлажнения с помощью скважинного нейтронного измерителя влажности (НИВ). В сильно увлажненных грунтах эффективность этого метода возрастает при введении в наливаемый раствор "борной метки" — солей борной кислоты, присутствие которых повышает степень поглощения породой нейтронных импульсов, вырабатываемых и фиксируемых НИВ.

Менее надежно выявление экранирующих отложений наливками воды через скважины. Этот способ можно рекомендовать лишь для ориентировочных качественных оценок.

Опытные наливки полезно дополнить комплексом лабораторных определений проницаемости, которые, в частности, позволяют лучше оценить изменчивость проницаемости в зависимости от минерализации и состава раствора, а также от напряженного состояния пород (например, при их пригрузке техногенными грунтами, приводящей к ликвидации макропор при замачивании).

При залегании опробуемого экранирующего слоя заметно ниже дневной поверхности его вертикальную проницаемость определяют "наливом на слой" через скважину. Информативность таких экспериментов может быть повышена использованием индикаторной жидкости (например, минерализованной воды): в этом случае при глубинах опробования до 10 м радиус области ее растекания по кровле опробуемого слоя (показатель, необходимый для последующих расчетов) может быть установлен без бурения дополнительных наблюдательных скважин с использованием геофизического метода заряженного тела.

### **7.1.2. Геофильтрационные наблюдения за утечками из бассейнов промышленных стоков**

Общепринятым методом оценки фильтрационных потерь из водоемов в эксплуатационный период являются наблюдения за уровнем режимом подземных вод, для чего проводятся фильтрационные расчеты по отдельным лентам тока, выделенным на основе карт гидроизогипс.

Наблюдательные скважины обычно располагают по лучам, расходящимся от бассейнов в направлениях предполагаемого движения подземных вод. В первую очередь такие лучи следует создавать на наиболее опасных с точки зрения загрязнения направлениях — в сторону действующих водозаборов, участков разгрузки подземных вод (например, в долинах рек) и по другим, где после ввода в действие хранилища стоков можно ожидать максимальных действительных скоростей фильтрации. При этом для оценки фильтрационного сопротивления ложа водоема необходимо некоторое сгущение наблюдательной сети вблизи береговой линии: на каждом луче здесь должно быть не менее двух скважин на расстоянии несколько десятков метров одна от другой (первая скважина — в непосредственной близости от проектного уреза воды). В то же время при выборе местоположения и конструкций скважин следует исходить из того, что они в дальнейшем будут использоваться для гидрохимического опробования (см. разд. 7.4).

Большое значение для изучения инфильтрации из бассейнов промышленных стоков имеет организация специальных пунктов наблюдений непосредственно на площади водоема. Учитывая, что после заполнения бассейна организовать наблюдения на удаленных от берега участках будет трудно, необходимо заранее, до его заполнения, разместить там соответствующую аппаратуру. Для определения напоров в породах экранов целесообразно использовать "точечные" пьезометры или дистанционные датчики порового давления, которые устанавливают в средней части и в подошве экранов. На участках, где предполагается интенсивная инфильтрация, часть датчиков имеет смысл расположить непосредственно на поверхности, после чего они замыкаются техногенными образованиями.

Для количественной оценки интенсивности инфильтрации из бассейнов промышленных стоков, а также для более надежной оценки фильтрационного сопротивления донных отложений весьма эффективны

прямые методы изучения инфильтрации из водоемов. Наиболее доступным и широко применяемым на практике является балансовый метод. Другой прямой метод определения величин утечек — инфильтрометрические наблюдения на отдельных участках водоема. В основу работы инфильтрометров различных конструкций положена фиксация тем или иным способом расходов воды, инфильтрующейся из полого цилиндра (отрезка трубы), задавливаемого в донные отложения.

Балансовый расчет утечек воды и проведение инфильтрометрических измерений имеют вполне самостоятельное значение и могут дополнять друг друга. Если первый метод позволяет при благоприятных обстоятельствах получить достаточно надежные значения суммарной инфильтрации из водоема, то второй дает возможность выделить участки, различающиеся проницаемостью донных отложений и удельной величиной фильтрационных потерь.

### 7.1.3. Применение гидрогеофизических методов для изучения фильтрационных потоков

Определение скорости фильтрации, которая может рассматриваться как самостоятельный параметр миграции, — необходимое условие для обоснования расчетных моделей миграции и выполнения последующих прогнозов переноса вещества подземными водами. Поэтому во всех случаях необходимо стремиться к идентификации поля скоростей фильтрации *in situ*; весьма оперативно такие определения можно выполнять, используя гидрогеофизические методы скважинной резистивиметрии и термометрии. Применение этих методов позволяет одновременно провести более детальное исследование водоносных комплексов по фильтрационным свойствам. Для изучения распределения скоростей фильтрации через экранирующие отложения бассейнов стоков может использоваться метод термозондирования донных отложений. Наконец, гидрогеофизический каротаж позволяет контролировать качество и состояние наблюдательных скважин, т.е. непосредственно оценивать представительность информации, получаемой в результате режимных наблюдений.

Методика определения скоростей фильтрации по данным *резистивиметрии* освещена в многочисленных публикациях [7, 8, 9] (см. разд. 7.2.5), поэтому обратим внимание лишь на некоторые аспекты метода при региональных исследованиях. Для каждой опробуемой резистивиметрией скважины требуется определение коэффициента искажения потока, учитывающего состояние ее прифилтровой зоны. Для этого оценивается гидродинамическая реакция наблюдательных скважин на экспресс-наливы до или после резистивиметрического каротажа [9]. В целом при постановке резистивиметрических наблюдений, особенно в водоносных горизонтах с плохо изученными фильтрационными свойствами, необходимо сводить к минимуму влияние кольматации скважин

и проводить каротаж преимущественно в недавно пробуренных и тщательно разглинзированных скважинах. В противном случае результаты резистивиметрии могут оказаться практически неинтерпретируемыми.

Заметно влияют на результаты резистивиметрии плотностная дифференциация индикатора в стволе наблюдательной скважины и особенно внутрискважинные перетоки, вызываемые неравномерным распределением напоров по вертикали; чаще всего такие перетоки отмечаются вблизи участков интенсивного питания или разгрузки подземных вод. Эффективный способ устранения вертикальных перемещений индикаторов в скважине – надежная изоляция ее отдельных, небольших, интервалов, которые оборудуют автономными резистивиметрами. В противном случае использование метода резистивиметрии для определения скоростей фильтрации в водоносных комплексах имеет довольно жесткие рамки [9].

*Термометрические наблюдения* в водоносных пластах (вблизи контуров питания) производятся с целью изучения распространения в них тепловых возмущений. Причиной возникновения этих возмущений является фильтрация со стороны водоема, где происходят сезонные температурные колебания. Основываясь на данных о температурном режиме горизонта, можно рассчитать средние скорости фильтрации подземных вод между водоемом и наблюдательными скважинами по формуле "поршневого вытеснения" [7]:

$$v = \frac{x(C_{\text{оп}}/C_{\text{ов}})}{\Delta t_x}, \quad (7.1)$$

где  $C_{\text{оп}}$  и  $C_{\text{ов}}$  – объемные теплоемкости пласта и воды (отношение  $C_{\text{оп}}/C_{\text{ов}}$ , отвечающее эффективной ("тепловой") емкости пласта, обычно изменяется от 0,6 до 0,8);  $\Delta t_x$  – время перемещения "пиковых" значений температуры на расстояние  $x$ , отвечающее расположению наблюдательной скважины.

Таким образом, по результатам термометрических наблюдений выделяются наиболее фильтрующие участки в отложениях, экранирующих водоем, причем соответствующие количественные показатели оцениваются вполне надежно.

Сезонные колебания температуры в потоке подземных вод, доступные для регистрации современной аппаратурой, имеющей чувствительность порядка 0,05 °С, распространяются на значительные расстояния от береговой линии: при скоростях фильтрации, составляющих десятые доли метра в сутки – на первые сотни метров, т.е. искомая скорость определяется с высокой степенью усреднения. Кроме того, благодаря преимущественно кондуктивному характеру теплопередачи от пласта к скважине, положение и состояние ее фильтра практически не влияют на результаты измерения температуры пласта, что выгодно отличает данный метод, например, от резистивиметрии наблюдательных скважин. Еще одно важное достоинство описываемого метода – его практическая независимость (при относительно больших удалениях наблюдательных скважин) от наличия кольматационного слоя, экранирующего водоем: сравнительно большие скорости кондуктивного теплопереноса быстро снимают его искажающее влияние.

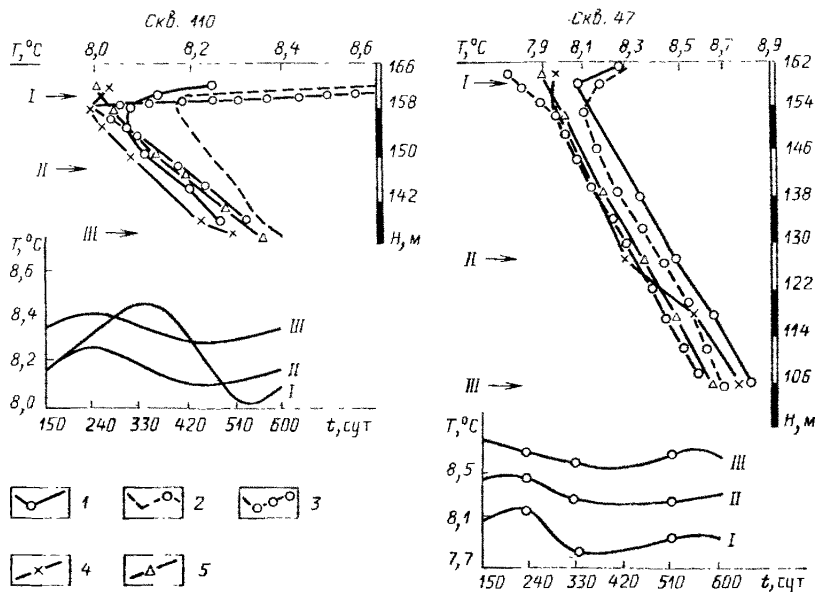


Рис. 7.1. Характерные графики изменения температуры воды в скважинах режимной сети хвостохранилища Лебединского ГОКа по глубине и во времени:

I – июнь 1983 г.; 2 – сентябрь 1983 г.; 3 – декабрь 1983 г.; 4 – июнь 1984 г.; 5 – октябрь 1984 г. I–III – участки, для которых построены кривые изменения температуры воды (стрелка указывает абсолютную отметку)

*Термозондирование* донных отложений используется для определения в них величины вертикальной скорости фильтрации. Оно заключается в определении температурного градиента в верхнем (примерно одно-двухметровом) слое придонных отложений при помощи специального зонда; последний представляет собой стержень с наконечником, оборудованным термодатчиками.

Графики термозондирования  $T - z$ , характеризующиеся максимальными температурными градиентами, отражают условия преимущественно кондуктивного прогрева донных отложений, фильтрация (конвекция сточных растворов) через которые идет крайне медленно. Наоборот, резко выположенные графики с плавным изменением температуры по глубине отражают интенсивное движение стоков через донные отложения, благодаря чему они равномерно прогреваются на значительную глубину. Количественные приемы интерпретации данных термозондирования рассматриваются в работе [8].

Рассмотрим в качестве примера результаты использования гидрогеотермических методов для уточнения условий фильтрации техногенных вод из хвост-

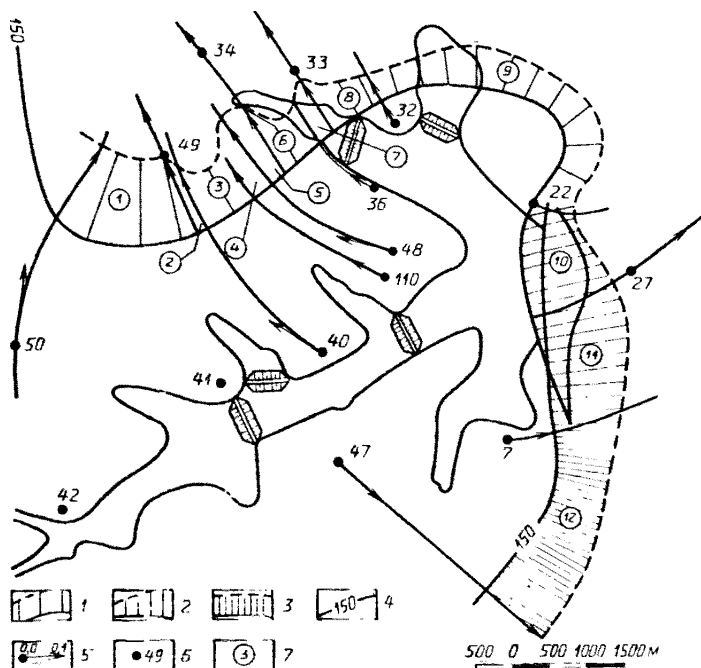


Рис. 7.2. Эшора скоростей Фильтрации в районе хвостохранилища Лебединского горно-обогатительного комбината:

1-3 - зоны фильтрации (2 - в северной части хвостохранилища ( $Q = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), 2 - на участке плотины ( $Q = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), 3 - в юго-восточной части ( $Q = 380 \text{ м}^3/\text{ч}$ )); 4 - гидроизогипсы и отметка уровня, м; 5 - вектор скорости фильтрации, м/сут; 6 - наблюдательная скважина и ее номер; 7 - номер расчетной ленты тока

хранилища Лебединского ГОКа (Губкинско-Стойленский промышленный район; см. разд. 6.1) <sup>1</sup>.

Анализ графиков изменения температуры в меловом водоносном комплексе во времени (рис. 7.1) показывает, что они подчиняются синусоидальному закону с годовым периодом колебаний и по фазе сдвинуты относительно температуры придоинного слоя воды в хвостохранилище. При этом на графиках  $T - z$  отчетливо выделяются два участка: первый - с максимальными (до  $0,5^\circ\text{C}$ ) амплитудами колебаний температуры, расположенный в верхней части обводненных меловых пород с повышенной трещиноватостью; второй, - где диапазон изменения температуры уменьшается до  $0,1^\circ\text{C}$ , что связано с ухудшением фильтрационных свойств с глубиной. Амплитуда изменения температуры в песках еще меньше. Отмеченные закономерности указывают на концентрацию фильтрационного потока из хвостохранилища в верхней трещиноватой зоне мелов. Обработка полученных термограмм позволила рассчитать средние скорости фильтрации (диапазон изменения которых от  $0,08$  до  $0,2 \text{ м/сут}$ ) по линиям тока, проходящим через наблюдательные

<sup>1</sup> Материалы Г.Н. Гензеля и Л.П. Акиньшина.

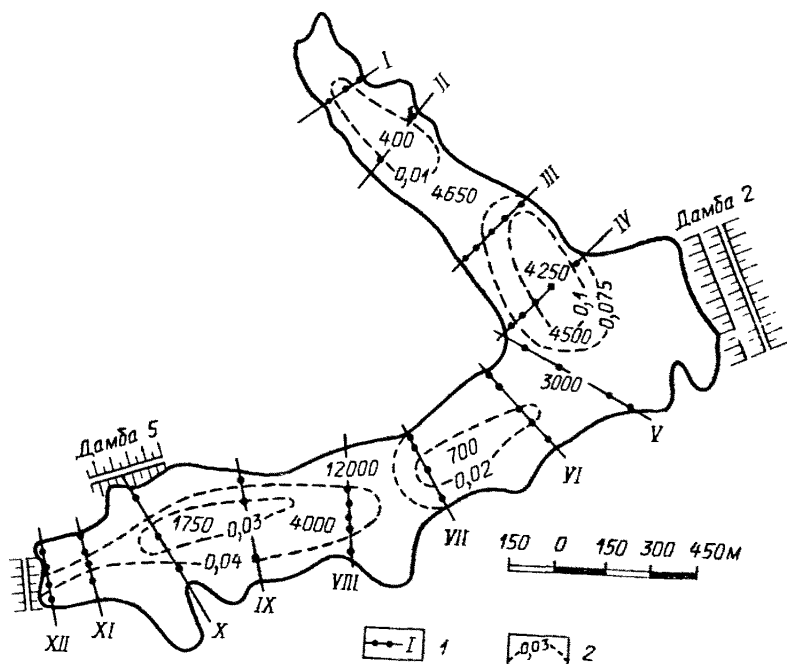


Рис. 7.3. Распределение интенсивности фильтрационных потерь (числа на плане,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ) по чаше прудка хвостохранилища Лебединского горно-обогатительного комбината (по данным термозондирования хвостов):

1 — створ и точки термозондирования донных отложений; 2 — изолиния скорости вертикальной фильтрации через донные отложения,  $\text{м}/\text{сут}$

скважины (рис. 7.2), на основе чего были определены общие фильтрационные потери, составившие около  $2000 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Термозондирование "хвостов" осуществлялось в пределах прудка технического водоснабжения с понтона по сетке с шагом  $50 \times 250 \text{ м}$  по 12 створам (рис. 7.3). В результате зондирования были получены графики изменения температуры "хвостов" с глубиной, которые после количественной обработки дали скорости фильтрации из прудка. Это послужило основой для построения карты распределения фильтрационных потерь по чаше прудка (см. рис. 7.3), в соответствии с которой суммарная интенсивность инфильтрации составляет примерно  $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$ .



## 7.2. ИНДИКАТОРНЫЕ ОПРОБОВАНИЯ ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТОВ

В период гидрогеологической разведки главным видом исследований миграционной направленности являются полевые индикаторные опробования пластов (в сочетании с лабораторными экспериментами) [8, 9]. В их основе лежат запуски в водоносные горизонты химически инертных или тепловых индикаторов. При этом изучаются миграционные параметры, отражающие емкостные и рассеивающие (дисперсионные) свойства опробуемых пластов, а также вырабатываются представления о возможных моделях массопереноса; такого рода исследования именуются опытно-миграционными опробованиями (ОМО). Индикаторные запуски могут рассматриваться в качестве полезного дополнения к геофильтрационным опробованиям, когда перед последними ставится задача повышенной детализации фильтрационных характеристик пластов; чаще всего такая необходимость возникает при исследовании процессов миграции подземных вод (см. разд. 6.4).

### 7.2.1. Основные экспериментальные схемы и режимы опробования

Индикаторные опыты проводятся, за редкими исключениями, в плановых фильтрационных потоках, создаваемых нагнетательными или откачивающими скважинами. Наиболее эффективно опробование пластов по схеме нагнетания (налива) индикатора в центральную скважину с последующим прослеживанием за его распространением в пласте по наблюдательным скважинам. Среди недостатков этой схемы (далее она именуется *опробованием при наливе*) следует отметить: а) заметное искажение радиальной структуры индикаторного возмущения в краевых его зонах естественным фильтрационным потоком; б) влияние эффектов гидрохимической инерционности наблюдательных скважин (см. разд. 7.2.3); в) довольно большой объем бурения; г) потребность в воде для опыта.

Улучшение ситуации может быть достигнуто проведением опыта по двухскважинной, *дуплетной*, схеме, когда перед запуском индикатора создается установившийся фильтрационный поток между нагнетательной (запускной) и откачивающей (улавливающей индикатор) скважинами. Обращение к дуплетной схеме способствует повышению степени площадного усреднения изучаемых свойств пласта (за счет фиксации индикатора в откачивающей скважине, на которую замыкаются существенно разобщенные линии тока), а также сокращает требуемый для опыта объем бурения. Это делает ее особенно эффективной при опробовании глубоко залегающих водоносных горизонтов.

Весьма распространенный вариант ОМО — запуск индикатора в наблюдательную скважину с его регистрацией по откачивающей скважине — *опробование при откачке*. Такие индикаторные запуски значительно повышают информативность опытно-фильтрационных опробований, однако эту схему можно рекомендовать только для ориентировочных

оценок емкостных показателей (активной пористости — трещиноватости).

Наконец, изучение параметров миграции подземных вод в субвертикальном направлении может потребовать проведения опробований по специальным схемам, обеспечивающим преимущественную фильтрацию воды вкрест напластования пород (см. разд. 7.2.6).

Для опытов с наливом и по дуплетной схеме обычно выбирают непрерывный или длительный пакетный режим запуска, что обусловлено возможностью приготовления больших объемов индикаторного раствора стабильной концентрации на земной поверхности и равномерного его распределения по активному (фильтровому) сечению запускной скважины для инъекции в наблюдаемые скважины чаще используется кратковременный — "импульсный" сигнал. В этой связи заметим, что при применении пакетного и, особенно, импульсного режимов ввода в условиях больших разбавлений индикатора (опыты с откачивающими скважинами), а также в средах с высокими рассеивающими или поглощающими свойствами (например, в трещиновато-пористых породах) надежность опыта резко падает и существенно ограничивается чувствительностью способов индикации. При использовании в качестве индикатора *тепловой метки* ("теплая" или "холодная" вода) тем более следует ориентироваться на длительное поддержание неизменной (повышенной или пониженной по сравнению с пластовой) температуры в запускной скважине.

### 7.2.2. Целесообразные условия постановки опробований

Условия проведения и эффективность ОМО наиболее резко различаются в комплексах пористых и существенно трещиноватых пород. Так как точность гидрогеологических прогнозов для пористых (песчано-глинистых) пород определяется в основном надежностью оценки емкостных параметров и детальностью фильтрационного расчленения разреза, то обычно опытно-миграционные опробования этих пород не имеют ощутимых преимуществ в сравнении с лабораторными индикаторными экспериментами. Более того, ввиду недоучета реальной фильтрационной неоднородности в пределах опробуемых интервалов, получаемые расчетные параметры сильно зависят от технических характеристик опыта; в результате полевые опробования чаще всего дают резко заниженные значения активной пористости — основного параметра, используемого в прогнозных расчетах. С большой погрешностью (в сторону занижения) определяются и дисперсионные показатели. Получаемые таким образом расчетные параметры не могут использоваться в прогнозных оценках ни непосредственно, ни в виде экстраполированных параметров. В то же время простые и дешевые лабораторные эксперименты при правильной их постановке дают более высокие и реальные значения активной пористости, близкие к величине общей пористости грунтов и, следовательно, такие эксперименты могут оказаться даже предпочтительнее полевых опытных работ.

Напротив, индикаторные опробования *трещиноватых пород* не имеют альтернативы. Дополненные лабораторными испытаниями пористых блоков они реально позволяют определять миграционные параметры, которые можно использовать в последующих прогнозах непосредственно или после их расчетной экстраполяции на прогнозные условия. Исключением могут быть крупноблочные породы, в которых большие расстояния между основными проводящими трещинами не позволяют удовлетворить при опробованиях условию сплошности среды (в интервале опробования оказываются лишь одна или несколько трещин).

В то же время теория и практика свидетельствуют о возможностях наиболее интенсивного загрязнения подземных вод именно в комплексах существенно трещиноватых пород. Следовательно, уже сейчас необходимо включать индикаторные опробования в круг обязательных видов гидрогеологических изысканий на тех объектах, где требуется обеспечить охрану от загрязнения подземных вод, приуроченных к комплексам трещиноватых пород.

Особого разговора заслуживают возможности использования трассеров для повышения информативности опытно-фильтрационных опробований: эти возможности, как будет видно из дальнейшего, могут эффективно реализовываться в любых водоносных комплексах.

Оставляя пока в стороне эту важную проблему, перейдем к более детальному анализу типовых схем ОМО с учетом ранее сделанных выводов о значимости этого вида полевых работ для различных литолого-структурных комплексов пород.

### 7.2.3. Расчетные модели для ОМО в трещиноватых породах

Для анализа результатов опытов в *гомогенных трещиноватых породах* (с пренебрежимо малой пористостью блоков) могут широко использоваться решения задач массопереноса, полученные в рамках расчетной схемы микродисперсии [7, 17]. При этом миграция трассера описывается двумя параметрами – активной трещиноватостью пород  $n$  и константой микродисперсии  $\delta$ , близкой по своему значению к характерному расстоянию между фильтрующими трещинами (или характерному размеру блоков  $m_6$ ).

Для оценки важнейшего параметра – активной трещиноватости – можно применить элементарную балансовую формулу:  $Qt_{cp} = \pi m r^2 n$ , откуда

$$n = Qt_{cp} / (\pi^2 m), \quad (7.2)$$

где  $t_{cp}$  – отвечает временной координате фронта поршневого вытеснения; для непрерывного запуска индикатора  $t_{cp}$  соотносится с временем регистрации относительной концентрации  $\bar{C} = 0,5$ ; для пакетного запуска

ка  $t_{cp}$  отвечает времени фиксации пика максимальной концентрации  $C_{max}$ ;  $r$  — расстояние между точками запуска и отбора индикатора.

Формулу (7.2) можно использовать и для интерпретации опытов с откачивающей центральной скважиной, когда пакет индикатора подается в наблюдательную скважину.

Из выражения (7.2), записанного в форме  $n = v_p t_{cp} / r$ , следует, что процесс вытеснения пластовой воды индикаторной жидкостью, нагнетаемой в скважину, может характеризоваться некоторой расчетной величиной

$$v_p = 2v(r) = Q/(\pi m r), \quad (7.3)$$

которая является эффективным эквивалентом линейной скорости  $v$  в задачах плоскопараллельной фильтрации. Сопоставление с точными решениями показывает [9], что подстановка (7.3) обычно годится и для описания гидродисперсионных процессов в радиальных потоках на базе известных решений [7, 17] фундаментальной задачи одномерной плоскопараллельной микродисперсии: в соответствующих зависимостях необходимо лишь замнить координату  $x$  на  $r$ .

Сложнее обстоит дело с интерпретацией дуплетного опробования: решение соответствующей задачи массопереноса должно учитывать, что индикатор движется по траекториям разной длины и в откачивающей скважине происходит смешение меченной жидкости с пластовой водой, не содержащей индикатора. Решение задачи для расчетной схемы микродисперсии дается в виде типовых кривых (рис. 7.4, а), которые можно использовать для графической интерпретации опытных результатов методом подбора [9]. Однако из анализа графических решений следует, что чувствительность опытных кривых к рассеивающим свойст-

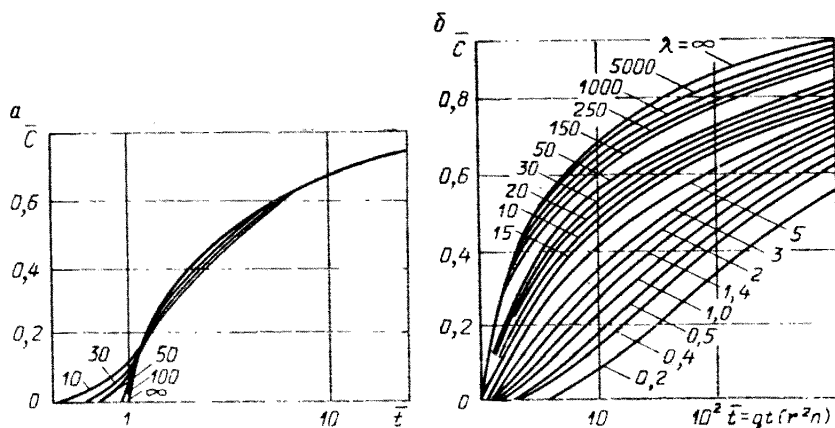


Рис. 7.4. Типовые кривые для интерпретации индикаторных опробований по дуплетной схеме в пласте однородных (а) (на кривых указаны значения параметра  $Pe = r/\delta$ ) и трещиновато-пористых (б) пород ( $\lambda = 4qn/(r\lambda_m)$ )

вам пород (параметру микродисперсии  $\delta$ ) довольно низкая и их определение недостаточно надежно. Активную трещиноватость достаточно уверенно можно рассчитать по простейшей усредняющей формуле (7.2), где время  $t_{\text{ср}}$  отвечает времени достижения значения  $\bar{C} = 0,5$ .

Для описания миграции химического индикатора при опробовании *гетерогенных трещиновато-пористых пород* используют расчетную схему неограниченной емкости, которой соответствует решение Ловерье [7]:

$$\bar{C} = \operatorname{erfc}(\xi); \quad \xi = \frac{t_0}{2n} \sqrt{\frac{\lambda_m}{t - t_0}}; \quad (7.4)$$

$$t_0 = \frac{\pi r^2 m n}{Q} < t,$$

так что обработка материалов опробований позволяет оценить два показателя — активную трещиноватость  $n$  и комплексный массообменный параметр  $\lambda_m = S_6^2 D_m n_0$  (где  $S_6$ ,  $D_m$  и  $n_0$  — соответственно удельная поверхность, коэффициент молекулярной диффузии и пористость блоков).

Решение (7.4) получено в предпосылке поршневого вытеснения индикатора по трещинам, поэтому для обоснованного его применения масштабы опробования (расстояние между скважинами) должны удовлетворять условию

$$\lambda_m r^2 m / (Qn) \geq 1, \quad (7.5)$$

гарантирующему подчиненное влияние гидродисперсии в трещинах. При экспериментах по душетной схеме повышенные скорости фильтрации требуют увеличения минимального масштаба опробования примерно в 2 раза по сравнению с величиной, разрешенной критерием (7.5).

Обработка выходной кривой для опытов с наливом индикатора осуществляется путем нанесения опытных точек на график в координатах  $\xi^2 - t$ , что позволяет линеаризовать зависимость (7.4). Отсюда нетрудно по точке пересечения прямой с осью времени  $t_0$  и углу наклона прямой к оси времени  $\varphi$  определить активную трещиноватость и комплексный параметр массообмена:

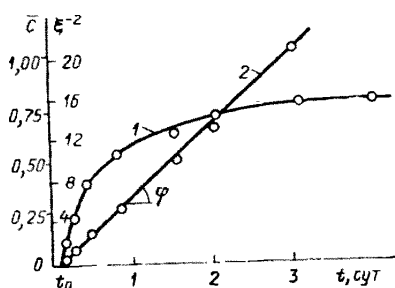
$$n = \frac{Q t_0}{\pi r^2 m}; \quad \lambda_m = S_6^2 D_m n_0 = \frac{4 Q^2}{\pi^2 m^2 r^4 \operatorname{tg} \varphi}, \quad (7.6)$$

как это показано на рис. 7.5, иллюстрирующем графоаналитический способ обработки опытных данных.

Результаты душетных опытов можно интерпретировать с помощью специальных типовых графиков (см. рис. 7.4, б).

Рис. 7.5. Пример интерпретации индикаторного опробования трещиновато-пористых пород при наливе ( $Q/m = 31 \text{ м}^2/\text{сут}$ ;  $r = 10 \text{ м}$ ):

1 — опытная кривая  $\bar{C} - t$ ; 2 — ее линеаризованное представление в координатах  $\xi^{-2} - t$ . Расчетные параметры:  $t_0 = 0,05 \text{ сут}$ ;  $\text{tg } \varphi = 6,92 \text{ сут}^{-1}$ ;  $\lambda_m = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$ ;  $n = 0,005$ .



Для ориентировочных оценок, применительно к солевому индикатору, типовой график достаточно хорошо аппроксимируется формулой

$$\bar{C} \approx 0,5 \lg \frac{2Q}{r^2 m} - \sqrt{\frac{t - t_0}{\lambda_m}}, \quad (7.7)$$

где  $t_0 = r^2 mn/Q$ , а относительная концентрация  $\bar{C}$  должна находиться в диапазоне  $0,1 - 0,5$ .

При использовании формулы (7.7) сначала по времени  $t = t_{\text{ср}}$ , отвечающему концентрации  $C = 0,5$ , определяют параметр массообмена

$$\lambda_m \approx 0,04 \left( \frac{Q}{r^2 m} \right) t_{\text{ср}}, \quad (7.8)$$

а затем по более ранним участкам выходной кривой находят активную трещиноватость  $n$ .

Нужно отметить, что непосредственная интерпретация опытных данных на основе рекомендованных решений не всегда обеспечивает удовлетворительную точность расчетных миграционных параметров, так как в этих решениях не учитывается емкость наблюдательной скважины. Пренебрежение же разбавлением индикатора в скважине, наряду с кольматацией ее прифильтровой зоны, приводит к тому, что в процессе опыта концентрация индикатора в пласте (непосредственно на внешней стенке скважины) отличается от замеряемой. Период времени, в течение которого отмечается подобное несоответствие, подчас соизмерим с длительностью самого опыта. Этот эффект получил название гидрохимической инерционности наблюдательных скважин. Его характерным показателем может служить безразмерный параметр инерционности  $\alpha = \pi d_c^2 / (4\xi n)$  (где  $d_c$  — диаметр пьезометра;  $\xi$  — показатель искажения фильтрационного потока вблизи скважины), который отражает соотношение между емкостными характеристиками скважины и опробуемой части пласта: чем ниже значение параметра  $\alpha$ , т.е. чем меньше диаметр наблюдательной скважины  $d_c$  (при минимальной степени ее кольматации  $\xi$ ) и длиннее путь  $r$  миграции индикатора в водоносном горизонте, тем точнее скважина регистрирует изменения концентрации индикатора в ходе эксперимента. Как показывают расчеты, учитывающие влияние емкости скважины [9], при опытах в чисто трещиноватых породах роль ее обычно слишком велика, чтобы эффектом гидрохимической инерционности можно было пренебречь. Объясняется это малой емкостью самих опробуемых пород. Соответственно в трещиновато-пористых породах роль данного фактора обычно заметно слабее. В общем, надежная оценка пригодности наблюдательных скважин конкретного куста для конт-

роля за движением трассера, а также определение поправок на инерционность опытной системы требуют специальных тарировочных процедур (см. разд. 7.2.5).

#### 7.2.4. Планирование опытно-миграционных опробований

Опытные характеристики – расход нагнетания или откачки, расстояния до наблюдательных скважин, максимальная концентрация трассера и его тип, продолжительность опыта и некоторые другие – подбираются таким образом, чтобы в процесса опыта воспроизводилась та или иная расчетная схема, причем в оптимальном варианте она должна непосредственно отвечать уровню (масштабу) предполагаемых прогнозных задач или позволять оценить параметры, допускающие дальнейшую расчетную экстраполяцию и масштабирование. Применимость конкретной расчетной схемы определяется вероятными значениями миграционных параметров, что предполагает этапность проведения индикаторных опробований и проверку правильности расчетной схемы на основе миграционных параметров, устанавливаемых на первых этапах опробований, а также лабораторными экспериментами и по аналогии. Подчеркнем исключительную важность тщательного планирования ОМО, без которого эти эксперименты часто оказываются практически бесполезными.

Индикаторные эксперименты целесообразно приурочивать к участкам проведения кустовых откачек, максимально учитывая полученную по ним информацию при планировании ОМО. В частности, обязательным элементом такого анализа должно стать построение сетки движения подземных вод на опытном участке и графиков площадного прослеживания пьезометрической поверхности по скважинам. Это позволяет определить степень искажения задаваемого фильтрационного возмущения при наложении на него естественного потока, а также роль плановой неоднородности и анизотропии фильтрационных свойств опробуемого пласта. Вместе с тем использование наблюдательных скважин фильтрационных кустов обычно не исключает необходимости закладки дополнительных пьезометров, так как расположение контрольных точек при опытных откачках ориентируется на иные критерии.

При опробовании неглубоких (десятки метров) водоносных горизонтов и наличии двух лучей наблюдательных скважин предпочтение должно отдаваться экспериментальной схеме с наливом индикатора в центральную скважину. Для опробования водоносных горизонтов, залегающих на относительно больших глубинах, целесообразно применение дуплетной схемы.

Расстояние между скважинами, в частности максимальное удаление между точками ввода и отбора индикатора, должно увязываться с намечаемой продолжительностью эксперимента с помощью специальных разведочных расчетов. Во всех случаях расстояния между скважинами (минимальные масштабы опробования  $r_{\min}$ ) должны удовлетворять условиям сплошности среды [7]; для трещиноватых пород

это равносильно условию, что значения  $r_{\min}/m_6$  (где  $m_6$  — размер блока) или  $r_{\min}/\delta$  имеют порядок, как минимум, первых десятков.

Выполнение аналогичного условия при выборе длины опытного интервала предполагает, что в интервале опробования скважина пересекает достаточно большое число водопроводящих трещин. В то же время недопустимо объединение одним опытным интервалом нескольких зон в разрезе пласта, заметно различающихся по своим фильтрационным параметрам. В качестве распределительных устройств следует использовать тампоны и пакеры; необходимый эффект достигается, однако, лишь при исключении случайных вертикальных перетоков по затрубному пространству.

Для того, чтобы на стадии планирования эксперимента расчетным путем оценить возможное влияние диффузионного поглощения индикатора пористыми блоками, в лаборатории определяют пористость блоков и коэффициент молекулярной диффузии в них.

Перейдем к обоснованию опытной схемы. В комплексах гомогенных трещиноватых пород опытные характеристики подбираются на основе балансовых соотношений (7.2); при этом используются замеры дебита  $Q$  и данные о степени трещиноватости пород  $n$ , полученные в процессе пробных прокачек скважин в сочетании с пакетными запусками индикатора в наблюдательные скважины фильтрационных кустов.

Гораздо более детальные миграционные расчеты требуются при планировании ОМО в гетерогенных трещиновато-пористых породах. Так, если планируется проходка специальных опытных скважин (оптимальный вариант постановки опробования), то выбор расстояний между центральной и наблюдательными скважинами  $r_{\min}$  должен обеспечить подчиненную роль гидродисперсионного рассеяния в трещинах. Гарантисей выполнения этого условия служит соблюдение критерия (7.5), который удобно переписать в виде

$$r > r_{\min} \approx [Qn/(m\lambda_m)]^{1/2}. \quad (7.9)$$

Это соотношение можно использовать и для планирования дуплетного опробования трещиновато-пористых пород; при этом, учитывая повышенные скорости фильтрации в пределах области индикаторного воздействия, минимально допустимое расстояние между скважинами "дуплета" увеличивают примерно в 2 раза.

Максимально допустимое расстояние между скважинами  $r_{\max}$  контролируется главным образом скоростью  $v_e$  и направлением естественного фильтрационного потока; его искажающим влиянием заведомо можно пренебречь при выполнении соотношения

$$v_e < 0,1v_r \quad [\text{где } v_r = Q/(2\pi r m)]$$

или

$$r < r_{\max} \approx 0,05 Q/(v_e m), \quad (7.10)$$



однако это условие может оказаться весьма жестким. При душетном опробовании предельно допустимое расстояние между скважинами может быть увеличено примерно в 2 раза.

На расстояние  $r_{\max}$  есть и другие ограничения: при слишком большом удалении скважин падает значимость массопереноса по трещинам в сравнении с молекулярно-диффузионным оттоком в блоки, что приводит к росту погрешностей при определении активной трещиноватости в средах с высокими массообменными параметрами. К тому же с удалением наблюдательных скважин резко увеличивается длительность эксперимента, которая при больших значениях  $r$  пропорциональна  $r^4$  [см. формулу Люверье (7.4)] и, конечно, растет расход индикатора.

Таким образом, в некоторых случаях опыты с химическим индикатором ограничены слишком жесткими требованиями и их постановка может вообще не гарантировать надежного конечного результата. Скорее всего, такое положение может возникнуть при опробовании трещиновато-пористой среды с низкими значениями массообменных параметров ( $\lambda_m < 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$ ), которая вместе с тем не может рассматриваться как гомогенная трещиноватая среда. В этой ситуации в проектируемой схеме опыта должно быть предусмотрено обращение к тепловому индикатору, позволяющему заметно увеличить интенсивность обмена между трещинами и блоками. Важным достоинством тепловых методов воздействия на пласт является возможность прослеживания опытного возмущения по замерам температуры воды в скважинах, полностью обсаженных неперфорированными трубами, что исключает внутрискважинные перетоки.

### 7.2.5. Предварительное опробование скважин опытно-миграционных кустов

Перед опробованиями такого рода ставится несколько задач: 1) оценка качества оборудования опытных скважин, величин и направленности внутрискважинных перетоков; 2) детализация гидрогеологического разреза и выделение зон преимущественно переноса индикатора, на основе чего производится окончательный выбор интервалов индикаторного опробования и обосновываются глубины размещения точек отбора гидрохимических проб; 3) определение направления и скорости естественного фильтрационного потока; 4) оценка показателей скин-эффекта наблюдательных скважин и параметров их гидрохимической инерционности.

Наиболее доступный метод оценки качества бурения и оборудования скважин — анализ данных их резистивиметрического и термометрического каротажа.

Так, линейный характер резистивиметрограмм (рис. 7.6, а), полученных при искусственном засолении наблюдательной скважины, свидетельствует о весьма низкой интенсивности выноса солевого раствора из ее фильтровой области, что

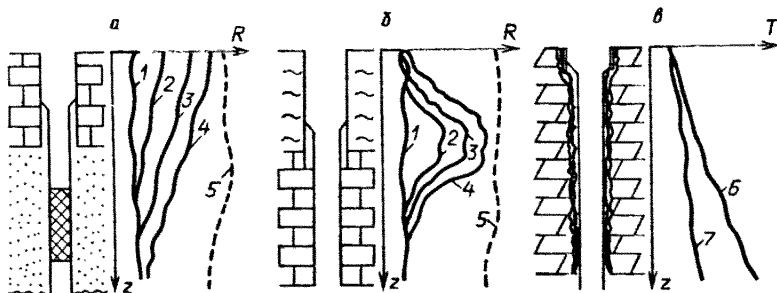


Рис. 7.6. Характер резистивиметрических (а, б) и термометрических (в) каротажных диаграмм, отражающих дефекты оборудования гидрогеологических скважин:

а – кольматация фильтра скважины; б – нарушение герметизации обсадной колонны труб; в – низкое качество затрубной цементации. 1–4 – последовательность снятия диаграмм; 5 – “фононая” кривая; 6 и 7 – графики, соответствующие ненарушенному и нарушенному (за счет перетекания сверху вниз) температурным режимам скважины

типично для скважин с высоким показателем скин-эффекта (справедливость этого вывода может быть проверена повторной резистивиметрией на этапе опытной откачки из центральной скважины). Одновременно на подобных каротажных графиках фиксируются нарушения герметизации обсадной колонны (например, в местах стыковых труб различного диаметра – см. рис. 7.6, б). Наконец, термометрические измерения позволяют эффективно оценивать качество затрубной цементации (см. рис. 7.6, в): в скважинах (находящихся в состоянии покоя) с качественной затрубной цементацией обычно отчетливо фиксируется закономерное нарастание температуры с глубиной, обусловленное градиентом естественного температурного поля; наоборот, резко сглаженные или даже аномальные термограммы характерны для скважин с активными переливами пластовых вод по затрубному пространству из одного проицаемого слоя в другой.

Если состояние скважин не вызывает сомнений, то переходят к количественной интерпретации результатов резистивиметрических исследований. Как показывает практика, их надежность резко возрастает, когда во время измерений исключаются вертикальные внутрискважинные перетоки, обусловленные перепадами напоров по глубине и навешенным (в ходе засоления изучаемого интервала скважины) градиентом плотности.

Определение скоростей фильтрации  $v_e$  по данным резистивиметрии основывается на известной функциональной зависимости [7]:

$$\ln \left( \frac{C_{oc} - C^0}{C_c - C^0} \right) = gt, \quad (7.11)$$

где  $C_{oc}$  – концентрация в скважине сразу после засоления;  $C^0$  – фоновая концентрация;  $g = 4\xi v_e / (\pi d_c)$ ;  $t$  – время, прошедшее с момента

окончания засоления до момента измерения текущей концентрации соли  $C_c$  ( $\xi$  — коэффициент искажения потока;  $d_c$  — диаметр фильтра скважины). Для независимой оценки параметра  $\xi$  используются экспресс-наливы в скважины [9].

После определения скорости  $v_e$  на опытном участке резистивиметрия наблюдательных скважин должна проводиться по возможности и при возмущенном фильтрационном режиме в процессе откачки или нагнетания, поскольку повышение скоростей фильтрации в местах расположения пьезометров значительно увеличивает чувствительность каротажа. Поскольку температура нагнетаемого индикаторного раствора нередко отличается от пластовой температуры, параллельный термокаротаж позволяет получить дополнительную информацию о степени профильной фильтрационной неоднородности пород и некоторых характерных чертах опытного процесса.

Собственно миграционной части эксперимента должна предшествовать тарировка наблюдательных скважин опытного куста для оценки состояния их прифильтровой зоны. Контролирующим параметром здесь служит показатель гидрхимической инерционности скважины  $\alpha$ . Соответствующая тарировочная резистивиметрическая процедура осуществляется в начальный период эксперимента во время нагнетания пластовой воды. Так как при этом в точках расположения пьезометров устанавливается фиксированная скорость фильтрации  $v_r = Q/(2\pi mr)$ , параметр  $\alpha$  оценивается по формуле резистивиметрии (7.11), где  $g = Q/(2\pi dr^2 mn)$ . Для предварительных оценок значение  $n$  может быть определено по аналогии, в дальнейшем его можно уточнить по результатам основного эксперимента.

## 7.2.6. Индикаторные методы повышения информативности геофильтрационных опробований

Наиболее естественно использовать индикаторные запуски для изучения профиля проницаемости водоносного пласта. Планирование и проведение таких запусков в общем идентичны индикаторным опробованиям того же вида. Интерпретацию данных осуществляют, исходя из предпосылки послойного переноса индикатора в условиях плановой фильтрации. При этом используют графики изменения концентрации трассера в откачиваемой воде. Если на таком графике достаточно четко выделяются отдельные "пики" концентрации, соответствующие времени  $t_{\max i}$  поступления меченой воды по слоям с существенно различающимися коэффициентами действительной скорости движения ( $\chi_i = k_i/n_i$ ), то для каждого  $i$ -го слоя можно записать балансовое соотношение (7.2) в виде  $Q_i^t \max_i = \pi r^2 m_i n_i$ . Предполагая далее, что послойные фильтрационные расходы  $Q_i$  жидкости распределяются пропорционально проводимостям этих слоев  $T_i$ , т.е.  $Q_i^t/Q = T_i/T$  (где  $T$  — суммарная проводимость пласта, установленная по результатам кустовой откачки с дебитом  $Q$ ), получаем основные расчетные зависимости:  $\chi_i =$

$= \pi Tr^2 / (Qt_{\max i})$  или  $T_i = \pi Tr^2 m n_i / (Qt_{\max})$ . При известных значениях активной пористости  $n_i$ , найденных, например, по результатам лабораторных определений или по аналогии, определяют постоянные коэффициенты фильтрации  $k_i$ .

Для правильной диагностики запусков по изложенной схеме необходимы представления о временной последовательности привноса трасера в скважину отдельными слоями, что реально при малом их числе (два-три) и достаточно резко различающихся действительных скоростях движения по ним.

В условиях, когда отдельные элементы опробуемой толщи характеризуются заметно различающимися химическими или температурными показателями подземных вод, большую помощь в расшифровке результатов откачек могут оказать расчетные модели миграции, учитывающие перетекание через разделяющие слои [9].

Индикаторные запуски открывают пути для непосредственной оценки показателей миграции подземных вод вкrest напластования пород — коэффициента действительной скорости вертикального массопереноса ( $\chi_z = k_z/n$ ) и коэффициента профильной фильтрационной анизотропии ( $\kappa = \sqrt{k_z/k_x}$ ).

Соответствующее гидродинамическое возмущение может достигаться различными способами. Наиболее эффективна опытная схема "вертикальный дуплет" (рис. 7.7, а), предполагающая наличие нагнетательного и откачивающего (с одинаковой интенсивностью) узлов примерно на одной вертикали; для этого могут использоваться, например, две несовершенные скважины с фильтрами, расположенными один над другим. Возможна и технически более простая экспериментальная схема, основанная на предварительной индикации (засолении) нижней части пласта с последующей откачкой из скважины, пройденной на верхнюю его зону, — схема "с подошвенным засолением" (см. рис. 7.7, б). Надежность такого рода экспериментов всецело определяется качеством изоляции опытных интервалов, которая должна исключить возможность вертикального перемещения индикаторной жидкости по затрубному пространству инъекционной скважины.

Простейшие расчетные зависимости строятся относительно времени перемещения индикаторного фронта к откачивающей скважине  $t_0$ . Для этого рассматривается очевидное кинематическое уравнение для скорости восходящего фильтрационного потока

$$n \frac{dz}{dt} = v_z = -k_z \frac{dS(z)}{dz}, \quad (7.13)$$

где  $n$  — пористость;  $z$  — вертикальная координата, совпадающая с главной (кратчайшей) линией тока (см. рис. 7.7);  $S(z)$  — понижение напора.

Для функции  $dS(z)/dz$ , найденной из решения фильтрационной задачи при граничных условиях, отвечающих той или иной схеме опробования, интегрирование выражения (7.13) дает:

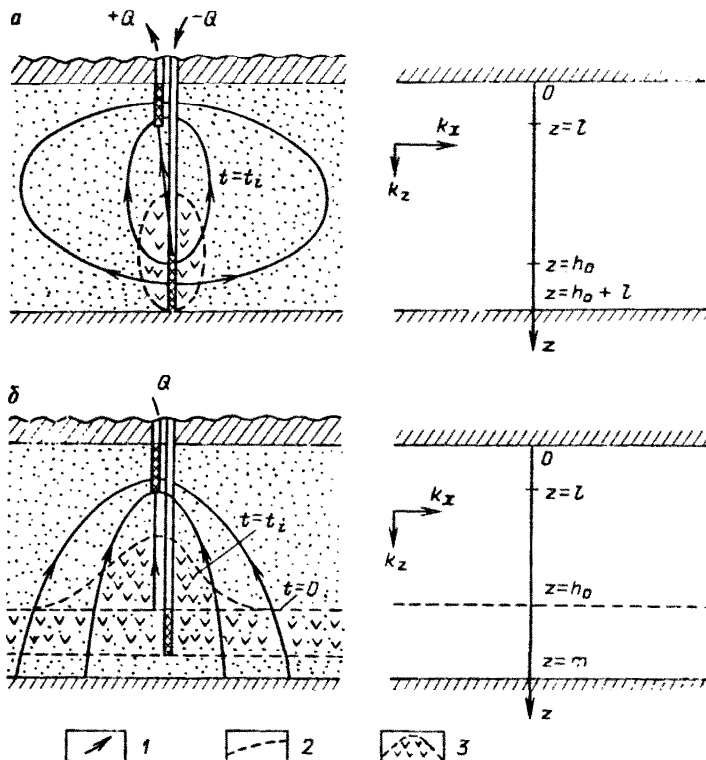


Рис. 7.7. Основные экспериментальные схемы индикаторного опробования водоносных толщ и их расчетные представления:

*a* — "вертикальный дуплет"; *б* — "с подошвенным засолением". 1 — линия тока; 2 — положение индикаторного фронта на фиксированный момент времени  $t_i$ ; 3 — область, занятая индикаторным раствором

$$\chi_z = \frac{\pi k_x h_0^3}{Q t_0} R, \quad (7.14)$$

где  $k_x$  — коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении, определяемый по результатам опытной откачки;  $h_0$  — расстояние между центрами фильтров скважин для дуплетной схемы или расстояние от кровли пласта до верхней границы засоленного слоя для схемы с подошвенным засолением (см. рис. 7.7);  $Q$  — дебит откачки (нагнетания);  $R$  — функция, вид которой определяется особенностями опытной схемы и геометрией области фильтрации. Приближенная аналитическая аппроксимация функции  $R$  для схемы с подошвенным засолением при условии  $h < (0,3 - 0,5)m$  (где  $m$  — мощность пласта) имеет вид:

$$R \approx \frac{2}{3} - (1 - \bar{l})^2 (1 + 2\bar{l}), \quad (7.15)$$

где  $\bar{l} = l/h_0$ ;  $l$  — длина фильтров скважин.

Если параллельно проводимыми в наблюдательные скважины запусками вдоль напластования оценена горизонтальная компонента коэффициента действительной скорости фильтрации  $\chi_x = k_x/n$ , то далее легко найти коэффициент профильной анизотропии пласта  $\kappa = \sqrt{\chi_z/\chi_x}$  (в предположении о примерном равенстве значений  $n$  при движении индикатора в различных направлениях).

### 7.3. ТРЕБОВАНИЯ К ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКЕ И РЕКОМЕНДУЕМЫЙ СОСТАВ РАБОТ

Рассмотренные в предшествующих разделах возможности специализированных работ изменяют традиционные требования к гидрогеологической разведке месторождений (см. разд. 5.1). К сожалению, эти изменения пока не нашли отражения в соответствующих инструкциях. Поэтому, учитывая, что совершенствование технологии разведочного процесса во многом определяет прогресс в области охраны подземных вод, имеет смысл настаивать на проведении дополнительных исследований данной направленности по специальным программам, увязанным с характерными стадиями разведки месторождений (к составлению таких программ целесообразно привлечь научно-исследовательские организации).

Следует отметить, что опытные опробования и опытно-эксплуатационные наблюдения являются взаимодополняющими видами специализированных работ. Среди них различают: 1) работы геофильтрационного характера — опробования (ОФО) и наблюдения (ОФН), имеющие целью обеспечение прогнозных моделей качества подземных вод соответствующей геофильтрационной информацией; 2) опытно-миграционные (индикаторные) исследования — опробования (ОМО) и наблюдения (ОМН), направленные на изучение параметров и процессов массопереноса; 3) промежуточное положение занимают опытно-фильтрационные опробования с использованием индикаторов (ОФИО) и гидрогеофизические исследования, проводимые для дополнительного фильтрационного расчленения разрезов и изучения фильтрационных потоков (с помощью искусственных и естественных индикаторов или наблюдений за естественными геофизическими полями).

Дифференциация состава специализированных работ применительно к конкретным ситуациям может основываться на укрупненной типизации условий, определяющих характер техногенного воздействия на водоносные горизонты (см. разд. 6.3). Наиболее важным признаком для типизации служит генезис предполагаемых источников загрязнения и литолого-генетический характер водоносных пород (табл. 7.1). Исходными для такой типизации являются материалы поисково-оценочного и предварительного этапов разведки месторождений, а также опыт освоения месторождений-аналогов, на основе которых вырабатываются представления о естественной гидрогеохимической и литологической

Таблица 7.1. Типизация условий проведения и видов специализированных опытных работ при детальной разведке и доразведке месторождений

Вид источника загрязнения	Изучаемые комплексы пород	Опытные опробования			Наблюдения (ОМН)
		ОФО	ОМО	ОФИО	
I. Поверхностные техногенные бассейны	Пористые	Наливы в шурфы и скважины (в экранящих отложениях); одиночные и кустовые поинтервальные откачки (нагнетания) в водоносных пластах	—	Индикаторные запуски при откачках (нагнетаниях) вдоль и вкост напластования пород	Поинтервальные гидродинамические и гидрохимические наблюдения по скважинам; прослеживание температурных волн в водоносных пластах; термозондирование донных отложений; прослеживание миграции минерализованных вод методами поверхностной электроразведки
	Трещиноватые и трещиновато-пористые	То же	Индикаторные опыты по радиальной или дуплетной схемам	То же	То же
II. Подземные бассейны некондиционных вод естественного генезиса	Пористые	Одиночные и кустовые поинтервальные откачки (нагнетания)	—	Запуски индикатора вкост напластования водоносных пород	Гидродинамические наблюдения за срабаткой запасов глубинных минерализованных вод; гидрохимические наблюдения за составом дренажных вод; термометрия и гидрохимическое (по поровым водам) опробование разделяющих толщ
	Трещиноватые и трещиновато-пористые	То же	—	То же; длительные откачки с прослеживанием за миграцией естественных трассеров	То же

стратификации, а также составляется фильтрационная схема месторождения.

Поэтому постановке специализированных работ должен предшествовать анализ общей гидрогеологической ситуации с учетом факторов техногенного воздействия на подземные воды. Такой анализ включает следующие операции:

выявление региональных закономерностей формирования естественных ресурсов и качества подземных вод, приуроченных к различным гидродинамическим зонам;

выделение и типизация возможных источников восполнения и загрязнения подземных вод;

региональная оценка защищенности водоносных горизонтов на основе данных о геоморфологических и ландшафтных особенностях территории, литологическом составе, мощности и фильтрационных свойствах покровных отложений и коренных пород в зоне аэрации;

обоснование общих представлений о возможной картине фильтрации к горным выработкам (исходя из условий залегания полезного ископаемого и схем его разработки) и выявление наиболее вероятных путей миграции загрязнений (в плане и в разрезе).

Перейдем теперь к рассмотрению условий постановки специализированных работ и рекомендаций по их составу. Начнем с изучения *фильтрационных параметров*. Для объектов группы I (см. табл. 7.1) полевыми методами изучают фильтрационные свойства естественных экранирующих отложений и водоносных пород, попадающих в зону влияния бассейна промышленных стоков. Основным видом опробования поверхностных экранирующих отложений являются опытные наливы в шурфы и скважины, дополняемые комплексом гидрофизических и индикаторных исследований (см. разд. 7.1.1).

Что же касается зоны насыщения, то необходимость специального подхода к ОФО для объектов всех категорий обусловлена повышенными требованиями к детальности профильного фильтрационного расчленения водоносных комплексов, включающего оценку показателей изменения проницаемости пород по глубине, профильной анизотропии фильтрационных свойств, а также параметров гидродинамической взаимосвязи водоносных горизонтов через разделяющие толщи.

Так, в случае предполагаемого загрязнения подземных вод от поверхностного бассейна (объекты группы I) для существенно неоднородных в разрезе пород первостепенное значение имеет выделение высокопроницаемых зон, служащих основными транспортерами загрязняющих компонентов. Вариациями послойных значений проницаемости определяются и масштабы макродисперсии (см. разд. 8.2). В том случае, когда ожидается развитие в пласте гравитационной дифференциации сточных растворов, необходима дополнительная оценка вертикальной проницаемости пород.

При наличии в разрезе природных некондиционных вод (объекты группы II) детальность поинтервального изучения фильтрационных свойств должна соответствовать выявленной степени гидрогеохимической неоднородности.



Необходимый уровень фильтрационного расчленения водоносных толщ достигается обычно при их поинтервальном опробовании откачками (нагнетаниями) в сочетании с индикаторными запусками (см. ниже). Вместе с тем для объектов этой группы достаточно типична ситуация, когда надежность последующих прогнозов качества дренажных вод определяется достоверностью изучения слабопроницаемых зон разреза, обычно находящихся на больших глубинах (значительно превосходящих проектные глубины отработки и дренажа месторождения) и содержащих воды с резко повышенной минерализацией. Такое сочетание условий — большие глубины и низкая проницаемость изучаемых пород — часто лежит за пределами технических возможностей традиционных модификаций ОФО, которые становятся малоэффективными или экономически нецелесообразными. Особые трудности обусловлены необходимостью оценки показателей, определяющих вертикальные фильтрационные сопротивления глубоко залегающих пород при движении в них минерализованных вод к контурам дренажа, — профильной фильтрационной анизотропии водоносных пластов или параметров перетекания для разделяющих толщ.

Важное место в опытных работах должно отводиться изучению *параметров переноса* и трансформации загрязнений, поступающих в подземные воды извне. В табл. 7.1 отражены целесообразные условия применения тех или иных видов миграционных опробований в различных генетических комплексах горных пород (см. разд. 7.2.2). Согласно данной типизации, включение ОМО в программу изысканий обязательно лишь для комплексов трещиноватых или трещиновато-пористых пород, подверженных загрязнению, причем первостепенное значение они имеют при оценках параметров миграции в плановых потоках от поверхностных бассейнов промышленных стоков.

Наряду с ОМО в практику гидрогеологической разведки должны включаться опытно-фильтрационные опробования миграционной направленности (ОФИО). В частности, фильтрационному расчленению разрезов способствуют прежде всего запуски трассеров по напластованию пород на заключительных этапах кустовых откачек. Особое место среди ОФИО занимают индикаторные опыты по специальным схемам с принудительной циркуляцией воды вкрест напластования фильтрующих отложений. Такие опыты полезны при изучении водоносных трещиноватых пород на участках возможного подтока природных некондиционных вод к горным дренажам. Здесь могут быть целесообразными также длительные откачки, сопровождаемые изучением изменения химического состава по откачиваемой воде (в идеальном случае и по "этажно" расположенным пьезометрам) с целью оценки фильтрационной и миграционной связи подземных природных бассейнов с вышележащими зонами водоносной системы. В общем случае, однако, нет смысла настаивать на их обязательном проведении, ввиду длительности подлежащих изучению процессов миграции через разделяющие пласты и другие слабопроницаемые пористые образования: по сути дела в этих условиях

информацию о гидрохимических изменениях может дать лишь длительное опытное водопонижение.

Важным дополнением к ОМО и ОФИО являются *лабораторные опыты*, которые иногда имеют и вполне самостоятельное значение. Так, лабораторными экспериментами достаточно надежно оцениваются емкостные параметры грунтов, характеризующихся преимущественной фильтрацией по порам. Кроме того, молекулярно-диффузионная пропитка глинистых образцов и пористых блоков трещиноватых пород позволяет получить значения их пористости и коэффициента молекулярной диффузии, отражающие буферные свойства этих образований. Лабораторные методы являются основными при изучении ряда физико-химических процессов, в частности сорбции и ионного обмена. В лабораторных условиях выделяют и изучают поровые воды образцов, отобранных из слабопроницаемых комплексов.

Специальные лабораторные эксперименты проводят с целью изучения экранирующих свойств глинистых грунтов и техногенных отложений (шламов) оснований гидросооружений, предназначенных для хранения промышленных стоков. При этом оценивают влияние на проницаемость пород изменчивости их минерального и гранулометрического состава, а также напряженного состояния естественных и намывных отложений, минерализации и качественного состава сточных вод.

Хорошее дополнение для всех рассмотренных выше видов полевых работ — разнообразные *геофизические методы* скважинного каротажа (прежде всего, расходометрический, резистивиметрический, термометрический): с их помощью уточняют литологическое строение водоносных толщ, проводят детальное расчленение разрезов по проницаемости, устанавливают скорость и направление фильтрационных потоков, осуществляют прямое прослеживание опытных возмущений в пласте при миграционных экспериментах, оценивают качество оборудования опытных и наблюдательных скважин. Кроме того, методами поверхностной геофизики изучают показатели, характеризующие изменчивость проницаемости водоносных массивов и минерализации вод в плане.

Рассмотренные специализированные опытные работы должны проводиться по возможности уже на стадии *детальной разведки* месторождения. В ее задачи входит также организация режимной сети наблюдательных скважин, дающей первую информацию о естественном режиме и гидрогеохимической зональности<sup>1</sup> подземных вод, причем изучение последней должно проводиться на всю мощность водовмещающих пород, включая зону замедленного водообмена (находящуюся обычно заметно глубже предполагаемого базиса дренажа месторождения). При изучении фактической гидрогеохимической обстановки должны

<sup>1</sup> Кроме того, с этой целью используется поинтервальное опробование водоносных горизонтов в процессе их вскрытия разведочными скважинами и горными выработками.

быть выявлены закономерности распределения в подземных водах элементов и соединений, входящих в состав сточных растворов, а также химических компонентов, свойственных ореолам загрязнения.

Эффективность рассматриваемых опытных работ и наблюдений, как правило, резко повышается при их проведении во время *доразведки месторождения или эксплуатационной разведки* (по этой причине объемы специализированных опытных опробований в период детальной разведки месторождений должны ограничиваться разумным минимумом). При этом ставят их гораздо более целенаправленно, поскольку исходя из конкретных проектных проработок становятся сравнительно ясными основные источники загрязнений, пути и механизмы их миграции, роль факторов техногенного изменения физических свойств пород, а следовательно, появляются более четкие критерии для обоснования целесообразных видов, предпочтительных участков и методики проведения опробований. Главное же, появляется возможность информационного обеспечения решений по рассматриваемой проблеме за счет широкого привлечения данных специализированных, опытно-миграционных, наблюдений (ОМН), проводимых в рамках концепции контролируемого загрязнения подземных вод.

Учитывая, что для изучения миграционных процессов в естественных условиях и надежного текущего контроля качества подземных вод в равной степени важны детальные оценки как гидрогеохимического, так и гидродинамического режима, ОМН должны носить комплексный характер (см. табл. 7.1). Комплексный подход достигается сочетанием традиционных замеров уровней воды с целенаправленным, детализированным гидрохимическим опробованием и прослеживанием полей загрязнения подземных вод по их гидрогеофизическим параметрам (см. разд. 7.1.3), а также со специальными экспериментами — миграционными и фильтрационными, — проводимыми по мере необходимости на ключевых участках в рамках эксплуатационной разведки месторождения.

В целом специализированные наблюдения должны рассматриваться как обязательный заключительный этап разведочного процесса, что вытекает из весьма ограниченных возможностей изысканий в свете решения проблемы охраны подземных вод. К обоснованию принципов организации такого рода наблюдений мы и переходим.

#### **7.4. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

##### **7.4.1. Основные требования к постановке и интерпретации наблюдений**

Наблюдения на участках действующего или предполагаемого загрязнения подземных вод имеют двойное назначение. С одной стороны, они выполняют контрольные функции, обеспечивая своевременное

выявление неблагоприятных тенденций в изменении качества подземных, в первую очередь дренажных, вод и давая основу для принятия оперативных решений по устранению или ограничению этих тенденций. С другой стороны, режимные наблюдения призваны обеспечить детализацию и расширение представлений о возможных механизмах миграции загрязнений в районе, о расчетных моделях миграции и их количественных характеристиках, т.е. сделать в конечном счете возможным внесение коррективов в первоначальные прогнозные оценки и расчетные обоснования необходимых водоохраных мероприятий. С этой точки зрения режимные наблюдения за качеством подземных вод в эксплуатационный период могут рассматриваться как продолжение гидрогеологической разведки и им придаются, таким образом, не только непосредственные производственные, но и изыскательские, опытные функции; поэтому о них можно говорить как о специализированных опытно-миграционных наблюдениях (ОМН). Особую важность ОМН приобретают в условиях контролируемого загрязнения подземных вод (см. разд. 6.4).

По общей направленности наблюдения за загрязнением подземных вод подразделяются на собственно гидрохимические и гидродинамические. На последние возлагаются важные функции по уточнению условий взаимосвязи поверхностных и подземных вод, а также детализации фильтрационных потоков в водоносных горизонтах, во многом определяющих особенности развития контролируемых процессов загрязнения подземных вод. Таким образом, систематическое изучение гидродинамического режима подземных вод с помощью традиционных и специальных методов, частично рассмотренных в разд. 7.1, является важной частью ОМН.

Постановка ОМН предполагает их тщательное планирование. В основе такого планирования лежит аппарат теории миграции подземных вод [7, 17], с помощью которого проводятся разведочные (прогнозные) оценки возможных процессов загрязнения (см. гл. 8). Исходными данными для подобных оценок сначала служат преимущественно результаты опытно-фильтрационных и миграционных опробований, данные лабораторного изучения образцов горных пород, а также гидрогеофизических исследований, проведенных при разведке месторождений (см. разд. 7.2). В дальнейшем эти данные, так же как сами прогнозные оценки и запланированный по ним исходный вариант наблюдательной сети, корректируются по мере накопления результатов наблюдений. Таким образом, при постановке наблюдений должен использоваться гибкий адаптационный подход, который возможен лишь при поэтапной схематизации изучаемых процессов загрязнения, последовательном уточнении их прогнозных оценок и соответственно стадийности в планировании, организации и проведении наблюдений.

Постановка, проведение и анализ результатов режимных наблюдений включают:

- 1) обоснование общей структуры сети режимных скважин, т.е.

схемы размещения точек наблюдений в плане и в разрезе, а также выбор конструкций наблюдательных скважин (постов);

2) определение последовательности бурения скважин и оборудования водопостов и назначение для них частоты опробования;

3) проведение наблюдений за уровнем загрязнения подземных и связанных с ними поверхностных вод по их физическим, химическим и микробиологическим показателям с целью выявления источников и оконтуривания площадей загрязнения, контроля интенсивности загрязнения с учетом динамики его развития во времени и по площади;

4) специальные гидрогеологические и гидрогеофизические работы (в том числе опытного характера), проводимые для независимого изучения фильтрационных потоков и условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод на участках загрязнения, а также для проверки состояния скважин режимной сети;

5) анализ и количественную интерпретацию данных наблюдений с целью оценки характера миграционных процессов и определения миграционных параметров. Результаты интерпретации используют для планирования дальнейшего развития наблюдательной сети, долгосрочных прогнозных оценок, последовательно уточняемых по мере накопления информации на различных этапах наблюдений, разработки водохранных мероприятий и оценки их эффективности.

В состав режимной сети для специализированных гидрохимических наблюдений входят наблюдательные скважины — специальные или совмещенные с пьезометрами режимной сети, предназначенными для гидродинамических наблюдений; пункты гидрохимического опробования на эксплуатируемых скважинах, в пределах горных выработок, на естественных источниках, на поверхностных водотоках и водоемах, на сбросах загрязненных вод; специальные пункты наблюдений в экранирующих отложениях — как естественных, так и техногенных.

Следует подчеркнуть, что опорная — региональная — режимная сеть скважин практически не решает задачи изучения загрязнения на локальных участках [4]: в лучшем случае информация по ней служит для характеристики естественного гидрохимического фона. Вместе с тем постановка специализированных наблюдений должна тесно увязываться с региональной режимной сетью.

Важную роль в системе режимных наблюдений играет регулярное опробование эксплуатационных — водозаборных (хозяйственно-питьевого назначения) и дренажных — скважин.

При изложении последующих более детальных рекомендаций по постановке наблюдений будем ориентироваться на предложенную ранее (см. разд. 6.3.3) типизацию условий загрязнения.

#### 7.4.2. Принципы размещения пунктов гидрохимического контроля в водоносных пластах

Режимными гидрохимическими наблюдениями охватываются как участки размещения потенциальных поверхностных источников загрязнения водоносных горизонтов, так и участки расположения дренажей или водозаборов пресных подземных вод (когда не исключена возможность загрязнения последних от подземных источников некондиционных вод). При практическом использовании излагаемых ниже рекомендаций по размещению сети для гидрохимических наблюдений необходимо предусматривать ее теснейшую увязку с системой гидродинамических наблюдений, в первую очередь путем использования одних и тех же элементов наблюдательной сети.

При постановке наблюдений вблизи *поверхностных источников загрязнения* особое внимание следует обращать на профильную фильтрационную анизотропию и наличие в разрезе резко выраженных зон преимущественного гидравлического переноса. Необходимо учитывать высокие действительные скорости фильтрации и сильные эффекты рассеяния в трещиноватых породах; наоборот, в пористых комплексах действительные скорости движения заметно ниже, рассеяние в пределах относительно однородных толщ выражено слабее, но существенную роль играют сорбционные эффекты. Соответственно размер области, охватываемой наблюдениями в трещиноватых средах, должен быть заметно больше, чем в пористых породах.

Принципы организации ОМН различаются в зависимости от ожидаемого режима рассеяния загрязняющих компонентов (см. разд. 6.3.2). Для ореолов растекания основным показателем интенсивности внутрипластового переноса служит конвекция, а явления смещения некондиционных и пластовых вод отмечаются главным образом в границах переходной зоны — вблизи фронта вытеснения. Сам процесс является резко нестационарным на всех этапах миграции, поэтому для изучения его показателей необходимо детальное временное прослеживание. При этом анализ структуры сетки движения подземных вод позволяет выделить наиболее важные ленты тока и сосредоточить на них основной объем наблюдательных скважин.

При исследовании ореолов рассеяния первостепенное значение приобретает изучение пространственных закономерностей, обусловленных широким развитием процессов смещения. Наиболее надежно контролируют такое загрязнение площадные системы наблюдательных скважин, расположенные по линиям не только вдоль, но и вкрест направления основного переноса.

Вспомогательное изучение процессов загрязнения возможно только путем наблюдений за концентрационными полями на достаточно больших удалениях от бассейна: контроль по скважинам, которые расположены вблизи источника загрязнения и быстро оказываются за фронтом

переноса, не позволяет надежно установить характер миграции в пласте, поскольку для оценки физико-химических и дисперсионных эффектов основной интерес представляют точки наблюдений в пределах переходной зоны. Отсюда можно сделать вывод о том, что требования к плотности и расположению скважин режимной сети с позиций гидродинамики (см. разд. 7.1.2) и гидрохимии существенно различаются.

Возможный характер и закономерности изменения качества подземных вод определяются также процессами, протекающими в приграничной области, через которую осуществляется взаимодействие техногенных некондиционных вод с подземным потоком. В условиях шламо- и хвостохранилищ горных предприятий приграничная область обычно приурочена к глинистым экранирующим покрытиям, на которые в процессе эксплуатации хранилища намываются технические продукты переработки и обогащения полезного ископаемого. Гидродинамические и гидрохимические условия в данной области являются особыми по ряду позиций: во-первых, это область с наиболее сильно деформированной структурой фильтрационного и миграционного потоков, где, в частности, обычно заметна вертикальная составляющая скорости фильтрации; во-вторых, на границе раздела поверхностных и подземных вод (проходящей непосредственно по контакту с донными отложениями при подпертом режиме фильтрации или в пределах зоны неполного водонасыщения при режиме свободной инфильтрации) наиболее интенсивно протекают физико-химические и биологические процессы самоочищения, которые в пределах основной части области миграции обычно не столь выражены и чаще всего имеют совершенно иную природу.

Например, при фильтрации через донные отложения хвостохранилищ и гидротвалов в ряде районов КМА теряется основная масса азотных соединений.

Принципы организации режимных наблюдений и их методическая постановка для приграничной и основной областей во многом различаются. С учетом сказанного ниже даны некоторые конкретные рекомендации по размещению пунктов гидрохимического контроля в водоносных пластах. Прежде всего намечают расположение основных наблюдательных створов: при наблюдениях за ореолами растекания скважины размещают по нескольким лучам, отходящим от бассейна-накопителя и замыкающимся на охраняемых объектах; при наблюдениях за ореолами рассеяния в дополнение к одному-двум створам, ориентированным вдоль естественного фильтрационного потока, задают два-три створа в ортогональном ему направлении.

Первоначально на каждом створе помимо пунктов наблюдения в приграничной области располагают как минимум две-три наблюдательные скважины на относительно небольшом удалении от бассейна. Дальнейшее наращивание сети наблюдательных скважин и их размещение в плане зависят от результатов наблюдений по первоочередной группе скважин. Так, если по времени прихода фронта загрязнения к

258

ближайшим скважинам удастся оценить истинную скорость переноса, то можно рассчитать расстояние между последующими скважинами: оно должно быть таким, чтобы фронт загрязнения проходил его не более чем за полтора-два года в пористых породах или за полгода-год в трещиноватых. Отсюда легко найти общее число скважин на лучах.

Далее, по мере накопления информации о контролируемом процессе и с учетом результатов гидрогеологических прогнозов для наблюдений за ореолами рассеяния задают поперечные створы скважин. В частности такие створы обязательны, если результаты наблюдений за миграцией устойчивых компонентов дают по ближайшим скважинам стационарные распределения концентрации со значениями ниже исходных, что может расцениваться как проявление интенсивного поперечного рассеяния.

Под влиянием профильной фильтрационной неоднородности и анизотропии, а также гравитационной дифференциации основное загрязнение часто развивается лишь в пределах ограниченной по мощности зоны водоносного пласта. Отсюда вытекает необходимость детального опробования фильтрующей толщи по всей ее мощности, что не увязывается с существенно менее жесткими требованиями к гидродинамическим наблюдениям по пьезометрам в условиях плановой фильтрации. В общем случае расположение фильтров наблюдательных скважин в разрезе и длину интервалов опробования устанавливают после анализа материалов гидрогеологической разведки (см. разд. 7.3), дающих основу для профильного расчленения пород по проницаемости.

С позиций оценки процессов самоочищения в придонном слое и в экранирующих отложениях целесообразно еще до заполнения бассейна установить в донной его части специальные стационарные пробоборники. Этой же цели должна служить и группа специально оборудованных режимных скважин, расположенных вблизи уреза бассейна (см. разд. 7.1).

Проиллюстрируем рассмотренные выше аспекты практическими примерами организации режимных наблюдений на типовых объектах горного производства (см. разд. 6.1).

Эффективность режимных наблюдений в Лебединском районе КМА определяется прежде всего детальностью контроля процессов профильного перераспределения загрязняющих компонентов в водоносном комплексе при их перемещении от бассейнов промышленных стоков или загрязненных естественных водоемов и водотоков. Такая детальность контроля может быть достигнута только при раздельном оборудовании и опробовании скважин на меловой и песчаный горизонты. Первоочередной объем наблюдательных скважин должен быть сконцентрирован на меловом водоносном горизонте, поскольку предвестниками начавшегося загрязнения будут малые концентрации вещества, переносимого по трещинам в меллах и намного опережающего основной фронт загрязнения. Кроме того, скважины на пески будут контролировать степень профильного разбавления стоков и одновременно давать второе предупреждение о возможном появлении загрязнения в эксплуатационных скважинах.

На калийном месторождении Предуралья созданная режимная сеть (см.



рис. 6.3) притока только для выполнения контрольных функций: скважины и несомогущиеся источники достаточно надежно фиксируют лишь самые общие характеристики загрязнения. Тем не менее, установленные закономерности процесса (см. разд. 6.1) позволяют рассчитывать на получение более полной опытной информации о его параметрах при условии дальнейшего развития режимной сети и совершенствования способов гидрохимического контроля.

В детализации прежде всего нуждаются периферийные зоны ореола, что требует увеличения плотности режимной сети. При этом, в соответствии с вытекающим, скважины следует располагать по профилям, ориентированным вкост направлении основного переноса солей. Таких профилей должно быть по крайней мере два, причем их следует размещать за зоной резкой деформации соляного потока вблизи ядра интрузии: именно в этой области можно ожидать в дальнейшем наиболее заметных изменений в гидрохимическом режиме. На каждом профиле должно находиться пять-шесть скважин. Для изучения профильной неоднородности ореола засоления рекомендуется "этажное" оборудование вновь создаваемых пунктов гидрохимического контроля, обеспечивающее возможность дифференцированного отбора проб из трех зон вдоль водоносного комплекса.

Отсутствие четко выраженного фронта переноса и достаточно плавные изменения концентрации во времени позволяют проводить отбор проб из скважин с относительно небольшой частотой: для скважин, расположенных на поперечных створах, — одно-два опробования в год, для скважин центральной группы вблизи внутренней границы распространения рассолов — три-четыре.

Особенности условий проведения наблюдений за загрязнением от *подземных бассейнов некондиционных вод* сводятся к следующему:

1) контроль за процессами загрязнения по сети режимных наблюдательных скважин существенно усложняется из-за сравнительно больших глубин и необходимости вертикального прослеживания этих процессов по секционным скважинам. Однако по окончании непродолжительной "скрытой фазы" загрязнения весьма представительные данные о нем дают непосредственно откачиваемые воды;

2) движение фронта загрязнения в мощных толщах, не содержащих водоупорных слоев, как правило, носит характер подпитывания некондиционных вод с глубины, и тогда характерные длина пути и время миграции первых порций загрязнений невелики. Дальнейшие темпы нарастания минерализации  $M$  прямо пропорциональны коэффициенту анизотропии:  $dM/dt \sim \kappa/l^{1,5}$  ( $\kappa = \sqrt{k_x/k_z}$ );

3) процесс контролируется, в первую очередь, геофилтрационными условиями, причем большое значение для него могут иметь вертикальная проницаемость пород, отделивших бассейн загрязнения вод от водозаборных выработок, и условия гидродинамического взаимодействия между последними.

Важность геофилтрационных наблюдений подчеркивается, например, опытом освоения Коршунювского железорудного месторождения (см. разд. 6.1). Наиболее надежные данные о распределении напоров по глубине (см. рис. 6.6) здесь получены для участков размещения дренажных устройств. Источником такой информации послужили замеры напоров в процессе бурения с пористо-кислотной пьезоизмерительной изоляцией разведочных гидрогеологических скважин. Полученные результаты подтверждают вывод об участии высокоминерализованных растворов в формировании состава дренажных вод. В то же время отсутствие наблюдательных скважин

на глубокие водоносные горизонты в периферийных зонах области нарушенного гидродинамического режима не позволяет оценить темпы сработки упругих запасов этих горизонтов и прямо определить интенсивность их восполнения за счет перетекания пресных вод сверху. Все это снижает надежность гидрогеохимических прогнозов (см. разд. 8.2.3), которые в этом случае базируются на усредненных балансовых оценках. Из сказанного становятся ясными требования к дальнейшему развитию сети режимных скважин на месторождении.

### 7.4.3. Особенности контроля качества подземных вод

При наблюдениях за гидрохимическим режимом подземных вод контролируются основные группы показателей их качества, рассмотренные в разд. 6.3.1. Наряду с этой общей оценкой качества подземных вод по содержанию в них соединений и компонентов, регламентируемых санитарными нормами, особое место должно отводиться изучению параметров гидрогеохимических систем, контролирующими возможные сдвиги в химическом балансе подземных вод при их загрязнении: например, кислотно-щелочной реакции природного раствора и его окислительно-восстановительного потенциала ( $pH-Eh$ ), содержания в воде органических веществ и микроорганизмов.

Немаловажное значение при ОМН имеют выявление и последующий контроль за распределением в подземной гидросфере (в водоносных и разделяющих слоях, а также в поровых водах зоны аэрации) маркирующих компонентов. К ним могут относиться любые естественные или техногенные элементы и соединения (в том числе изотопы), повышенные или, наоборот, пониженные (в сравнении с фоновыми) значения концентраций которых характерны для наблюдаемых источников загрязнения и пополнения подземных вод. Наблюдения за миграцией этих компонентов позволяют идентифицировать поверхностные и глубинные источники питания водоносных горизонтов; установить пути транзита, участки и интенсивность разгрузки подземных вод; оценить скорость движения (миграции) подземных вод и величину инфильтрационного питания через зону аэрации. Таким образом, могут быть определены масштабы возможных нарушений в гидрохимическом режиме подземных вод, в том числе еще до проявления техногенных факторов воздействия на последние. Возможно использование для этих целей и "тепловой метки" (см. разд. 7.1.3).

Гидрохимическое опробование базируется на отборе проб воды и образцов водоносных пород или на косвенных, гидрогеофизических, методах индикации. Основными источниками информации о процессе загрязнения являются химические анализы проб из скважин режимной сети, поэтому одним из наиболее ответственных моментов оказывается отбор представительных проб, состав которых не должен быть искажен активно протекающими в стволах скважин физико-химическими процессами.

Один из таких процессов — осаждение карбонатов, приводящее к деминерализации скважинных проб [8, 9]. Совместно с карбонатами, как правило, осаждаются и целый ряд микрокомпонентов, в том числе техногенного происхождения. Некоторыми авторами отмечается катализирующая роль железа обсадных труб в реакциях денитрификации: эти реакции выводят из природного раствора до 90 % ионов  $\text{NO}_3^-$ , переводя их в газообразный оксид азота. Таким образом, пробы воды из непрокачанных скважин дают ошибочные представления о направленности гидрогеохимических преобразований при техногенном загрязнении подземных вод.

Для исключения существенных погрешностей отбору проб должна обязательно предшествовать прокачка скважин. Надежными показателями необходимой интенсивности прокачки следует считать параметры, непосредственно отражающие совокупность свойств физико-химической системы: удельную электрическую проводимость,  $\text{pH}$ — $\text{Eh}$  и температуру — все они достаточно легко оцениваются в полевых условиях. Стабилизация этих параметров после откачки нескольких объемов воды из скважины свидетельствует о возможности отбора гидрохимической пробы (однако и в этом случае она должна отбираться на уровне фильтра); если же требуемый для такой стабилизации объем прокачки слишком велик<sup>1</sup>, то скважина должна рассматриваться как некондиционная.

Наиболее надежные результаты опробования достигаются при прокачке скважин погружными насосами; не исключается и желонирование скважин, однако прокачка в этом случае получается менее равномерной. Применение эрлифта приводит к "загрязнению" проб кислородом воздуха, при этом легко окисляются металлы (например, железо и марганец), нарушаются газовый режим и физико-химические равновесия, поэтому при прокачке эрлифтом часто получают непредставительные пробы.

Для оценки надежности опробования может применяться скважинная резистивиметрия: отбор проб ведется после стабилизации показаний резистивиметра по ходу прокачки. Полезным дополнением являются расходомерия и особенно резистивиметрия при искусственном засолении скважин для изучения распределения скоростей потока по стволу скважины и определения оптимальных точек отбора проб. Кроме того, для контроля можно рекомендовать оценку состояния прифилтровой зоны наблюдательных скважин режимной сети периодическими экспресс-наливами.

В скважинах, вскрывающих одновременно два или более водоносных горизонта с различными по химическому составу водами, дополнительные погрешности опробования вызываются процессами гравитационного перемешивания вод разной плотности. Интенсивность подобных процессов достаточно велика, и возникают

---

<sup>1</sup> Рост интенсивности и продолжительности прокачки в условиях неоднородного гидрохимического разреза может вызвать "подтягивание" к фильтру (сверху или снизу) вод иного состава, что искажает результаты опробования.

они уже при относительном различии в минерализации вод смежных горизонтов порядка первых десятков процентов. К такому же результату приводит действие термоконвективных токов в стволе. Поэтому поинтервальный отбор проб в подобных условиях ненадежен и такие скважины должны исключаться из опробования или оборудоваться по специальной схеме фильтрами из изолированных секций [9].

В противном случае, например, границу раздела (узкую переходную зону) между плотными промышленными стоками, фильтрующимися из поверхностных бассейнов, и пластовой водой удастся зафиксировать достаточно надежно лишь в процессе бурения, так что гидрохимическому опробованию при проходке скважин здесь должно уделяться первостепенное внимание.

В слабопроницаемых отложениях даже интенсивная прокачка скважин перед отбором пробы не всегда обеспечивает требуемое качество ее, поскольку скорость заполнения пьезометра после прокачки соизмерима со скоростью реакций, ведущих к изменению химического состава воды в скважине. Поэтому опробование слабопроницаемых пород предпочтительнее базировать на отборе образцов пород для последующих выжимок поровых вод.

Частоту отбора гидрохимических проб из скважин режимной сети следует определять с учетом возможной интенсивности развития процессов загрязнения во времени: с максимальной частотой должны опробовываться наблюдательные скважины, оборудованные фильтрами на трещиноватые породы (из ближайших к источнику загрязнения скважин пробы следует отбирать 2–3 раза в месяц, а из удаленных скважин — один раз в месяц); из скважин на песчаные толщи пробы отбирают ежеквартально. При появлении загрязняющих компонентов в подземных водах частота отбора проб должна быть заметно повышена.

Наряду с гидрохимическим опробованием для изучения загрязнения водоносных комплексов минерализованными растворами могут использоваться косвенные, геофизические, методы индикации полей загрязнения. Так, для наблюдения за процессами загрязнения вод по общей их минерализации может с успехом применяться резистивиметрический каротаж наблюдательных скважин. Однако, учитывая возможность плотностной конвекции в свободном объеме скважин, целесообразно устанавливать стационарные резистивиметрические датчики в изолированных интервалах<sup>1</sup>.

Во многих ситуациях границы ореола загрязнения подземных вод минерализованными стоками могут быть вполне надежно установлены с помощью методов поверхностной электроразведки. Наиболее эффективным и универсальным в этом плане является метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), который позволяет расчленить геолого-гидрогеологический разрез по вертикали и оценить удельное электрическое сопротивление пород, связав его с минерализацией под-

---

<sup>1</sup> При этом, конечно, надо быть уверенным во временной устойчивости характеристик электрической проводимости такого рода датчиков, что предполагает проведение специальных исследований.

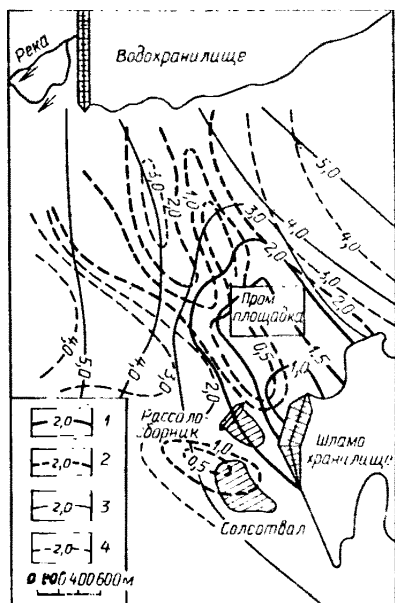


Рис. 7.8. Карта кажущихся электрических сопротивлений (в Ом · м) на участке засоления подземных вод:

1 и 2 — изолинии в пределах ореола засоления пород терригенно-карбонатной и пестроцветной толщ; 3 и 4 — то же, за пределами ореола засоления

земных вод. Постановка ВЭЗ в целом осуществляется по стандартной методике. Электроразведки наиболее эффективны на площадях с детально расчлененным геологическим разрезом и хорошо изученными гидрогеологическими условиями.

В качестве примера на рис. 7.8 приведены результаты оконтуривания с помощью ВЭЗ ореола засоления подземных вод на калийном месторождении Предуралья (см. разд. 6.1). На построенной таким образом карте кажущихся удельных сопротивлений выделяется, помимо шламохранилища, дополнительный источник загрязнения — рассолоборник.

### Контрольные вопросы

1. Чем обусловлена необходимость внедрения прямых методов определения утечек промышленных стоков из технических бассейнов? Каковы главные пути повышения эффективности опробования экранирующих отложений наливками в шурфы?
2. Почему информация, получаемая при стандартных гидродинамических наблюдениях по сети режимных скважин, оказывается недостаточной при изучении фильтрационных потоков на участках загрязнения подземных вод? Какое место в системе гидрогеологических работ занимают гидрогеофизические исследования на этих участках?
3. Какие факторы определяют выбор экспериментальной схемы при индикаторном опробовании пластов? Сравните эффективность лабораторных и полевых методов определения миграционных параметров в комплексах пористых (песчано-глинистых) и трещиноватых пород.
4. Чем обусловлен минимальный масштаб индикаторного опробования трещиноватых и трещиновато-пористых пород? Чем определяется длина интервала опробования водоносных пластов? Какие погрешности при интерпретации индикаторных опробований вносят усреднение концентрации по мощности пласта, внутри-скважинные перегородки, колыматация и емкость наблюдательной скважины?
5. Обоснуйте необходимость использования гидрогеофизических скважинных

методов при индикаторном опробовании пластов. Чем обусловлена необходимость использования индикаторов при опытно-фильтрационных работах?

6. Каковы основные функции режимных наблюдений на участках загрязнения подземных вод? Всегда ли совпадают требования к организации режимных гидродинамических и гидрохимических наблюдений? Какие факторы контролируют расположение наблюдательных скважин в плане и их фильтровых интервалов в разрезе? Как связан размер фильтрового интервала наблюдательной скважины с ее расположением в плане при наблюдениях за загрязнением подземных вод в слоистых пластах?

7. Чем обусловлены погрешности замеров концентрации компонентов-загрязнителей в наблюдательных скважинах? Какова целесообразная частота гидро-геохимического опробования режимных скважин, пробуренных на пористые и трещиноватые породы? По каким показателям может контролироваться продолжительность прокачки наблюдательных скважин перед отбором проб?

8. Какие геофизические методы могут использоваться для прослеживания полей загрязнения подземных вод?

## **ГЛАВА 8**

### **ПРОГНОЗ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

---

Прогнозные оценки изменения качества подземных вод в процессе загрязнения водоносных горизонтов промышленными отходами и при нарушении естественной гидрохимической зональности в результате глубокого водопонижения. выносятся по следующим направлениям: 1) определение путей и скоростей переноса загрязнителей в водоносных комплексах и предсказание продолжительности движения фронта загрязнения до ближайших охраняемых объектов, в частности водозаборов; 2) оценка предельных концентраций компонентов в водах, откачиваемых водозаборами и дренажными устройствами на различных стадиях разработки месторождения; 3) расчетное обоснование границ зоны санитарной охраны водозаборов и рациональных мероприятий по защите подземных вод района от загрязнения. Основу методики соответствующих аналитических расчетов и моделирования составляет теория фильтрации и массопереноса в подземных водах [7, 9, 11, 17] .

#### **8.1. ПРИНЦИПЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МИГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ**

##### **8.1.1. Обоснование расчетных схем**

Оценка текущих характеристик и долговременный прогноз качества подземных вод требуют получения достаточно ясных представлений о процессе миграции загрязнений в условиях конкретного объекта и о возможных теоретических моделях, описывающих этот процесс: опыт

показывает, что в противном случае допускаются серьезные просчеты даже в качественном понимании тенденций загрязнения, а следовательно, и в принципиальных схемах водоохраных мероприятий.

Отражение всей совокупности влияющих факторов в единой расчетной модели обычно является задачей исключительной трудности. К тому же всегда существуют неопределенность исходных представлений о процессе, а также дефицит необходимой для его всестороннего описания исходной (прежде всего, как будет видно из дальнейшего, геофильтрационной) информации. Все это вынуждает ориентироваться на заведомо упрощенные математические схемы и делает необходимыми многовариантные разведочные оценки. Упрощение идет обычно по нескольким взаимосвязанным направлениям: 1) ранжирование моделей по значимости того или иного процесса на различных этапах массопереноса; 2) понижение мерности модели посредством пространственной фрагментации массового потока; 3) использование асимптотических приближенных моделей (поршневого вытеснения, неограниченной емкости и др. [7, 9]), эффективно учитывающих в обобщенных параметрах неоднородность и гетерогенность водоносного комплекса или различные механизмы физико-химического преобразования стоков.

При построении модели целесообразно придерживаться рангового принципа, т.е. ориентировать ее каждый раз на оценку роли какого-либо одного процесса. В основе ранжирования по значимости процесса лежит анализ чувствительности. При этом должны широко использоваться данные независимых лабораторных испытаний, натурных экспериментов и, главное, материалы предшествующих наблюдений, как гидрохимических, так и геофильтрационных.

### 8.1.2. Миграционная схематизация

Решающую роль при построении расчетных моделей миграции, на основе которых, в частности, осуществляются гидрогеохимическое прогнозирование, планирование и интерпретация режимных наблюдений, играет миграционная схематизация процессов и условий массопереноса в водоносных пластах; нередко к ней остается добавить лишь простейшие расчетные оценки, вообще не привлекая сложный математический аппарат. При этом для условий, когда фильтрационная картина не зависит от переноса вещества, можно выделить два этапа: 1) фильтрационную схематизацию условий миграции; 2) схематизацию процесса массопереноса (собственно миграционная схематизация).

Следует отметить, что первый этап в общем случае отнюдь не эквивалентен геофильтрационной схематизации, проводимой при исследовании фильтрационных процессов. Так, *фильтрационное обоснование* профильной структуры моделей массопереноса должно отражать реальное распределение расхода фильтрационного потока по отдельным, часто измеряемым всего лишь несколькими метрами, профильным элемен-

там пласта, что обычно не требуется при решении фильтрационных задач и на что нынешний "стандарт" гидрогеологических изысканий не рассчитан. Сходные трудности возникают и при схематизации однородных, но анизотропных пластов. Роль анизотропии в расчетной схеме тем заметнее, чем выше степень деформации сетки движения в разрезе водоносного горизонта и соответственно чем более ощутима вертикальная составляющая скорости фильтрации. С этих позиций учет анизотропии в задачах массопереноса имеет исключительное значение в двух ситуациях: 1) при оценке миграции вод разной плотности от поверхностных бассейнов, когда в пласте протекает гравитационная дифференциация вещества; 2) при изучении субвертикальной миграции глубинных рас-  
солов от подземных бассейнов природного происхождения.

Важно, что процессы переноса вещества развиваются гораздо медленнее фильтрационных возмущений, и поэтому, как правило, допустимо рассматривать миграцию компонентов на фоне стационарного (квазистационарного) фильтрационного поля. Существует, однако, класс задач, для которых фильтрационная и миграционная части не могут анализироваться в рамках взаимно независимых моделей: это прежде всего касается условий, когда под влиянием миграционного процесса формируются поля с переменной плотностью растворов, резко меняющие исходную фильтрационную картину. Возможны также ситуации, когда в процессе миграции меняются исходные фильтрационные свойства, например, в результате химического растворения или осаждения.

При рассмотрении *собственно миграционной схематизации* целесообразно выделить два аспекта: первый касается схематизации механических процессов массопереноса, определяющих миграцию компонентов без учета участия последних в гидрогеохимических преобразованиях; второй — схематизации физико-химических процессов, определяющих направленность трансформации состава мигрирующих растворов, в частности их самоочищение от загрязняющих компонентов.

С позиций возможного упрощения основных форм *механического переноса* — конвекции и гидродисперсии — наибольший интерес представляет возможность пренебречь хотя бы одной составляющей поперечной дисперсии [7]. За редкими исключениями, это позволяет свести реальный пространственный массовый поток к двумерному или даже одномерному. К этому побуждает и то обстоятельство, что для построения трехмерных моделей обычно имеющейся информации недостаточно. Исходным здесь является анализ пространственной структуры фильтрационного течения. В частности, значимость процессов поперечной дисперсии может быть выявлена на основе оценки вклада сосредоточенной инфильтрации из поверхностного техногенного бассейна в общий расход регионального потока подземных вод: это позволяет выделить две основные формы миграционных потоков — ореолы растекания от гидродинамически активных источников загрязнения и ореолы рассеяния от гидродинамически пассивных источников (см. разд. 6.3.3).



Что же касается задач миграции солей к дренажным устройствам от подземных бассейнов некондиционных вод природного генезиса, то в них дисперсия играет подчиненную роль: здесь главным аспектом схематизации является упорядоченное представление водоносных толщ, имеющих четко выраженную геофильтрационную и гидрогеохимическую стратификацию.

Особые трудности возникают при схематизации условий субвертикальной разгрузки подземных рассолов в несовершенные горные и дренажные выработки, которые вскрывают мощные толщи пород, характеризующиеся постепенным уменьшением проницаемости с глубиной при одновременном росте минерализации (и плотности) содержащихся в них природных растворов; эти трудности усугубляются дефицитом информации о фильтрационных свойствах пород глубоких зон разреза (см. разд. 7.3).

Схематизация *физико-химических процессов* основана на эффективных приемах, позволяющих учитывать разнообразные взаимодействия в сложных многокомпонентных системах через традиционно используемые простейшие (однокомпонентные) модели. Такого рода упрощения достигаются, в первую очередь, путем представления равновесных межфазовых процессов (сорбция, ионный обмен) условными опытными изотермами, характеристики которых аддитивно включаются в расчетные (эффективные) емкостные параметры пород, например активную пористость (трещиноватость). Что же касается внутрифазовых процессов, таких как деструкция и радиоактивный распад, носящих ярко выраженный кинетический (неравновесный) характер, то они обычно не допускают такого подхода и требуют отражения в модели в явном виде.

Помимо описанных, преимущественно качественных, схематизационных приемов, важные результаты при первоначальном решении тех или иных задач миграции дают аналитические расчеты в рамках простейших одномерных моделей. Не исключается, конечно, и предварительное ("разведочное") математическое моделирование — аналоговое (в построении геофильтрационной схемы и особенно численное. Если исключить этап обоснования геофильтрационной схемы, то максимальный эффект от математического (численного) моделирования может быть получен на заключительном этапе детализации расчетной миграционной модели в процессе многовариантных ее "прогонов" для последовательной калибровки по данным наблюдений, оценки справедливости предпосылок схематизации, анализа чувствительности и т.д. Иначе говоря, численные модели нужны, скорее, не для прогноза, а для лучшего понимания процесса.

## 8.2. МЕТОДИКА МИГРАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ

При построении прогнозных моделей изменения качества подземных вод будем ориентироваться на приведенную в разд. 6.3.3 типизацию условий их загрязнения. Начнем с простейших задач, связанных с миграцией нейтральных загрязняющих веществ типа трассеров.

### 8.2.1. Прогноз миграции трассера от поверхностных источников загрязнения

Рассматриваемые здесь расчеты полезны не только для анализа переноса инертных загрязняющих компонентов, но и для простейшей оценки "с запасом" (который иногда может быть слишком большим) условий миграции реальных промышленных стоков.

Для анализа *плановых миграционных потоков* широко используются квазигомогенные модели. Они справедливы на длительных этапах массопереноса, когда оправдано усреднение концентрации вещества по мощности пласта или в пределах выделяемых квазигомогенных его элементов.

Прогнозы загрязнения подземных вод от *гидродинамически активных источников загрязнения* (расход источника доминирует над расчетным расходом естественного потока) осуществляются посредством расчетов по предварительно выделенным линиям (лентам) тока, дисперсионным перераспределением вещества между которыми пренебрегают. Для того, чтобы определить пространственное положение концентрационного фронта поршневого вытеснения в момент  $t_p$ , необходимо предварительно построить гидродинамическую сетку движения и рассчитать скорость фильтрации  $v_i$  вдоль характерных линий тока. Тогда длины пробега меченных частиц вдоль выделенной линии тока  $l_0$  находят посредством суммирования элементарных интервалов пути  $\Delta l_j = v_{i_{cp}} \Delta t_j / n$ :

$$l_0 \approx \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k v_{i_{cp}} \Delta t_j, \quad (8.1)$$

где  $n$  — пористость (трещиноватость) пласта;  $j = 1, 2, \dots, k$  ( $k$  — принятое при расчетах число интервалов пути или времени);  $v_{i_{cp}}$  — усредненное значение скорости на этих интервалах.

Наоборот, временная координата фронта поршневого вытеснения, т.е. время его продвижения вдоль траектории меченной частицы на расстояние  $L_i$ , определяется из другого кинематического выражения:

$$t_0 \approx n \sum_{j=1}^k \Delta l_j / v_{i_{cp}}. \quad (8.2)$$

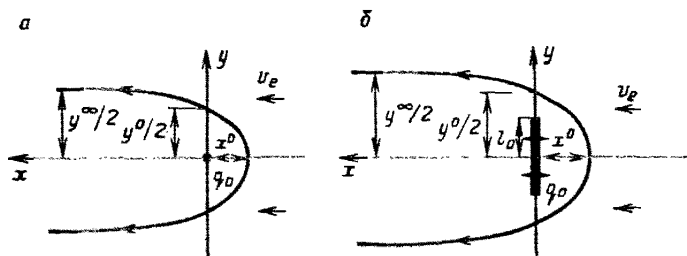


Рис. 8.1. Характерные точки нейтральной линии тока для условий гидродинамического взаимодействия бассейна с естественным потоком подземных вод.

Бассейны показаны различными источниками: а — точечным; б — линейным

Расчеты по лентам тока могут быть уточнены оценками роли продольных гидродисперсионных эффектов, приводящих к смешению сточных и пластовых вод на фронте их взаимодействия. С этой целью определяется размер зоны дисперсии из приближенного равенства [7]:

$$\Delta l_{\pi i} \approx 6,6 \sqrt{\delta T_0}, \quad (8.3)$$

где  $\delta$  — константа гидродисперсии.

Подобная детализация важна при анализе миграции в трещиноватых породах или слоистых пластах, обладающих высокими рассеивающими свойствами, когда  $\delta$  изменяется от первых метров до нескольких десятков метров.

При длительном взаимодействии техногенного и естественного фильтрационных потоков промышленные стоки полностью вытесняют пластовые воды из прилегающей к источнику загрязнения области. Поэтому здесь оправдано рассмотрение в квазистационарной постановке.

Так, в простейших случаях точечного или линейного источников (рис. 8.1) легко рассчитываются координаты некоторых характерных точек ( $x^0$ ,  $y^0$ ,  $y^\infty$ ) нейтральной линии тока, определяющие: а) максимальное продвижение трассера в направлении против естественного потока подземных вод  $x^0$ ; б) поперечный (конвективный) "разнос" компонентов (в направлении, ортогональном направлению исходного потока) вблизи границ источника  $y^0$ ; в) то же, на весьма большом от него удалении  $y^\infty$ . Значения  $x^0$ ,  $y^0$  и  $y^\infty$  следующие:

для точечного источника

$$x^0 = \frac{q_0}{2\pi v_e}, \quad y^0 = -\frac{q_0}{2v_e}, \quad y^\infty = \frac{q_0}{v_e}; \quad (8.4)$$

для линейного источника

$$x^0 = \frac{q_0}{\lg(2\pi l_0 v_e / q_0)}, \quad y^0 = 2l_0 + \frac{q_0}{2v_e}, \quad y^\infty = 2l_0 + \frac{q_0}{v_e}, \quad (8.4a)$$

где  $l_0$  — половина длины линейного источника.

Для анализа миграции от *пассивных в гидродинамическом отношении источников загрязнения* (фильтрационный расход источника пренебрежимо мал), слабо искажающих структуру естественного фильтрационного поля, используют плановые модели, учитывающие эффекты поперечного рассеяния. Характерная особенность этих моделей — наличие стационарных асимптотических решений [8], описывающих предельные масштабы загрязнения водоносных пластов.

Напомним, что пока речь шла о плановых потоках. Обращение к *профильным двумерным моделям* необходимо при существенной дифференциации трассера вдоль вертикали, вызванной следующими факторами: 1) профильной неоднородностью водоносных толщ, которая обычно определяет гетерогенный характер миграционного процесса в целом; 2) профильной двумерностью процесса, обусловленной, в частности, деформацией профильной структуры массового потока вблизи бассейна промышленных стоков, существенно несовершенного по степени вскрытия водоносного комплекса (тогда уже сам характер граничных условий определяет профильную неоднородность гидрохимического разреза); 3) поступлением вод иного состава на площади распространения водоносного пласта.

Исследование задач миграции в профильной постановке имеет первостепенное значение для комплексов стратифицированных пористых пород. Наоборот, при описании миграции в стратифицированных комплексах трещиноватых пород (без выдержанных водоупорных прослоев) эти модели не находят столь широкого применения: если даже в разрезе и наблюдается закономерное изменение проницаемости, то относительно высокие показатели поперечной (профильной) дисперсии обуславливают довольно быстрое выравнивание профилей концентрации по глубине водоносных комплексов, так что подобную фильтрационную неоднородность часто можно отразить непосредственно в расчетных (т.е. обобщенных для пласта в целом) параметрах продольной дисперсии.

Первым этапом построения расчетной модели неоднородной среды является представление изучаемых пород в виде упорядоченно-слоистой толщи. В этом случае выдержанные профильные зоны пласта могут рассматриваться в качестве базовых расчетных элементов, причем достигаемая на практике относительно невысокая детальность профильного расчленения разрезов позволяет, как правило, ограничиться моделями двух-трехслойных пластов.

В начальный период миграции (режим послойного переноса) в стратифицированной толще процесс всецело описывается пространственно-временными характеристиками  $t_0(\psi_i)$  и  $l_0(\psi_i)$  фронтов поршневого вытеснения в каждом из выделенных слоев. Для более поздних моментов, когда все большее значение приобретает обмен веществом между соседними слоями, анализ процесса удобно выполнять на основе предельных расчетных схем "неограниченной" или "сосредоточенной" емкости [8, 9]. При этом предварительные плановая и профильная фрагментации фильтрационного потока линиями тока ( $\psi_{i,j}$ ) позволяют, пренебрегая поперечной дисперсией между фрагментами, использовать одномерные варианты

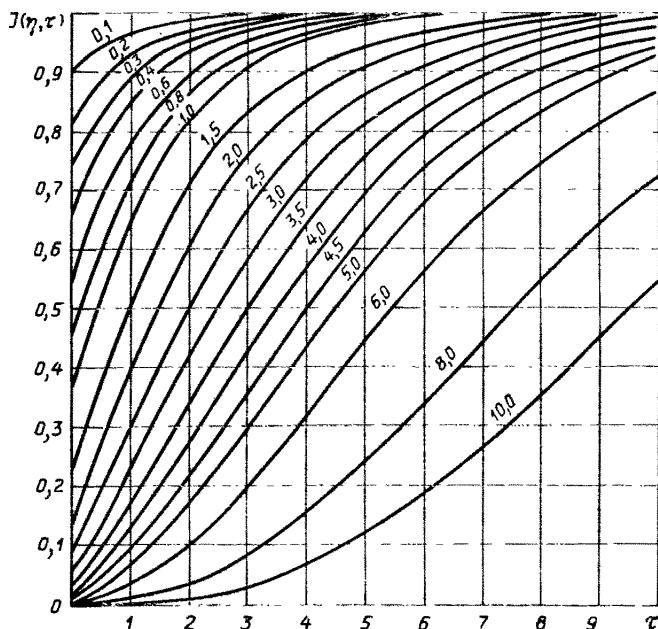


Рис. 8.2. График функции  $\bar{C} = J(\eta, \tau)$

этих схем, вводя в соответствующие аналитические зависимости характерное время  $t_0(\psi_i, p)$ , отражающее длительность движения меченной частицы вдоль  $i$ -й траектории (линии тока) в пределах  $j$ -го слоя.

На весьма длительных этапах миграции поперечная дисперсия и перетекание приводят к выравниванию профиля концентрации в пласте, что допускает рассмотрение процесса в рамках усредненных по всей мощности пласта асимптотических моделей продольной макродисперсии, оцениваемой согласно уравнению (8.3). Расчетными параметрами при этом являются суммарная емкость пород  $n^*$  (параметр, близкий к средней взвешенной по мощности пласта пористости) и коэффициент продольной макродисперсии  $D^*$ , в котором эффективно учитываются все кинетические механизмы межслоевого взаимодействия и соотношение мощностей хорошо- и слабофильтрующих слоев. Правда, надо помнить, что такого рода усредненные (квазигомогенные) схемы применимы на этапах миграции, продолжительность которых нередко превышает период эксплуатации объекта.

Анализ переноса в трещиновато-пористых породах, пласты которых обычно не имеют выдержанных по площади водоупорных профильных зон, может эффективно проводиться на основе одномерных моделей. Для оценок прогнозного характера обычно оправдано использование расчетной схемы "сосредоточенной емкости", которой отвечает решение

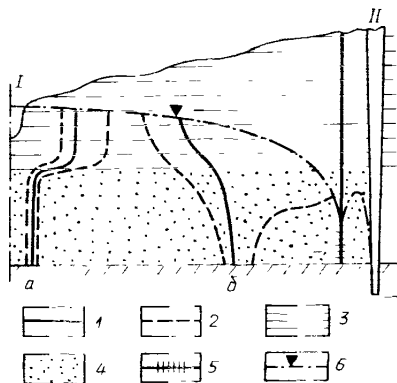
$$\bar{C} = J(\eta, \tau), \quad (8.5)$$

где  $\eta = \alpha_M n_0 t_0(\psi_i)$ ;  $\tau = \alpha_M [t - t_0(\psi_i)]$ ;  $\alpha_M = S_6^2 D_M / n_0$  — коэффициент массообмена;  $S_6$  — удельная поверхность блока;  $D_M$  и  $n_0$  — коэффициент молекулярной диффузии в блоке и его пористость.

Графики решения (8.5), справедливого при  $\tau > 0,5$ , представлены на рис. 8.2.

Рис. 8.3. Схема к прогнозной оценке загрязнения подземных вод на участке хвостохранилища I – карьер II на начальный (а) и конечный (б) моменты времени:

1 – положение фронта вытеснения с относительной концентрацией  $\bar{C} = 0,5$ ; 2 – границы дисперсионной зоны; 3 – трещиноватые мел и мергели; 4 – песчаные отложения; 5 – скважина дренажного контура карьера; 6 – уровень подземных вод



При  $\tau > \eta > 10$  процесс описывается асимптотическими зависимостями (8.1) – (8.3), в которых параметры  $n$  и  $\delta$  необходимо заменить их "гетерогенными" аналогами:

$$n^* = n_0 + n \quad \text{и} \quad \delta^* = v n_0 [\alpha_M (n + n_0)^2] \approx v / \alpha_M n_0. \quad (8.6)$$

Иллюстрацией основных из рассмотренных здесь элементов теоретического анализа могут служить прогнозные оценки качества подземных вод в Губкинско-Стойленском горнопромышленном районе (см. разд. 6.1), где расположены хвостохранилища – источники интенсивной инфильтрации техногенных вод, формирующих в меловом водоносном комплексе ореолы растекания. Напомним, что типичным здесь является двухслойный разрез (рис. 8.3): песчаный водоносный горизонт перекрыт обводненными меломергельными породами (гетерогенная среда с двойной емкостью). Специфика миграции загрязняющих компонентов (сульфаты, нитраты и хлориды, которые могут быть отнесены к трассерам) в данных условиях определяется следующим: а) показатели конвекции в обоих горизонтах (значения пористости песков и меловых блоков близки) примерно равновесны при доминирующей, однако, доле расхода фильтрационного потока в песках; б) эффекты продольной дисперсии (точнее, макродисперсии) в мелах достаточно сильны, на фоне их гидродисперсий в песках можно пренебречь; в) деформация в разрезе сетки движения, обусловленная несовершенством границ водоносного комплекса (в данном случае хвостохранилища), а также безнапорным характером потока весьма заметна; г) наблюдается значительный межпластовый обмен веществ между мелями и песками.

Анализ начальных этапов миграции может основываться на независимых оценках переноса в каждом из слоев; в дальнейшем требуется учет межслоевого взаимодействия, вызванного наличием вертикальной составляющей скорости фильтрации и поперечной профильной дисперсией. Это взаимодействие приводит, в частности, к разбавлению загрязняющих растворов, которые поступают в песчаный горизонт из меловых пород на переднем фронте дисперсии, существенно опережающем фронт поршневого вытеснения в песках. Наконец, асимптотический режим процесса может характеризоваться обобщенными параметрами одномерного переноса для двухпластовой системы в целом. Основные этапы развития процесса схематично изображены на рис. 8.3.

Выполненные миграционные построения дают расчетную основу для более направленной реализации мероприятий по санитарной охране и контролю качества подземных вод в рассматриваемом районе КМА (см. разд. 6.5.3 и 7.4.2).

## 8.2.2. Прогноз миграции стоков от поверхностных бассейнов

Соответствующие расчетные модели должны учитывать процессы физико-химического преобразования растворов и возможность гравитационной дифференциации последних в пластовых условиях.

Физико-химические процессы обычно не искажают структуры миграционных потоков, поэтому при описании миграции химически активных или неустойчивых компонентов базисными остаются расчетные зависимости, рассмотренные ранее. Если при этом оправдано обращение к асимптотическим квазигомогенным моделям, то в них легко учитываются равновесные механизмы сорбции: увеличение фактической емкости пород и на величину  $\Delta l$ , определяемую параметрами изотермы сорбции, позволяет скорректировать положение фронта поршневого вытеснения, например при сорбции, подчиняющейся линейной изотерме Генри,  $\Delta l = K_r$  (где  $K_r$  – коэффициент распределения). При описании фильтрации в гетерогенных средах дополнительная емкость  $\Delta l$  вводится в модель и для тех элементов, насыщение которых происходит диффузионным путем (слабопроницаемые глинистые слои, пористые блоки трещиноватых пород): часто именно в этих элементах сорбционные (а также ионообменные процессы) протекают наиболее интенсивно.

Следует учитывать, что участие сорбирующихся компонентов в реакциях комплексообразования увеличивает интенсивность их массопереноса. Это обусловлено переводом активных положительно заряженных форм мигрантов в электронейтральные (пассивные с точки зрения участия в межфазовых взаимодействиях) соединения. Соответствующие поправки в расчетные схемы могут быть внесены посредством уменьшения величины  $\Delta l$  в  $(1 + B_i)$  раз (где  $B_i$  – параметр, отвечающий степени "закомплексованности"  $i$ -го компонента,  $B_i \geq 0$ ).

Для описания однонаправленных процессов распада неустойчивых ингредиентов целесообразно использовать простейшие и в то же время наиболее общие (с позиций усреднения процесса) линейные модели, предполагающие прямую зависимость между интенсивностью деструкции и концентрации. В гомогенных средах, где распад компонентов происходит только в фильтрующих зонах, за фронтом переноса весьма быстро достигается стационарное концентрационное распределение  $C_\lambda$ , причем

$$C_\lambda / C = e^{-\lambda_p t_0}, \quad (8.7)$$

где  $\lambda_p$  – обобщенная константа скорости распада;  $C$  – концентрация инертного индикатора в тех же условиях, фронт которого проходит через расчетную точку в момент  $t_0$ . В частности, при расчетах по лентам тока в формуле (8.5) принимается  $t_0 = t(\psi_j)$  (см. разд. 8.4.3). Для плановых двумерных ореолов рассеяния в одномерном фильтрационном потоке  $t_0 = x/v_e$ , для сорбирующихся компонентов  $t_0 = x(n + \Delta n)/v_e$ . Из формулы (8.7) следует, что при  $t \geq t_0 > (2 - 3)\lambda^{-1}$  наблюдается практическая стабилизация значений  $C_\lambda$  по всей области, т.е. процесс выходит на стационарный режим.

Резко усложняет пространственное распределение стоков плотностная конвекция, вызывающая образование их внедряющихся "язычков"

в нижней (или верхней) части пласта. Кроме того, она обуславливает сравнительно быстрые вертикальные перемещения стоков, которые могут усиливать поперечный (вкрест напластованию) конвективно-дисперсионный перенос или, наоборот, ослаблять, а иногда и полностью "забывать" его.

В случае гидродинамически активного бассейна деформация границы раздела жидкостей разной плотности учитывается наиболее просто в условиях поршневого (профильно-двумерного) вытеснения, когда допустима плановая фрагментация потока линиями тока. При этом положение средней точки контакта может быть найдено по формуле (8.1).

Длина проекции "языка" минерализованных вод на горизонтальную плоскость в пласте постоянной мощности  $m$  определяется выражением

$$\Delta l_{\rho}(\psi_i) \approx 1,5 \sqrt{km \Delta \bar{\rho} t / n}, \quad (8.8)$$

где  $km$  — проводимость пласта;  $\Delta \bar{\rho} = (\rho_0 - \rho^0) / \rho^0$  — плотностной градиент (здесь  $\rho_0$  и  $\rho^0$  — плотность минерализованных и пластовых вод).

Прогнозные оценки часто решающим образом упрощаются после проведения цикла наблюдений за первым этапом процесса загрязнения на данном конкретном объекте (опытно-эксплуатационный подход; см. разд. 6.4). В частности, при наличии достаточно большого объема информации об ореоле рассеяния, в формировании которого участвуют различные механизмы миграции (гравитационное перераспределение вещества, поперечная дисперсия, смешение и т.п.), миграционные прогнозы могут выполняться в рамках простейших, квазиодномерных, расчетных схем. Для этого используются элементы балансовых построений, идея которых связана с введением в расчеты усредняющего параметра — коэффициента разбавления  $K_p(x)$ , который учитывает долю незагрязненных пластовых вод, участвующих в разбавлении промышленных стоков в пределах ореола загрязнения. Параметр  $K_p(x)$  оценивается по независимым гидродинамическим данным с учетом положения границ ореола в плане и в разрезе. Стабильность боковых границ ореола во времени оправдывает применение приближенной формулы:

$$C_{cp}(x) \approx K_p(x) C(x), \quad (8.9)$$

где  $C_{cp}(x)$  — средняя концентрация в пределах выделенного расчетного сечения (ортогонального основному направлению переноса), находящегося на расстоянии  $x$  от входной границы;  $K_p(x) = Q_0 / Q_x$  — эффективный коэффициент разбавления (здесь  $Q_0$  и  $Q_x$  — фильтрационные потери из бассейна и расход фильтрационного потока, приходящийся на выделенное сечение);  $C(x)$  — функция концентрации, отвечающая решению для одномерного переноса.



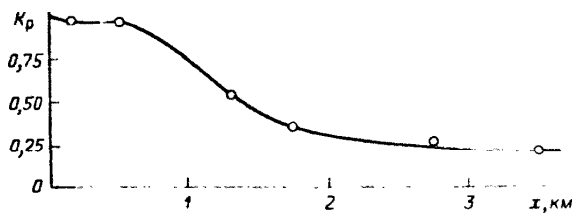


Рис. 8.4. Характер изменения коэффициента разбавления  $K_p$  в зависимости от расстояния  $x$  до расчетного сечения

Иллюстрацией возможностей такого подхода может служить анализ условий засоления подземных вод высокоминерализованными растворами на одном из месторождений калийных солей Предуралья (см. разд. 6.1). Прогноз заметно упрощается благодаря данным, полученным в ходе режимных гидрохимических наблюдений на объекте и позволившим, в частности, установить предельный контур засоления подземных вод в плане и детализировать гидрохимический разрез (см. рис. 6.3). Предварительные балансовые оценки выполнялись для сечений, расположенных за зоной резкой деформации фильтрационного потока (интрузий тяжелых рассолов). При этом принимались следующие параметры, характеризующие водоносный комплекс и условия взаимосвязи шламохранилища с подземными водами: гидравлическая проводимость  $T = km$  (где  $m = 100$  м – средняя мощность пласта) постепенно увеличивается от водораздельной области к долине реки, составляя в среднем  $300 \text{ м}^2/\text{сут}$  (этому значению соответствует  $k = 3 \text{ м}/\text{сут}$ ); тогда скорость фильтрации  $v_e$  с небольшой поправкой на колебания плотности вод равна примерно  $0,052 \text{ м}/\text{сут}$ , а среднее значение удельного расхода фильтрационного потока  $q_e = v_e m = 5,2 \text{ м}^2/\text{сут}$ ; средняя интенсивность инфильтрации из бассейна  $Q_0 = 3020 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; концентрация индикатора (ионы хлора) в шламохранилище составляет  $130 \text{ г}/\text{л}$ .

С учетом приведенных значений параметров для обозначенной области квази-одномерной фильтрации коэффициент разбавления  $K_p(x)$  меняется от  $0,35$  в сечении  $x = 1800$  м до  $0,2$  в сечении  $x = 3500$  м (рис. 8.4). Тогда расчетные значения ожидаемых предельно возможных концентраций компонента-индикатора находятся в диапазоне  $50\text{--}25 \text{ г}/\text{л}$ . Фактически наблюдаемые средние концентрации ионов хлора в той же области изменяются по направлению потока подземных вод от  $24$  до  $2 \text{ г}/\text{л}$ . Следовательно, интенсивность выноса солей через выбранные сечения (особенно вблизи зоны разгрузки подземного потока в водохранилище) заметно ниже, чем можно ожидать при установившемся режиме миграции, когда фронт переноса достигает внешних границ пласта: процесс миграции еще далек от стационарного, что может быть объяснено кинетикой молекулярно-диффузионного оттока вещества из трещин в пористые блоки.

Этот процесс изучался экспериментально: по данным индикаторных опробований, активная трещиноватость  $n$  равна  $0,002$ , а комплексный массообменный параметр  $\lambda_M = S_2^2 D_M n_0$  составляет в среднем  $(1 - 0,5) \cdot 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$ . В лабораторных экспериментах были получены следующие параметры переноса в блоках:  $n_0 = 0,1 - 0,15$ ;  $D_M \approx 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сут}$ . Несмотря на относительно низкие значения массообменных параметров взаимодействие между трещинами и пористыми блоками оказало сильное "буферное" (сдерживающее) влияние на конвекцию растворов по трещинам.

Дальнейшие прогнозные расчеты могут основываться на приближенной формуле (8.9). Решение для определения концентрации  $C(x)$  выбирают в зависимости от режима массопереноса в трещиновато-пористом пласте. Для грубых оценок можно ограничиться асимптотической расчетной схемой одномерного конвектив-

но-дисперсионного переноса, в которой отмеченные обменные процессы эффективно учитываются в феноменологических коэффициентах – суммарной емкости пласта  $n^* \approx n_0$  и коэффициенте макродисперсии  $D^* \approx \delta v_{cp} \approx v_{cp}^2 / S^2 D_m$  [см. формулу (8.6)]. Такого рода прогнозные расчеты показали, что в последующие 10–15 лет будет отмечаться дальнейший рост минерализации подземных вод, дренируемых водохранилищем, до 40 г/л.

### 8.2.3. Прогноз миграции некондиционных природных вод из подземных бассейнов

В отличие от рассмотренных выше поверхностных источников загрязнения при построении расчетных моделей для подземных источников необходимо учитывать следующее: 1) основной объем информации о характере загрязнения дают пробы из дренажных скважин, где соответствующие изменения выражены наиболее рельефно, поэтому первостепенный интерес представляют расчетные зависимости, отражающие изменение содержания веществ в откачиваемой воде; 2) эти зависимости заметно упрощаются сведением водозабора к "большому колодцу" или линейной дрене; 3) в отличие от плановых задач миграции, рассмотренных в разд. 8.2.1 и 8.2.2, надежность прогноза во многом определяется корректностью задания начальных условий, отражающих естественную гидрохимическую зональность; 4) влияние гидродисперсии обычно затухивается разновременным подтягиванием к водозабору растворов из различных гидрохимических зон (в условиях сильной профильной деформации гидродинамической сетки движения подземных вод), поэтому имеет смысл рассматривать миграцию преимущественно в рамках расчетной схемы поршневого вытеснения вдоль отдельных линий тока, выделенных в разрезе; 5) в эксплуатационных условиях максимально проявляется роль изменчивости проницаемости по глубине водоносных толщ, имеющих выраженную гидрогеохимическую стратификацию. Начальные этапы процесса контролируются плановой и профильной фильтрационной анизотропией пород.

В упрощенной постановке задача о субвертикальной миграции сводится к оценке характерного времени  $t_0$  подтягивания контура минерализованных вод к водозаборному узлу; для сосредоточенного водозабора из однородного пласта [9]<sup>1</sup>

$$t_0 = \frac{\pi n h_0^3}{\kappa^2 Q} R(\bar{m}, \bar{l}), \quad (8.10)$$

где  $h_0$  – расстояние от кровли пласта до исходного горизонтального контакта пресных и минерализованных вод;  $R(\bar{m}, \bar{l})$  – аналитическая

<sup>1</sup> В близкой постановке рассматривалась задача индикаторного опробования пласта по специальной схеме (см. разд. 7.2.6).

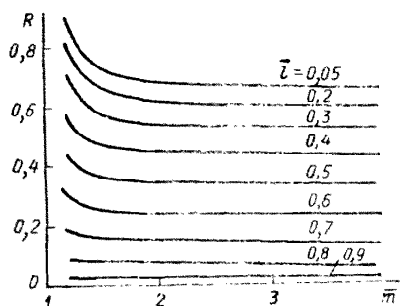


Рис. 8.5. График функции  $R(\bar{m}, \bar{l})$

функция (рис. 8.5), учитывающая ограниченность пласта по мощности и размер интервала водоотбора:  $\kappa = \sqrt{k_z/k_x}$  — коэффициент анизотропии;  $\bar{m} = m/h_0$ ;  $\bar{l} = l/h_0$  (здесь  $\bar{m}$  — мощность пласта,  $\bar{l}$  — заглубление водозаборного узла).

Такой подход можно использовать для описания первой стадии процесса, а на последующих стадиях следует применять расчетные схемы, учитывающие нарастающие концентрации в откачиваемой воде во времени. Если эти схемы пренебрегают различиями в плотности и дисперсией, то в их основе лежат квазистационарные фильтрационные решения [9].

Для "большого колодца" в однородном ограниченном (по мощности) пласте с исходной горизонтальной границей соленых (с концентрацией маркирующего компонента  $C_1$ ) и пресных (фоновая концентрация  $C_0$ ) вод, решение соответствующей задачи имеет вид:

$$C = C_0 + (C_1 - C_0) f(t, t_0);$$

$$f(t, t_0) = (1 - \bar{h}_0) [1 - (t/t_0)^\alpha]; \quad (8.11)$$

$$\alpha = 3(\bar{h}_0 - 1); \quad \bar{h}_0 = h_0/m.$$

При откачках из слоистых (профильно-неоднородных в фильтрационном отношении) пластов предельная максимальная концентрация является средней взвешенной по проводимости:

$$C_{\max} = \Sigma C_i T_i / \Sigma T_i. \quad (8.12)$$

Решение задач подтягивания рассолов в нестационарной постановке обычно требует привлечения методов моделирования; исключения составляют некоторые предельные случаи гетерогенных пластов с перетеканием, закономерности миграции в которых анализировались в работах [2, 9].

В качестве примера рассмотрим особенности прогнозирования качества дренажных вод, отбираемых в условиях хорошо выраженной гидрохимической зональности на Коршуневском железорудном месторождении (см. разд. 6.1). Анализ данных режимных наблюдений (см. рис. 6.5) показывает, что движение в субвертикальном направлении глубинных хлоридно-натриевых растворов к контуру дренажа локализуется на контакте с рудным телом, где вертикальные гидравлические градиенты и проницаемость пород имеют максимальные значения.

Анализ плановой структуры потока, тяготеющей к радиальной, позволил выделить характерную линию тока, вдоль которой был построен типовой гидрогеологический разрез (рис. 8.6). Средняя мощность (глубина)  $m$  потока по верхо-

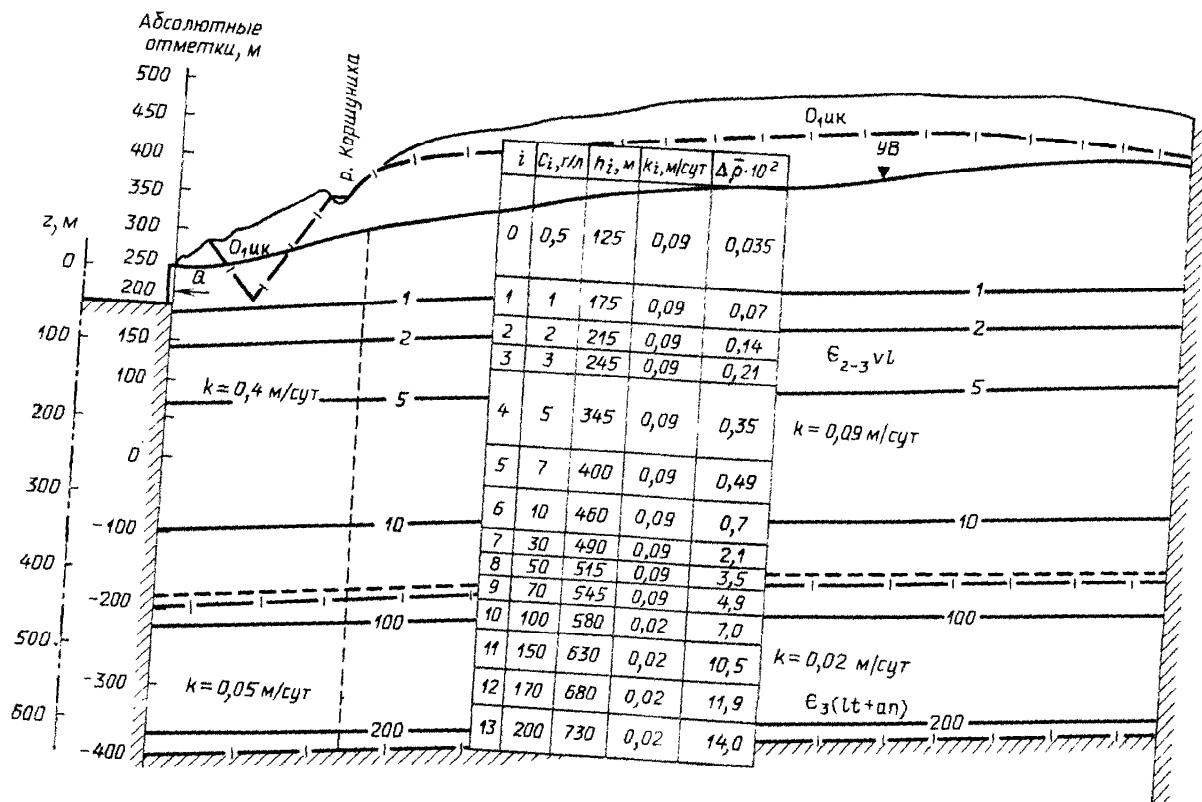


Рис. 8.6. Расчетный профиль для оценки процессов миграции минерализованных вод (Коршунское месторождение)

ленским, литвинцевским и ангарским породам равна 730 м. По данным опытно-фильтрационных опробований в разрезе выделяются две зоны, различающиеся фильтрационными свойствами: 1) верхняя (с обводненной мощностью  $m_1 = 510$  м), приуроченная к верхоленским породам, где коэффициент фильтрации слабо меняется по глубине и составляет в среднем примерно 0,09 м/сут; 2) нижняя ( $m_2 = 220$  м), представленная породами литвинцевской и ангарской свит, коэффициенты фильтрации которых изменяются от 0,01 до 0,03 м/сут. По материалам кустовых откачек из несовершенных скважин существенной профильной анизотропии фильтрационных свойств пород не отмечается. С точки зрения фильтрационной схематизации важно, что дренажные узлы являются существенно несовершенными по степени вскрытия водоносной толщи — глубина скважин от дна карьера составляет 80–120 м. Подобное несовершенство приводит к резкой профильной деформации сетки движения подземных вод в разрезе. На рис. 8.6 показано также положение в разрезе изотоний минерализации  $C_p$  отвечающее ненарушенному гидрохимическому режиму. Увеличение минерализации подземных вод с глубиной сопровождается ростом их плотности: плотностной градиент  $\Delta\rho$  изменяется сверху вниз от 0 до 0,14.

Основными этапами гидрогеологических прогнозов в данных условиях являются оценка предельной минерализации дренажных вод и выяснение закономерностей изменения минерализации во времени.

Предельную балансовую оценку выполняют, исходя из предпосылки о полном смешении подземных вод, поступающих к контуру дренажа из различных гидродинамических зон. Полагая, что массовые потоки распределяются пропорционально гидравлическим проводимостям отдельных зон, получаем, согласно выражению (8.12),  $C_{\max} = 21$  г/л; разбивка области на расчетные элементы по глубине приведена на рис. 8.6. Очевидно, что точность оценки существенно зависит от надежности геофильтрационного расчленения нижних зон разреза, содержащих рассолы. Однако на деле значимость такого рода погрешностей резко снижается, если учесть увеличение плотности подземных вод с глубиной; оно уменьшает долю соленых вод глубоких горизонтов, имеющих низкую проводимость, в обводнении карьера. Сравнивая значения гидравлического и плотностного градиентов, можно установить, что при современном положении контуров дренирования критическая глубина "подсоса"  $h_p \approx 540$  м, что соответствует нижней границе расчетного слоя  $i = 9$ . По формуле (8.12) находим  $C_{\max} = 11,2$  г/л. С точки зрения возможных погрешностей фильтрационных параметров эта оценка заметно достовернее, так как в данном варианте в формировании водопритоков участвует только верхоленский горизонт с довольно хорошо изученными фильтрационными свойствами<sup>1</sup>.

На основании сделанного допущения можно выявить и временные закономерности процесса засоления дренажных вод. При аналитических расчетах целесообразно использовать послойную суперпозицию решений вида (8.11), что позволяет учесть исходную гидрохимическую неоднородность. Поскольку миграционные процессы протекают достаточно длительное время, то эффективная емкость  $n^*$  близка к общей пористости блоков терригенно-карбонатных пород, т.е.  $n^* = n_0 = 0,09 - 0,15$ . Результаты расчетов для крайнего варианта  $n_0 = 0,15$  при суммарном водоотборе  $Q = 780$  м<sup>3</sup>/ч графически представлены на рис. 8.7. Как видно из рисунка, минерализация воды на начальных этапах (первые сотни суток) водопонижения довольно быстро достигает значений, которые в 3–4 раза превышают фоновые ( $C_0 = 0,5$  г/л). Однако при дальнейшей эксплуатации дренажной системы (с неизменным ее положением в разрезе) наблюдается в целом весьма плавное нара-

<sup>1</sup> Как ясно из приведенных прогнозных оценок, именно исходная гидрохимическая неоднородность определяет здесь глубину опытно-фильтрационных работ.

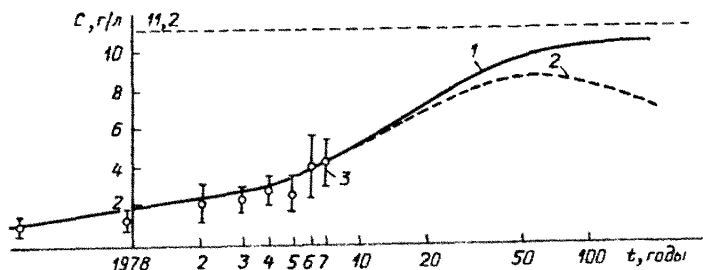


Рис. 8.7. Результаты сопоставления расчетных и фактических данных изменения минерализации дренажных вод:

1 — теоретическая кривая (без учета инфильтрационного питания); 2 — то же, с учетом площадной инфильтрации; 3 — среднее значение наблюдаемой минерализации (вертикальными отрезками показана дисперсия относительно среднего значения)

тание минерализации откачиваемых вод — процесс сильно растянут во времени. Данные гидрохимических наблюдений за последний период подтверждают прогнозную тенденцию изменения минерализации.

В целом необходимо признать, что построение расчетных моделей миграции, адекватно отражающих сложные процессы преобразования состава подземных вод и условия техногенного воздействия на природные водоносные системы, — проблема повышенной, а подчас и исключительной, сложности. Очень важно поэтому ориентироваться на комплексное использование в расчетной модели всей информации, полученной к данному моменту при бурении, лабораторных экспериментах, опытно-фильтрационных и миграционных работах в водоносных пластах. Для составления качественных гидрогеохимических прогнозов особенно важна реализация опытных функций специализированных наблюдений на участках загрязнения подземных вод (см. разд. 7.3 и 7.4). Использование данных таких наблюдений позволяет принципиально улучшить прогнозную модель при условии, конечно, что принятая на практике схема проведения наблюдений позволяет выявить главные закономерности миграционного процесса.

### Контрольные вопросы

1. Чем объясняется необходимость проведения многовариантных диапазонных оценок при прогнозах загрязнения подземных вод? С какими трудностями чаще всего сталкиваются гидрогеологи при параметрическом обосновании моделей массопереноса? Как влияет нестационарность фильтрационного процесса на точность решения задач массопереноса? Всегда ли оправдан независимый анализ фильтрационной и миграционной частей задачи гидрохимического прогнозирования качества подземных вод?

2. Оцените возможности анализа миграционных процессов в рамках трехмерных моделей. На каких предпосылках основывается схематизация плановой струк-

туры миграционного потока? Какие количественные оценки при этом выполняются?

3. Чем обусловлены повышенные требования к детальности расчленения разрезов по проницаемости при оценках качества подземных вод? Для каких миграционных задач важна оценка вертикальной проницаемости (профильной анизотропии фильтрационных свойств)? Какова чувствительность миграционных процессов к этому параметру при кратковременных и долгосрочных прогнозах загрязнения подземных вод от поверхностных источников и подземных бассейнов высокоминерализованных вод естественного генезиса?

4. При каких условиях допустим анализ миграционных процессов на основе плановых одномерных и двумерных моделей? Какие ограничения накладываются на использование миграционных расчетов по лентам тока?

5. Для каких комплексов пород особенно важна оценка гидродисперсионных эффектов? Каким образом эта оценка связана с гидродинамической активностью поверхностного источника загрязнения?

6. Какие типы гетерогенных комплексов водоносных пород вам известны? Какие погрешности вызывает пренебрежение диффузионным механизмом массообмена между трещинами и блоками при оценках загрязнения трещиноватопористых пород? Для всех ли компонентов-загрязнителей оправдан учет такого рода обменных механизмов?

7. Чем вызывается дифференциация состава промышленных стоков по вертикали при их миграции от поверхностных техногенных бассейнов? В каких расчетных параметрах и каким образом может быть учтена сорбция компонентов?

8. Какими параметрами определяется предельная (максимальная) концентрация солей в водопонижающих скважинах, дренирующих водоносные комплексы с неоднородным гидрохимическим разрезом? Почему можно пренебречь гидродисперсией при оценках миграции солей от подземных бассейнов, содержащих природные высокоминерализованные воды? Какими миграционными и фильтрационными параметрами в этих условиях контролируется скорость нарастания концентрации солей в откачиваемой воде? К каким ошибкам при прогнозах может привести пренебрежение нарастанием плотности природных растворов с глубиной?

Повторим основные положения пройденного курса.

1. Гидрогеологический фактор является одним из решающих при освоении месторождений полезных ископаемых, поскольку во многом определяет технико-экономическую эффективность добычи и переработки минерального сырья. При этом необходимо принимать во внимание два аспекта проблемы — защиту месторождений от подземных вод и охрану, рациональное использование последних как попутно извлекаемого полезного ископаемого.

2. Борьба с подземными водами обходится дорого, иногда проще и дешевле внести изменения в проект горных работ, чем добиваться эффективного дренажа для схемы, спроектированной без детального учета гидрогеологических условий отработки. Определяющее значение для эффективной защиты от подземных вод имеет способ (схема) вскрытия и отработки месторождения; это положение обуславливает необходимость тесной взаимной связи гидрогеологических исследований и работ горно-обогатительного цикла на всех этапах освоения месторождения.

3. Осушить можно любой водоносный комплекс, но вопрос в том, сколько это будет стоить. Поэтому не следует стремиться к тому, чтобы карьер обязательно был сухим. Кроме того, хотя преобладающим способом защиты горных выработок от подземных вод является дренаж (осушение) горных пород, необходимо подчеркнуть перспективность, особенно в экологическом плане, различных видов водонепроницаемых завес.

4. Рациональная схема защиты месторождения от подземных вод может быть обоснована лишь на базе комплексного гидрогеомеханического подхода, совокупно учитывающего условия геофильтрации и устойчивости пород вблизи горных выработок; последняя определяется влиянием гидростатических и гидродинамических сил, а также изменениями структуры и прочности пород под воздействием подземных вод.

Необходимо отказаться от представлений: "много воды — плохо, мало — хорошо", поскольку часто бывает наоборот — воды в карьере не видно, но именно из-за нее происходят крупнейшие оползни, или воды в забоях мало, а экскаваторы работают плохо, так как породы трудно отдают воду и вследствие этого оползают, примерзают, налипают и т.д. К тому же совсем не всегда имеет смысл откачивать воду за пределами карьеров или шахт, ведь они одновременно могут служить дренажными выработками, и притом весьма мощными. В этом смысле условия открытых горных работ намного лучше, чем подземных. По той же причине хороший водоотвод в карьере (обычно недорогой, но требую-



щий определенных организационных усилий) часто более важен, чем дорогостоящий дренаж.

5. Ввиду высокой стоимости сооружения и эксплуатации систем защиты горных выработок от подземных вод, их технико-экономическое обоснование должно базироваться на убедительных геофильтрационных расчетах, сочетающих аналитические оценки и математическое моделирование. Ключевое место в таких геофильтрационных построениях занимает надежная схематизация гидрогеологических условий освоения месторождения, включающая качественный анализ ситуации и пробные ("разведочные") расчеты. Именно в схематизации наиболее полно проявляется квалификация горного инженера-гидрогеолога.

6. Достоверность упомянутых расчетных оценок в решающей степени зависит от качества исходной гидрогеологической информации, которую дает разведка месторождения. При получении такой информации необходимо обеспечить четкую реализацию трех основных принципов разведки — непрерывности, адаптации и обратной связи. Это предполагает, в частности, широкое использование — в целях наращивания и повышения качества информации — режимных гидрогеологических наблюдений при строительстве и эксплуатации горного предприятия.

7. Подземные воды — важнейшее полезное ископаемое, потому необходима их охрана от загрязнения и истощения в горнодобывающих районах. Между тем горное производство превратилось в одну из важнейших причин деградации подземной гидросферы. Поэтому наряду с более жестким соблюдением при пректировании горных предприятий требований водоохранного законодательства необходимо обеспечивать комплексное и рациональное использование откачиваемых дренажных вод; это предполагает, в частности, и возможность их включения в цикл хозяйственно-питьевого водоснабжения района. В то же время откачка больших объемов некондиционных (кислых, высокоминерализованных и т.п.) дренажных вод выдвигает сложные проблемы их утилизации, безопасного сброса или подземного захоронения.

8. Охрана подземных вод во многом зависит от качества информации, получаемой при разведке месторождений. Это ставит гидрогеологов, проводящих разведку, перед необходимостью выполнения комплекса специализированных исследований, часто выходящих за рамки традиционных гидрогеологических работ. Вместе с тем объективная ограниченность в этом плане возможностей гидрогеологической разведки требует широкого привлечения опытно-эксплуатационного подхода, базирующегося на оперативной обработке данных мониторинга подземных вод для последующей гибкой корректировки первоначальных проектных решений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. Бочевер Ф.М., Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е. Защита подземных вод от загрязнения. — М.: Недра, 1979.
2. Гидрогеологические исследования в горном деле /В.А. Мироненко, Ю.А. Норватов, А.И. Сердюков и др. — М.: Недра, 1976.
3. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения /Под ред. В.М. Гольдберга. — М.: Недра, 1984.
4. Гольдберг В.М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. — М.: Недра, 1984.
5. Иванов И.П. Инженерно-геологические исследования в горном деле (для обоснования рационального использования и охраны недр). — Л.: Недра, 1987.
6. Комплексный метод тампонажа при строительстве шахт /Э.Я. Кипко, Ю.А. Полозов, О.Ю. Лушникова и др. — М.: Недра, 1984.
7. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. — М.: Недра, 1983.
8. Мироненко В.А., Мольский Е.В., Румынин В.Г. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах. — Л.: Недра, 1988.
9. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Опыт-но-миграционные работы в водоносных пластах. — М.: Недра, 1986.
10. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики. — М.: Недра, 1974.
11. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. — М.: Недра, 1978.
12. Норватов Ю.А. Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод. — Л.: Недра, 1988.
13. Плотников Н.И., Рогинец И.И. Гидрогеология рудных месторождений. — М.: Недра, 1987.
14. Ржевский В.В. Открытые горные работы. — М.: Недра, 1985.
15. Фрид И. Загрязнение подземных вод. — М.: Недра, 1981.
16. Фисенко Г.Л., Мироненко В.А. Дренаж карьерных полей. — М.: Недра, 1972.
17. Шестаков В.М. Динамика подземных вод. — М.: Изд-во МГУ, 1979.

Предисловие <i>В.А. Мироненко</i> . . . . .	3
Глава 1. Влияние подземных вод на условия разработки месторождений твердых полезных ископаемых <i>В.А. Мироненко, Е.В. Мольский</i> . . . . .	5
1.1. Изменение напряженно-деформированного состояния пород под влиянием подземных вод . . . . .	6
1.2. Процессы механического выноса в горных породах, обусловленные подземными водами . . . . .	15
1.3. Техногенные изменения прочности горных пород под влиянием подземных вод . . . . .	22
1.4. Влияние подземных вод на технологию горных работ . . . . .	27
Контрольные вопросы . . . . .	30
Глава 2. Дренаж карьерных полей <i>В.А. Мироненко</i> . . . . .	31
2.1. Общие представления о дренаже карьерных полей . . . . .	31
2.2. Влияние техники дренажа на выбор системы осушения . . . . .	37
2.3. Рациональные схемы дренажа карьерных полей (на примере месторождений типа А-1) . . . . .	43
2.4. Особенности дренажа и водоотвода в различных типовых условиях . . . . .	53
2.5. Примеры осушения карьерных полей . . . . .	61
Контрольные вопросы . . . . .	69
Глава 3. Гидрогеологические исследования при подземной разработке месторождений <i>В.А. Мироненко, Е.В. Мольский, Ф.П. Стрельский</i> . . . . .	70
3.1. Гидрогеологические проблемы, возникающие при подземной разработке . . . . .	70
3.2. Изучение условий выемки полезных ископаемых под водными объектами . . . . .	78
3.3. Осадка толщ горных пород в результате глубокого водопонижения и ее влияние на устойчивость горных выработок . . . . .	88
3.4. Борьба с горными ударами нагнетанием воды в угольные пласты . . . . .	91
3.5. Исследования опасности прорывов из подработанных массивов горных пород . . . . .	96
Контрольные вопросы . . . . .	100
Глава 4. Фльтрационные расчеты осушения горных выработок <i>В.А. Мироненко, Е.В. Мольский</i> . . . . .	101
4.1. Особенности фильтрационных расчетов . . . . .	101
4.2. Схематизация условий фильтрации . . . . .	110
4.3. Расчет фильтрации к горным выработкам . . . . .	116
4.4. Фльтрационный расчет дренажных скважин . . . . .	123
4.5. Примеры фильтрационных расчетов . . . . .	133
Контрольные вопросы . . . . .	148

<b>Глава 5. Требования к изучению гидрогеологических условий при разведке и разработке месторождений</b> <i>В.А. Мироненко</i> . . . . .	<b>149</b>
5.1. Основные задачи и состав гидрогеологических исследований при разведке месторождений . . . . .	150
5.2. Изучение гидрогеологического строения месторождений . . . . .	155
5.3. Изучение фильтрационных свойств пород опытными полевыми работами . . . . .	160
5.4. Гидрогеологические наблюдения при строительстве и эксплуатации горных предприятий . . . . .	168
5.5. Принципы гидрогеологической схематизации в связи с постановкой опытных работ и наблюдений . . . . .	176
Контрольные вопросы . . . . .	183
<b>Глава 6. Охрана и рациональное использование подземных вод в горнодобывающих районах</b> <i>В.А. Мироненко, В.Г. Румынин</i> . . . . .	<b>183</b>
6.1. Основные представления о процессах истощения и загрязнения подземных вод при горных разработках . . . . .	183
6.2. Истощение подземных вод и способы борьбы с ним . . . . .	193
6.3. Загрязнение подземных вод и факторы его определяющие . . . . .	201
6.4. Основные требования к проектам горных предприятий и гидрогеологической изученности месторождений в свете задач охраны подземных вод от загрязнения . . . . .	208
6.5. Специальные мероприятия по охране подземных вод от загрязнения . . . . .	213
Контрольные вопросы . . . . .	226
<b>Глава 7. Гидрогеологические исследования и наблюдения в связи с охраной подземных вод в горнодобывающих районах</b> <i>В.А. Мироненко, В.Г. Румынин</i> . . . . .	<b>227</b>
7.1. Изучение гидродинамической связи технических водоемов с подземными водами . . . . .	228
7.2. Индикаторные опробования водоносных пластов . . . . .	236
7.3. Требования к гидрогеологической разведке и рекомендуемый состав работ . . . . .	249
7.4. Специализированные наблюдения за загрязнением подземных вод . . . . .	254
Контрольные вопросы . . . . .	264
<b>Глава 8. Прогноз процессов загрязнения подземных вод</b> <i>В.А. Мироненко, В.Г. Румынин</i> . . . . .	<b>265</b>
8.1. Принципы теоретического анализа миграционных процессов . . . . .	265
8.2. Методика миграционных расчетов . . . . .	269
Контрольные вопросы . . . . .	281
Заключение . . . . .	283
Список литературы . . . . .	285

**УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ**

**Мироненко Валерий Александрович**  
**Мольский Евгений Васильевич**  
**Румынин Вячеслав Гениевич**

**ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГИДРОГЕОЛОГИЯ**

Заведующий редакцией *Л.Н. Аважанская*  
Редактор издательства *О.Л. Виноградова*  
Художественный редактор *В.В. Шутько*  
Технические редакторы *Л.Д. Агапонова, Н.С. Анашкина*  
Корректор *И.Н. Таранева*  
Операторы *Н.В. Штанько, И.А. Налейкина*

**ИБ № 7887**

---

Подписано в печать с репродуцируемого оригинал-макета 28.07.89. Т-06731.  
Формат 60 x 88<sup>1/16</sup>. Бум офсетная № 2. Гарнитура Пресс-роман. Печать  
офсетная. Усл.-печ. л. 17,64. Усл. кр.-отт. 17,64. Уч.-изд. л. 21,0. Тираж 4000 экз.  
Зак. № 6898 /2046-4. Цена 1 руб.

Набор выполнен на наборно-пишущей машине

---

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра".  
125047 Москва, пл. Белорусского вокзала, 3.

Ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО  
"Первая Образцовая типография" Государственного комитета СССР по печати  
113054, Москва, Валовая, 28