

- **ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

  - СТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ ЗАВЕРШЕНИЯ ОЭО**

    - БЕЗНАПОРНЫЕ ПОТОКИ**

      - Пример расчёта

    - ПРОЯВЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ**

      - Пример расчёта

    - СИСТЕМЫ СКВАЖИН**

  - НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ ЗАВЕРШЕНИЯ ОЭО**

    - НЕОГРАНИЧЕННЫЙ ИЗОЛИРОВАННЫЙ ПЛАСТ**

    - ПОЛУОГРАНИЧЕННЫЙ ПЛАСТ С НЕПРОНИЦАЕМОЙ ГРАНИЦЕЙ**

    - ПОЛОСООБРАЗНЫЙ ПЛАСТ**

    - ЗАМКНУТЫЙ ПЛАСТ**

- **МЕТОД ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ**

## ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ

Завершая характеристику гидродинамического метода подсчёта ЭЗ, ещё раз подчеркнём: его основная идея – величина интегрального фильтрационного сопротивления  $\Phi$  складывается из «кирпичиков» (всех значимых элементов строения области месторождения), которые по отдельности разведываются, а потом собираются в виде фильтрационной схемы для прогнозного расчёта – аналитического или с помощью моделирования.

Если же объективно трудно рассчитывать на построение достоверной фильтрационной схемы (сложные балансово-гидрогеодинамические условия, существенная фильтрационная неоднородность и поэтому слишком большая, нереальная необходимая плотность опытного опробования, отсутствие методик постановки и достоверной интерпретации опробования), то применяют (в какой-то мере – вынужденно) **ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ** метод. Это – альтернатива гидрогеодинамическому подходу.

Его основной смысл – **НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ** (то есть с помощью прямых полевых опытов) определение  $\Phi$  как «единой», эмпирической величины.

Для этого при разведке выполняются **ОЭО** – **О**пытно-**Э**ксплуатационные **О**ткочки. Их основные отличия от обычных разведочных откачек:

- достаточно большая длительность (1-3-6 месяцев и более),
- дебит по возможности ближе к проектной производительности,
- выполняются из скважин, заложенных непосредственно в точках будущего водозабора (такие скважины называют разведочно-эксплуатационными).

По сути, такое опробование можно рассматривать как имитацию работы будущего водозабора.

Техника применения:

- по результатам ОЭО для опробуемой скважины фиксируется так называемая срезка уровня (несколько устаревший синоним термина «понижение»);
- затем рассчитывается **УДЕЛЬНАЯ СРЕЗКА** («удельное понижение») как величина срезки на единицу дебита:

$$\varphi = \frac{S}{Q} \text{ [сутки/м}^2\text{]}.$$

Видно, что и по смыслу, и по размерности  $\varphi$  является фильтрационным сопротивлением – тем самым интегральным сопротивлением области влияния ОЭО.



Таким образом, проводя ОЭО, мы «одним ударом» определяем (в виде одного-единственного числа) **ВСЮ СОВОКУПНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ** в зоне влияния опробования.

Ясно, что удельная срезка  $\varphi$  в ходе ОЭО будет изменяться в соответствии с возрастанием общей величины понижения даже при относительно постоянном дебите опробования  $Q_{\text{ОЭО}} \approx \text{const}$ . Очевидно, что возможны два принципиальных варианта:

- ОЭО завершается при устойчивом *стационарном* режиме понижений; следовательно, удельная срезка достигла своего максимального значения;
- в течение всего времени ОЭО сохранялся *нестационарный* режим, то есть достигнутое к моменту завершения ОЭО значение  $\varphi$  не является предельным.

Существование одного из этих вариантов в конкретной ситуации определяется, в первую очередь, удалённостью питающих границ, способных обеспечить необходимую величину  $\Delta q_{\Gamma}$ .

### СТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ ЗАВЕРШЕНИЯ ОЭО



Пока будем говорить об одной разведочно-эксплуатационной скважине.

По данным стабилизировавшейся опытно-эксплуатационной откачки имеем уже неизменную удельную срезку:

$$\varphi_c = \frac{S_{\text{ОЭО}}}{Q_{\text{ОЭО}}}, \text{ то есть при реальной эксплуатации должно быть } \varphi_c = \frac{S_{\text{Э}}}{Q_{\text{заявл}}}.$$

В таком случае можно дать прогноз понижения в водозаборе при заявленном дебите:

$$S_{\text{Э}} = Q_{\text{заявл}} \cdot \varphi_c \rightarrow \leq S_{\text{доп}} ?$$

Однако, для этого нужно быть уверенным, что величина  $\varphi_c$ , полученная при ОЭО, не зависит от величины дебита, то есть сохранит своё значение при  $Q_{\text{заявл}}$ , который чаще всего больше опытного (хотя и необязательно). Ведь при увеличении дебита воронка углубляется и расширяется – следовательно, в неё могут попасть новые элементы опробуемой водоносной системы, которые окажут своё влияние на характер связи дебита и понижения.

В каких условиях теоретически возможно ожидать существование линейной связи  $S$  и  $Q$  (то есть неизменности удельной срезки при любых дебитах)? Это возможно, если от дебита (то есть и от понижения) не зависят *параметры* водоносной системы и характер

действия *граничных условий*. Например, для межпластового горизонта при стационарном режиме перетекания с постоянным уровнем в смежном горизонте:

$$S = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{1.12B}{r_c}, \quad \rightarrow \quad \varphi_c = \frac{S}{Q} = \frac{1}{2\pi T} \ln \frac{1.12B}{r_c}.$$

Понятно, что значения  $T$ ,  $B$ ,  $r_c$  от дебита не зависят и величина  $\varphi_c$  не должна меняться при любых дебитах.

Чтобы фактически подтвердить независимость  $\varphi_c$  от  $Q$ , опытно-эксплуатационное опробование проводится в несколько «ступеней», то есть при нескольких, достаточно различающихся значениях дебита; затем строится **ИНДИКАТОРНЫЙ ГРАФИК (КРИВАЯ ДЕБИТА)** – график в координатах  $S \div Q$ . Если удельная срезка действительно постоянна при любых дебитах, то связь  $S$  и  $Q$  линейная, график является **ПРЯМОЙ** линией (рис. 5.1), угловой коэффициент которой равен  $\varphi_c$ .

Сколько нужно ступеней для подтверждения линейности связи  $S \div Q$ ? Строго говоря, достаточно двух, так как формально существует точка  $S = 0$  при  $Q = 0$ . Однако, на практике всё же необходимо провести не менее трёх ступеней.

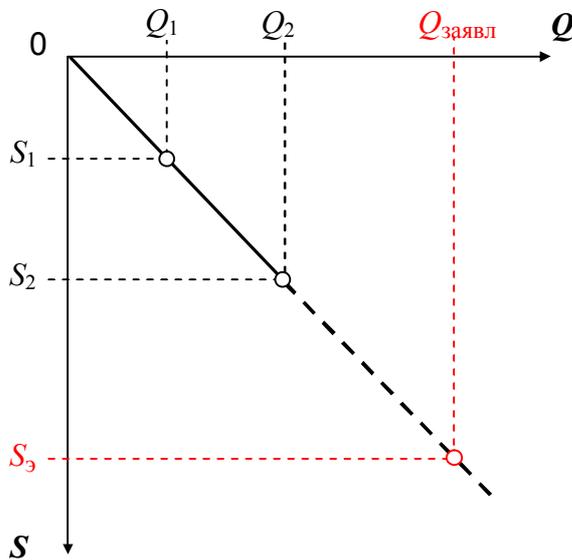


Рис. 5.1. Форма индикаторного графика при постоянной величине удельной срезки, не зависящей от дебита

Дальнейшие действия очевидны: либо рассчитываем прогнозное понижение

$$S_3 = \varphi_c \cdot Q_{заявл}, \text{ либо оцениваем максимально возможный дебит } Q_{\max} = \frac{S_{\text{доп}}}{\varphi_c}.$$

Однако, в реальных условиях связь  $S \div Q$  часто **НЕЛИНЕЙНА**, причём обычно  $\varphi_c$  возрастает с ростом  $Q$  (кривая имеет выпуклость вверх).

Генетические причины нелинейности кривой дебита разнообразны.

- **БЕЗНАПОРНЫЕ ПОТОКИ** : проводимость зависит от мощности (глубины) потока  $T = f(h)$ . Поэтому, чем больше дебит опробования, тем больше понижение – тем меньше  $h$  и, следовательно, тем меньше проводимость  $T = Kh$ .

В случае однородного по вертикали строения пласта ( $K = \text{const}$ ) возможно аналитическое описание формы кривой дебита. Связь  $S$  и  $Q$  в радиальных потоках имеет общий вид:

$$S = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r},$$

где  $r$  – радиальная координата точки наблюдения,  $R$  – «радиус питания».

Радиус питания – условный размер депрессионной воронки, необходимый для обеспечения дебита откачки (при  $r = R \rightarrow S = 0$ ). Физический смысл и аналитический вид выражения для  $R$  зависит от конкретной расчётной схемы. При стационарном режиме откачки радиус питания имеет смысл расстояния до питающей границы (реальной или виртуальной), обеспечивающей дебит откачки. Например, для вышерассмотренного описания откачки у несовершенной реки  $R = r'' = 2(L_0 + \Delta L)$ , при перетекании (в «звенигородской схеме»)  $R = 1.12B$ . В условиях отсутствия питающих границ (неограниченный изолированный пласт) при нестационарном режиме  $R^2 = 2.25at$ , то есть  $R = 1.5\sqrt{at}$ .

В действующей скважине (с радиусом водоприёмной части  $r_c$ ):

$$S_c = H_0 - H_c = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r_c},$$

где  $H_0$ ,  $H_c$  – статический и динамический уровень в скважине соответственно.

Для перехода к условиям безнапорного потока (рис. 5.2) следует заменить  $T \rightarrow K$ ,  $H \rightarrow \frac{h^2}{2}$ :

$$\frac{h_0^2}{2} - \frac{h_c^2}{2} = \frac{Q}{2\pi K} \ln \frac{R}{r_c} \rightarrow (h_0 - h_c)(h_0 + h_c) = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{R}{r_c}.$$

Так как  $h_c = h_0 - S_c$ , то

$$S_c(2h_0 - S_c) = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{R}{r_c}, \rightarrow Q = \frac{\pi K S_c (2h_0 - S_c)}{\ln \frac{R}{r_c}},$$

или, раскрывая скобки в числителе:



$$Q = \frac{2\pi K h_0}{\ln \frac{R}{r_c}} S_c - \frac{\pi K}{\ln \frac{R}{r_c}} S_c^2 = m S_c - n S_c^2. \quad (5.1)$$

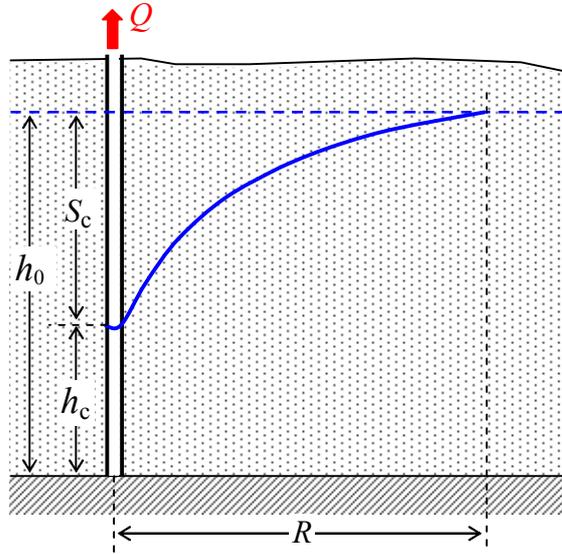


Рис. 5.2. К расчёту удельной срезки в безнапорном потоке

Это уравнение параболы в координатах  $S-Q$  (рис. 5.3) с вершиной в точке с координатами:

$$S_0 = -\frac{m}{2n} = h_0, \quad Q_0 = -\frac{m^2}{4n} = n h_0^2.$$

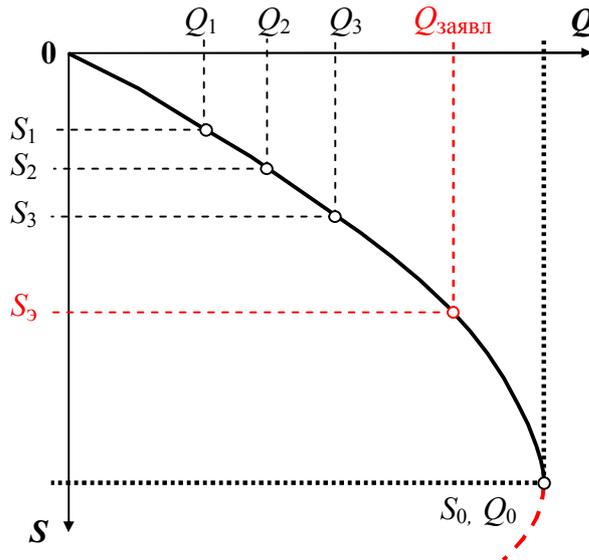


Рис. 5.3. Параболическая форма кривой дебита в безнапорных потоках

Для использования такой кривой в целях прогноза (определение ожидаемого  $S_э$  при расчётном эксплуатационном дебите  $Q_{заявл}$ ) придётся её экстраполировать, для чего нужно определить её **КОЭФФИЦИЕНТЫ**. Это можно сделать путём обычного *регрессионного анализа*, но для этого нужно бы иметь побольше экспериментальных точек (ступеней опробования), что мало реально в практике разведочных работ, так как дорого и хлопотно.

Другой путь: применим к уравнению (5.1) линейную анаморфозу в виде

$$\frac{Q}{S_c} = m - nS_c. \quad (5.2)$$

Что такое  $\frac{Q}{S_c}$ ? Это удельный дебит  $q$  – величина, обратная удельной срезке.

Следовательно, если в координатах  $q \div S_c$  все ступени опробования образуют линейный график (рис. 5.4), то можно утверждать, что причиной нелинейности кривой дебита является именно уменьшение проводимости при понижении уровня безнапорного потока. Это необходимый и важнейший диагностический признак!

Сколько нужно ступеней дебита, чтобы подтвердить линейность этого графика? Три, так как есть неизвестный свободный член. Проведя минимум три ступени, получаем возможность определить на графике коэффициенты  $m$  и  $n$ . После этого для прогноза понижения при заявленном дебите решаем квадратное уравнение относительно  $S_э$ :

$$-nS_э^2 + mS_э - Q_{заявл} = 0,$$

и сравниваем полученный результат с допустимым понижением.

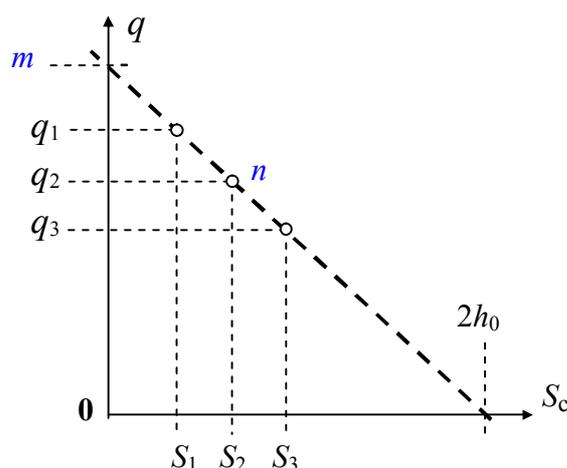


Рис. 5.4. Линейная зависимость удельного дебита от понижения в безнапорных потоках



**Пример** анализа кривой дебита в безнапорных условиях: опробован водоносный горизонт в аллювиальных гравийно-галечниковых отложениях. Отметки статического уровня около 81 м; подошва горизонта (неогеновые глины) на отметках 74 м. Данные опробования на трёх ступенях дебита (рис. 5.5):

Дебит ступени		Понижение, м	Удельный дебит	
л/с	м <sup>3</sup> /сутки		л/с·м	м <sup>3</sup> /сутки·м
41.19	3558.8	1.50	27.46	2372.5
59.53	5143.4	2.33	25.55	2207.5
88.28	7627.4	4.07	21.69	1874.1

Влияние безнапорного характера потока подтверждается прямолинейной зависимостью удельного дебита от понижения (рис. 5.6) с коэффициентами  $m = -194.49$  и  $n = 2664.32$ , которой соответствует параболическая зависимость  $S - Q$  с вершиной в точке ( $S_0 = h_0 = 6.85$  м;  $Q_0 = 9124$  м<sup>3</sup>/сутки).

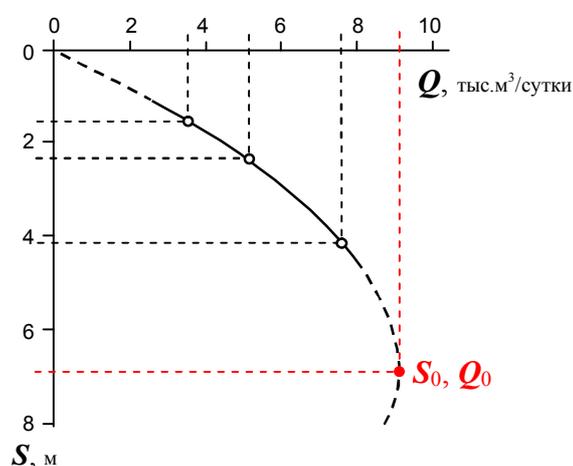


Рис.5.5. Кривая дебита

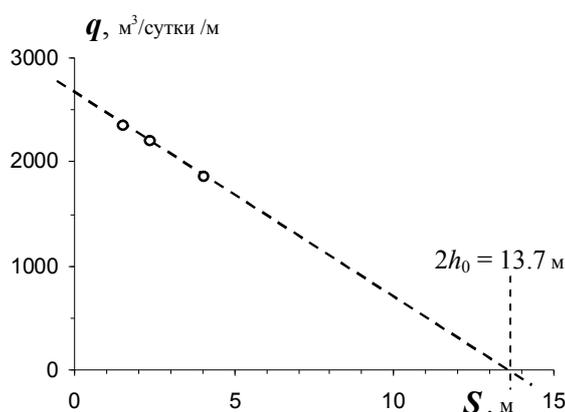


Рис.5.6. Зависимость удельного дебита от понижения

• Другая распространенная причина нелинейности индикаторного графика – возникновение явлений **ТУРБУЛЕНТНОСТИ** в прискважинной зоне; при этом создаются дополнительные *потери напора*, величина которых зависит от дебита.

При значимом проявлении турбулентных составляющих используется двучленная зависимость Дюпюи:

$$S_c = aQ + bQ^2, \text{ откуда } \varphi_c = \frac{S_c}{Q} = a + bQ,$$

где коэффициент  $b$  характеризует турбулентную составляющую; при  $b = 0$  (ламинарный режим)  $a = \varphi_c$ .

Таким образом, «турбулентный генезис» криволинейности графика  $S \div Q$  должен подтверждаться линейным характером связи  $\varphi_c - Q$  (рис. 5.7).

Для доказательства линейности такого графика нужно минимум три ступени дебита, так как есть неизвестный свободный член. По графику определяются коэффициенты  $a$  и  $b$  и далее можно прогнозировать понижение при заявленном дебите:

$$S_3 = aQ_{\text{заявл}} + bQ_{\text{заявл}}^2.$$

Можно также непосредственно на опытном графике экстраполировать прямую до значения  $Q_{\text{заявл}}$  и получить  $\varphi_3$  (рис. 5.7).

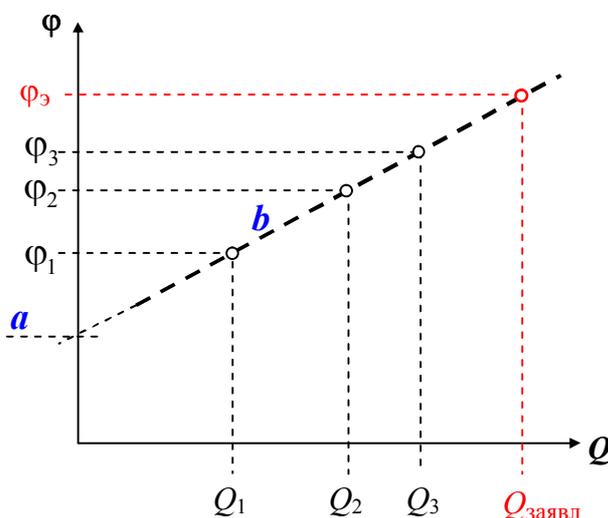


Рис.5.7. Линейный характер связи удельной срезки и дебита при проявлении турбулентности в прискважинной зоне



**Пример.**

На Звенигородском полигоне в течение ряда лет проведены откачки в широком диапазоне дебита и понижений.

Зависимость  $S \div Q$  имеет криволинейный вид (рис. 5.8), который не может быть объяснён изменением проводимости, так как при всех режимах динамический уровень оставался выше кровли опробуемого пласта мячковско-подольских известняков.

Прямолинейный характер графика удельных понижений  $\phi$  от дебита (рис. 5.9) позволяет в данном случае предположить возникновение дополнительных потерь напора за счёт турбулентности потока в прискважинной зоне, что вполне реально вследствие трещинно-карстового характера проницаемости коллектора и высоких скоростей входа воды в ствол скважины. Угловой коэффициент аппроксимирующей прямой  $b = 1.775 \cdot 10^{-7}$  сутки<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>, свободный член  $a = 7.95 \cdot 10^{-4}$  сутки/м<sup>2</sup>.

Дебит ступени		Понижение, м	Удельное понижение, сутки/м <sup>2</sup>
л/с	м <sup>3</sup> /сутки		
45.6	3939.8	6.13	0.001556
45.53	3933.8	5.76	0.001464
43.5	3758.4	5.21	0.001386
43.3	3741.1	5.36	0.001433
42.0	3628.8	5.28	0.001455
41.0	3542.4	5.05	0.001426
36.3	3136.3	4.27	0.001361
31.2	2695.7	3.44	0.001276
25.0	2160.0	2.50	0.001157
16.4	1417.0	1.44	0.001016
10.5	907.2	0.89	0.000981

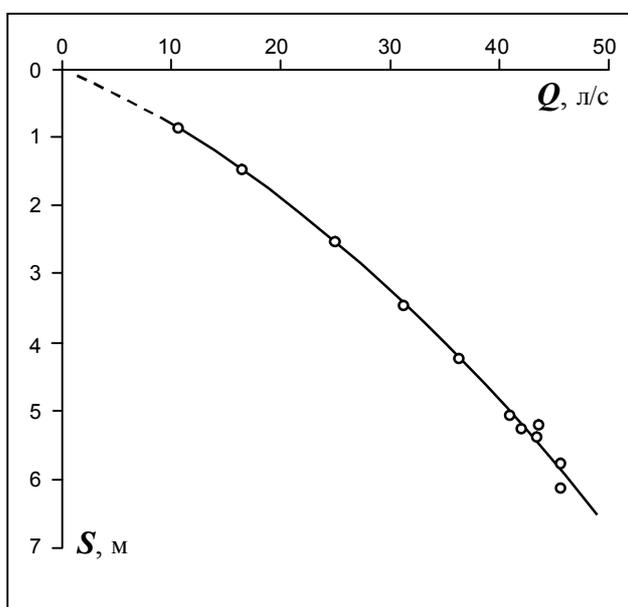


Рис.5.8. Кривая дебита

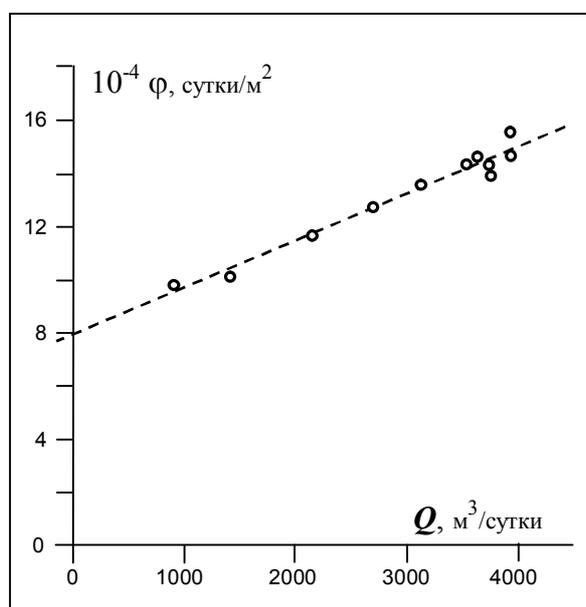


Рис.5.9. Зависимость  $\phi$  от дебита

Для подтверждения предположения о возможности проявления турбулентности в прискважинной зоне рассчитаем действительную скорость при входе подземных вод в открытый (без фильтра) ствол скважины:

– Дебит  $Q = 40$  л/с  $\approx 3500$  м<sup>3</sup>/сутки

- Радиус рабочей части ствола  $r_{\phi} = 0.15$  м, её длина  $l_{\phi} \approx 15$  м
- Площадь боковой поверхности рабочей части  $F_{\phi} = 2\pi r_{\phi} l_{\phi} \approx 14$  м<sup>2</sup>
- Скорость фильтрации на боковой поверхности  $v_{\phi} = \frac{Q}{F_{\phi}} = 3500/14 \approx 250$  м/сутки
- Истинная входная скорость на боковой поверхности (при активной пустотности слабокарстованных известняков порядка  $n_{\text{акт}} \approx 3-5\%$ ):

$$u_{\phi} = \frac{v_{\phi}}{n_{\text{акт}}} \approx 5000-8300 \text{ м/сутки} \approx 0.06-0.1 \text{ м/с.}$$

В нормативных документах большинства стран мира минимальное рекомендуемое значение входной скорости на фильтре составляет 0.03 м/с. Считается, что меньшие значения этой эмпирически установленной величины приводят к экономически необоснованному завышению стоимости сооружения скважины, которая во многом зависит от длины и диаметра фильтра. В качестве верхнего предела рекомендуется входная скорость порядка 0.4-0.5 м/с, однако оговаривается, что эта величина должна быть критически рассмотрена с учётом местных гидрогеологических условий.

Полученная в нашем примере величина в принципе укладывается в рекомендуемый диапазон входных скоростей, однако надо учитывать, что она отвечает модели равномерного распределения притока в скважину по всему рабочему интервалу  $l_{\phi}$ . Фактически это не так – по данным расходомерии, подавляющая часть притока происходит лишь по нескольким интенсивно закарстованным интервалам разреза суммарной мощностью не более 1 м. Соответственно входные скорости в этих интервалах могут достигать значений 1-1.5 м/с. Это очень значительные скорости для подземных вод. Прямым следствием является постоянно наблюдаемый при учебных откачках вынос тонкой карбонатной взвеси в откачиваемой воде; расчётный радиус центральной скважины уже сейчас превышает фактический радиус бурения. На другом учебном кусте несколько лет назад вышла из строя центральная скважина в связи с аварийной осадкой технической обсадной колонны; расчётный радиус этой скважины по последним оценкам составлял около 5 м (!), что свидетельствует о значительном суффозионном выносе и, возможно, расширении трещин и карстовых каверн в прискважинной зоне.

Возможность подобного рода негативных последствий при чрезмерно высоких скоростях входа воды в ствол скважин служит основанием для ограничения допустимой нагрузки на одну скважину, которая специально обосновывается с учётом состава и строения водовмещающих отложений.

Наконец, есть ещё целый ряд причин, заметно осложняющих форму кривых дебита:

- изменение сопротивления прискважинной зоны в процессе ступенчатого опробования: размыв, разрушение стенок скважины или кольматация фильтра глинистыми частицами, выносимыми из заполнителя трещин и т.д. Это совершенно непрогнозируемые процессы.
- неоднородность безнапорного пласта по вертикали;



– изменение характера действия граничных условий вследствие понижения уровней – например, возникновение отрыва от ложа реки при больших  $Q$  и  $S$ , изменение уровня малой реки, если её расход частично перехватывается при ОЭО и др..

К тому же, эти причины могут проявляться совместно, поэтому очень часто нельзя или трудно применить стандартные приёмы интерпретации типа вышерассмотренных. Что делать? Нужно пробовать разные системы координат, чтобы найти линейную или какую-то другую функциональную связь между  $S$  и  $Q$  и по ней экстраполировать прогнозные понижения на величину  $Q_{\text{заявл}}$ . Понятно, что такие формальные построения весьма уязвимы и требуют какого-то объяснения с генетических позиций.

Таким образом, можно констатировать, что опытно-эксплуатационное опробование в стационарной постановке – в принципе сильный инструмент, так как  $\Phi$  определяется экспериментально, по факту, а не по частям. Но далеко не всегда ясны причины возникновения того или иного характера кривых дебита, так как месторождение заведомо имеет сложные условия. Чтобы уменьшить риск экстраполяции по дебиту, рекомендуют ОЭО проводить при дебите, максимально близком к потребности, что может потребовать весьма значительных технических усилий и материальных затрат.

Следует также понимать, что гидравлический метод по сути консервативен – подсчёт запасов возможен только для конкретных опробованных скважин, поскольку  $\Phi_c$  является индивидуальной характеристикой скважины.

### СИСТЕМЫ СКВАЖИН

До сих пор предполагалось, что опробуется одна скважина. А как быть, если будущий водозабор должен состоять из нескольких скважин ?

Теоретически необходимо провести ОЭО из каждой (!) скважины системы, чтобы получить  $n^2$  удельных срезов:

$$\varphi_{i(j)} = \frac{S_{i, \text{оэо}}}{Q_{j, \text{оэо}}} \quad (\text{удельная срезка в } i\text{-ой скважине от действия } j\text{-ой}).$$

На практике проводят асинхронную групповую откачку: включают одну скважину, дожидаются стабилизации понижений, фиксируют срезы от действия этой скважины, затем на этом фоне включают следующую и т.д.

При найденных срезах  $\varphi_{i(j)}$  можно для каждой скважины рассчитать ожидаемое (прогнозное) понижение при работе всей системы с заявленным дебитом:

$$S_{i,\pi} = \sum_{j=1}^n \varphi_{i(j)} Q_{j,\pi},$$

где  $Q_{j,\pi}$  – прогнозный дебит  $j$ -ой скважины. Если на прогноз предполагается одинаковый дебит всех скважин системы, то  $Q_{j,\pi} = \frac{Q_{\text{заявл}}}{n}$ .

Полученные расчётные понижения сравниваются с допустимыми и при необходимости корректируются прогнозные дебиты.

Если же условие одинакового дебита необязательно, то можно рассчитать максимально возможный прогнозный дебит каждой скважины, решив оптимизационную систему из  $n$  уравнений с  $n$  неизвестными дебитами:

$$\begin{aligned} \varphi_{1(1)}Q_{1,\pi} + \varphi_{1(2)}Q_{2,\pi} + \dots + \varphi_{1(j)}Q_{j,\pi} + \dots + \varphi_{1(n)}Q_{n,\pi} &= S_{\text{доп}, 1} \\ \varphi_{2(1)}Q_{1,\pi} + \varphi_{2(2)}Q_{2,\pi} + \dots + \varphi_{2(j)}Q_{j,\pi} + \dots + \varphi_{2(n)}Q_{n,\pi} &= S_{\text{доп}, 2} \\ \dots & \\ \varphi_{j(1)}Q_{1,\pi} + \varphi_{j(2)}Q_{2,\pi} + \dots + \varphi_{j(j)}Q_{j,\pi} + \dots + \varphi_{j(n)}Q_{n,\pi} &= S_{\text{доп}, j} \\ \dots & \\ \varphi_{n(1)}Q_{1,\pi} + \varphi_{n(2)}Q_{2,\pi} + \dots + \varphi_{n(j)}Q_{j,\pi} + \dots + \varphi_{n(n)}Q_{n,\pi} &= S_{\text{доп}, n}. \end{aligned}$$



### НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ ЗАВЕРШЕНИЯ ОЭО

Если «питающие» гидрогеодинамические границы в области месторождения отсутствуют или обладают большим сопротивлением (далеко расположены или слишком несовершенны), то ОЭО придётся, скорее всего, завершить при сохраняющемся нестационарном режиме. В этом случае применяют комбинированный метод – гидравлический по сути, но с элементами гидродинамического подхода.

Удельная срезка при нестационарном режиме ОЭО постепенно возрастает. Понятно, что при длительной эксплуатации срезка вырастет ещё больше. Поэтому расчёты водозабора нужно выполнять для некоторого неизвестного прогнозного значения удельной срезки  $\varphi_{\pi}$  ( $\varphi_{\pi} > \varphi_{\text{ОЭО}}$ ):

$$S_{\text{э}} = Q_{\text{заявл}} \cdot \varphi_{\pi} \leq S_{\text{доп}} ? \quad (5.3)$$

Как определить прогнозную срезку  $\varphi_{\pi}$ ? Представим её в виде суммы фактически достигнутой срезки  $\varphi_{\text{ОЭО}}$  за время опытного опробования и некоторого её приращения за последующее время эксплуатации  $t_{\text{э}} - t_{\text{ОЭО}}$ :

$$\varphi_{\Pi} = \varphi_{\text{ОЭО}} + \Delta\varphi_t. \quad (5.4)$$

Для определения  $\Delta\varphi_t$  необходимы два условия:

1) За время ОЭО должен установиться некоторый **УСТОЙЧИВЫЙ, ЗАКОНОМЕРНЫЙ** темп снижения уровня во времени.

2) Предполагается, что **ЭТОТ ТЕМП СОХРАНИТСЯ** на весь оставшийся период эксплуатации  $t_{\text{э}} - t_{\text{ОЭО}}$ .

А как **ФАКТИЧЕСКИ** может повести себя уровень при эксплуатации (рис. 5.10)?

а) может в действительности сохранять сложившийся темп;

б) может постепенно замедляться и даже стабилизироваться за счёт проявления удалённых питающих границ; в этом случае прогноз понижений окажется завышенным, то есть реальные возможности месторождения будут недооценены;

в) может возрасть за счет проявления далёких слабопроницаемых границ или балансовой ограниченности питающих границ. Это неприятный случай, поскольку при эксплуатации может возникнуть угроза перепонижения уровней. Скорее всего, придётся либо снижать производительность водозабора, либо расширять его, для чего потребуются доразведка месторождения.

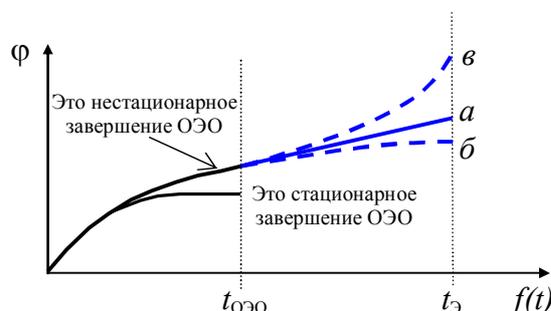


Рис. 5.10. Возможное поведение удельной срезки при эксплуатации месторождения

Как технически выполняется прогноз? Желательно подобрать такую координату времени, чтобы график  $\varphi \div f(t)$  имел *линейный* характер. Тогда величину приращения удельной срезки за время эксплуатации можно рассчитать достаточно просто:

$$\Delta\varphi_t = C (f(t_{\text{э}}) - f(t_{\text{ОЭО}})), \quad (5.5)$$

где  $C$  – угловой коэффициент графика  $\varphi \div f(t)$  на последнем этапе опытно-эксплуатационной откачки.

Далее определяется величина прогнозной удельной срезки  $\varphi_{\Pi}$  по формуле (5.4) и ожидаемое эксплуатационное понижение уровня  $S_{\text{э}}$  по формуле (5.3). Если полученное значение  $S_{\text{э}}$  отличается от  $S_{\text{доп}}$  (в ту или иную сторону!), то можно определить предельно возможный дебит водоотбора:

$$Q_{\text{max}} = \frac{S_{\text{доп}}}{\varphi_{\Pi}}. \quad (5.6)$$

Заметим, что величина  $\varphi$  имеет удельный характер по отношению к дебиту. Поэтому зависимость  $\varphi \div f(t)$  для месторождения является единственной и при любых прогнозных расчётах нет необходимости учитывать различие дебита ОЭО и реального заявленного дебита, как это приходится делать, если оперировать величинами «чистых» понижений.

Наиболее наглядно идею нестационарного прогноза удельной срезки можно показать на примере «схемы Тейса» – неограниченный изолированный однородный водоносный горизонт. В этих условиях понижение уровня и удельной срезки во времени происходит по логарифмическому закону:

$$S = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25a}{r_c^2} + \frac{Q}{4\pi T} \ln t \rightarrow \varphi = \frac{S}{Q} = \frac{1}{4\pi T} \ln \frac{2.25a}{r_c^2} + \frac{1}{4\pi T} \ln t.$$

$$\varphi_{\Pi} = \varphi_{\text{ОЭО}} + C(\ln t_{\text{э}} - \ln t_{\text{ОЭО}}).$$

Вот результаты простого модельного эксперимента для сосредоточенного водозабора в этих условиях:

- Проводимость 250 м<sup>2</sup>/сутки, упругая водоотдача 10<sup>-3</sup>, заявленный дебит 2000 м<sup>3</sup>/сутки. Продолжительность ОЭО 10 суток, дебит ОЭО 1000 м<sup>3</sup>/сутки.
- Полученное к концу ОЭО понижение  $S_{\text{ОЭО}} = 3.04$  м,
- Соответственно  $\varphi_{\text{ОЭО}} = 3.04 \cdot 10^{-3}$  сутки/м<sup>2</sup> (рис. 5.11, кривая А),
- Уклон конечной прямолинейной части графика  $\varphi \div \lg t$  (рис. 5.12)  $C = 7.32 \cdot 10^{-4}$  сутки/м<sup>2</sup>.
- Прогнозная (на  $t_{\text{э}} = 100$  суток) удельная срезка
 
$$\varphi_{\Pi} = 3.04 \cdot 10^{-3} + 7.32 \cdot 10^{-4} (\lg 100 - \lg 10) = 3.772 \cdot 10^{-3} \text{ сутки/м}^2 \text{ (рис. 5.12).}$$
- Расчётное понижение на конец эксплуатации
 
$$S_{\text{э}} = \varphi_{\Pi} Q_{\text{заявл}} = 3.772 \cdot 10^{-3} \cdot 2000 = 7.54 \text{ м.}$$
- Фактически на модели получено 7.55 м (рис. 5.11, кривая Б).
- Если принять допустимое понижение 6.5 м, то максимально возможный дебит составит  $Q_{\text{max}} = S_{\text{доп}} / \varphi_{\Pi} = 6.5 / 3.772 \cdot 10^{-3} = 1723.7$  м<sup>3</sup>/сутки.
- На модели при таком дебите подтверждается величина понижения ровно 6.5 м (рис. 5.11, кривая В).



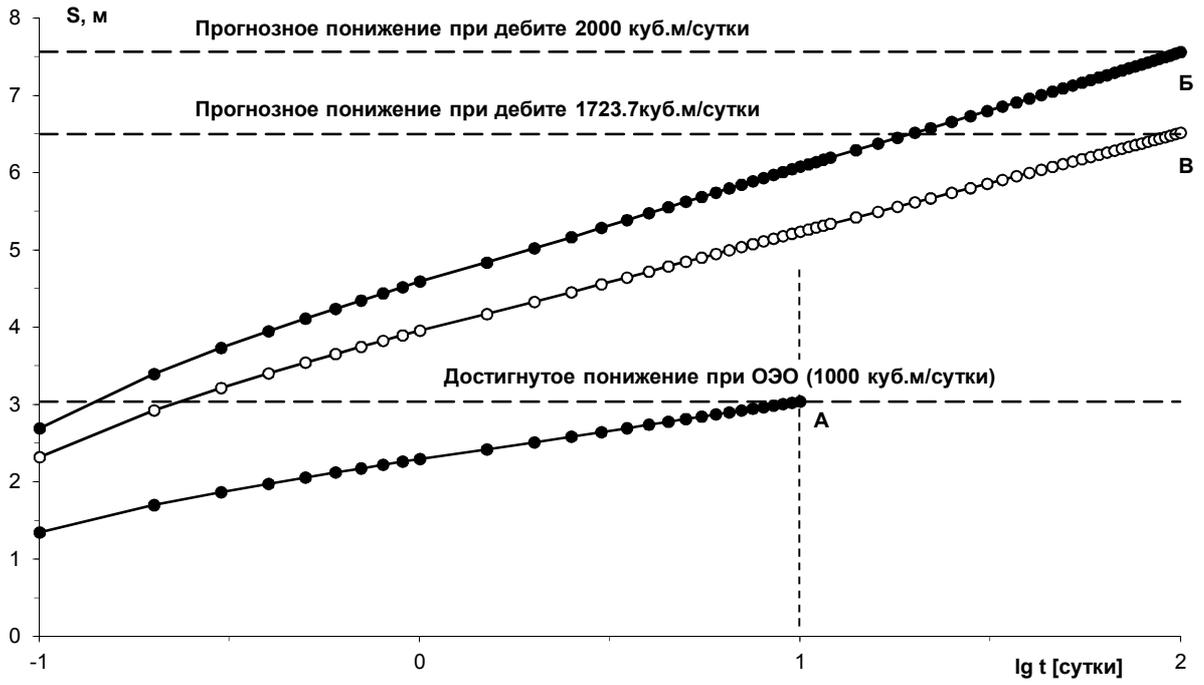


Рис. 5.11. Фактическое и прогнозное развитие понижений в модельном эксперименте

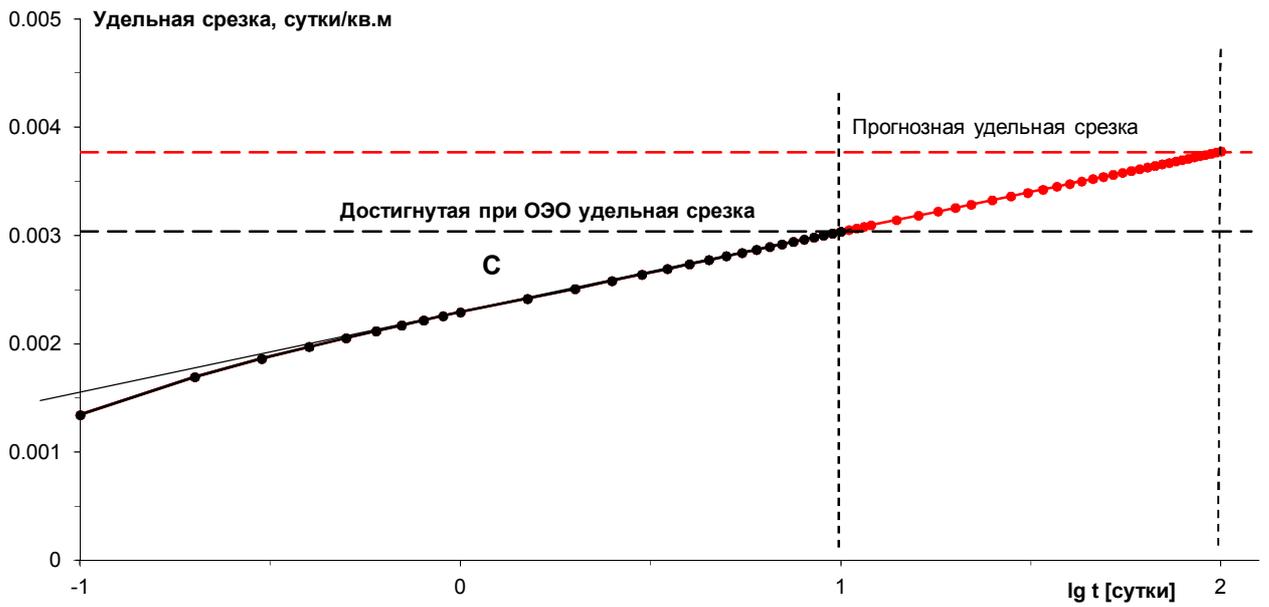


Рис. 5.12. Фактическое и прогнозное развитие удельной срезки в модельном эксперименте



При работе с безнапорными водоносными горизонтами во всех вышеприведенных зависимостях для удельных срезов следует использовать расчётные понижения  $S(2h_0 - S)$ ; соответственно размерность удельной срезки [сутки/м].

Так, приняв в предыдущем примере безнапорный характер горизонта с начальной проводимостью  $T_0 = 250 \text{ м}^2/\text{сутки}$  ( $h_0 = 20 \text{ м}$ ,  $K = 12.5 \text{ м/сутки}$ ), получим при прочих равных условиях:

– Понижение к концу ОЭО  $S_{\text{оэо}} = 3.30 \text{ м}$ ,

– Соответственно

$$\varphi_{\text{оэо}} = \frac{S_{\text{оэо}}(2h_0 - S_{\text{оэо}})}{Q} = 3.30 \cdot (2 \cdot 20 - 3.30) / 1000 = 1.211 \cdot 10^{-1} \text{ сутки/м.}$$

– Уклон конечной прямолинейной части графика  $\varphi \div \lg t$   $C = 2.928 \cdot 10^{-2} \text{ сутки/м}$ .

– Прогнозная (на 100 суток) удельная срезка

$$\varphi_{\text{п}} = 1.211 \cdot 10^{-1} + 2.928 \cdot 10^{-2} (\lg 100 - \lg 10) = 1.5038 \cdot 10^{-1} \text{ сутки/м.}$$

– Понижение на конец эксплуатации (с дебитом  $2000 \text{ м}^3/\text{сутки}$ ) придётся рассчитать из решения квадратного уравнения

$$S_3^2 - 2h_0 S_3 + \varphi_{\text{п}} Q_{\text{заявл}} = 0 \rightarrow S_3 = 10.04 \text{ м.}$$

– Фактически на модели получено  $10.15 \text{ м}$ .

– Если принять допустимое понижение  $6.5 \text{ м}$ , то максимально возможный дебит составит

$$Q_{\text{max}} = \frac{S_{\text{доп}}(2h_0 - S_{\text{доп}})}{\varphi_{\text{п}}} = 6.5 \cdot (2 \cdot 20 - 6.5) / 1.5038 \cdot 10^{-1} = 1448.6 \text{ м}^3/\text{сутки.}$$

– На модели при таком дебите подтверждается величина понижения  $6.53 \text{ м}$ .

Линейная зависимость  $S \div \ln t$  соблюдается и в хаотически-неоднородных пластах – здесь установившийся темп снижения отвечает некоторой «обобщённой» проводимости в области депрессии.

Можно показать, что линейный характер снижения уровня в логарифмическом масштабе времени существует и в случае непроницаемой границы на расстоянии  $L_0$  от эксплуатационной скважины («полуограниченный» пласт). В такой ситуации применяется зеркальное отражение скважины с тем же (по величине и знаку) дебитом относительно граничного контура, что даёт возможность использования зависимостей для неограниченного пласта при сохранении на граничном контуре условия нулевого трансграничного расхода  $\frac{dH}{dn} = 0$ , то есть нулевой градиент напора по нормали к линии границы в силу симметрии реальной и отражённой депрессионных воронок (рис. 5.13).

Понижение в реальной скважине рассчитывается по принципу сложения решений:

$$S = S_{\text{реал}} + S_{\text{отраж}} = \frac{Q}{4\pi T} \left( \ln \frac{2.25at}{r_c^2} + \ln \frac{2.25at}{(2L_0)^2} \right) = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{2.25at}{2L_0 r_c}, \quad (5.7)$$



то есть после полного проявления влияния непроницаемой границы ( $t_0$ ) сохраняется линейная зависимость понижения от логарифма времени, но угловой коэффициент аппроксимирующей прямой ( $\frac{Q}{2\pi T}$ ) будет в два раза больше. Понятно, что в этом случае длительность ОЭО должна быть значительно больше, чем  $t_0$ , чтобы достаточно надёжно зафиксировать возросший темп снижения, отвечающий влиянию границы.

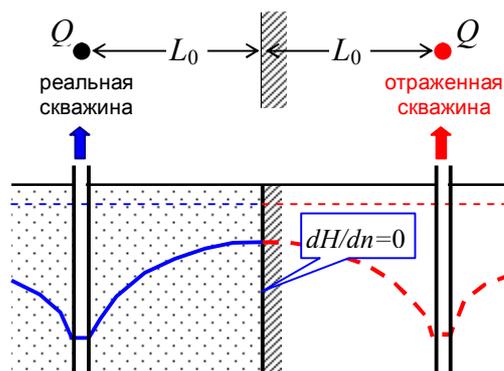


Рис. 5.13. Приём зеркального отражения скважины у непроницаемой границы

Для практической оценки необходимой длительности ОЭО рассмотрим результаты численного аналитического эксперимента – откачка с дебитом  $2000 \text{ м}^3/\text{сутки}$  в однородном изолированном полуограниченном пласте с непроницаемой границей на разных расстояниях от скважины ( $L_0 = 500$  и  $1000$  м) при различных значениях уровне(пьезо)проводности ( $a = 5 \cdot 10^4, 2.5 \cdot 10^5$  и  $1 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{сутки}$ ).

На графиках прослеживания, рассчитанных по принципу сложения понижений от реальной и отражённой скважин, отчётливо прослеживаются три этапа (рис. 5.14):

– начальный, с уклоном, отвечающим реальной проводимости полуограниченной области,

– переходный, характеризующийся плавным возрастанием уклона под постепенно проявляющимся влиянием непроницаемой границы (его начало показано на каждом графике засечкой « $t_H$ », а окончание – засечкой « $t_K$ »),

– конечный, с уклоном, вдвое превышающим уклон начального участка, что отвечает полному проявлению влияния непроницаемой границы. Именно этот уклон и следует применять для прогноза приращения удельной срезки по формуле 5.5.

Таким образом, момент окончания переходного периода  $t_K$  является важным ориентиром при проектировании необходимой длительности ОЭО. Для его оценки целесообразно провести численный анализ результатов аналитического эксперимента в форме графиков изменения уклона полулогарифмического прослеживания понижений (на рис. 5.15 они показаны для  $L_0 = 500$  м).



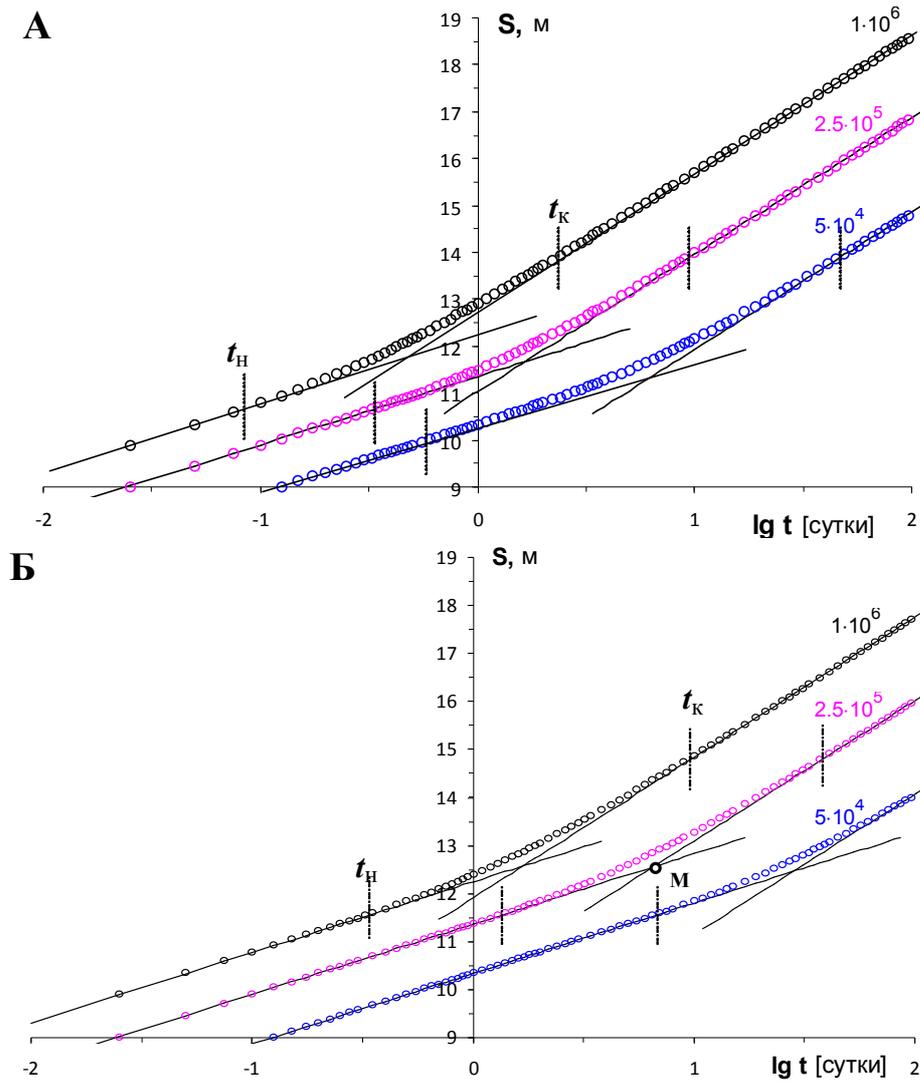


Рис. 5.14. Прослеживание понижений в полуограниченном пласте с непроницаемой границей на расстоянии 500 (А) и 1000 м (Б) при различных значениях  $a$

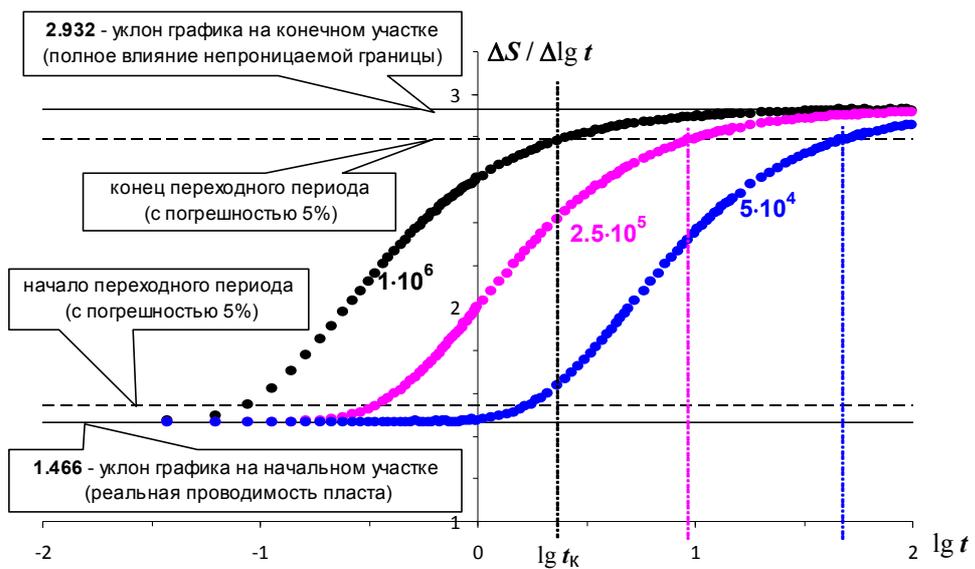


Рис. 5.15. Изменение уклона графиков прослеживания понижений при различных значениях  $a$  ( $L_0 = 500$  м)



Начальные части этих графиков соответствуют уклону 1.466, определяемому реальной проводимостью пласта; их длительность тем меньше, чем выше уровне(пьезо)проводность. Далее уклон в течение переходного периода плавно возрастает, постепенно приближаясь к предельной величине  $1.466 \times 2 = 2.932$ . Принимая момент окончания переходного периода с какой-то погрешностью, получим следующую оценку:

$$t_k = \gamma \frac{L_0^2}{a},$$

где  $\gamma = 4.5 - 9.5$  при погрешности 10% и 5% соответственно.

Например, при расстоянии до непроницаемой границы 700 м и пьезопроводности  $1 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>/сутки окончание переходного периода можно принять равным 47 суткам (с погрешностью 5%); следовательно, необходимая длительность опытно-эксплуатационного опробования должна составлять не менее 2–2.5 месяцев, чтобы достаточно надёжно проявился конечный этап графика прослеживания.

Ещё два полезных приложения:

– понятно, что для оценки реальной проводимости пласта следует использовать только начальный участок графика прослеживания, до начала их деформации под влиянием непроницаемой границы. По данным аналитического эксперимента продолжительность начального участка составляет;

$$t_H = (0.35 \div 0.45) \frac{L_0^2}{a}$$

с погрешностью 5% и 10% соответственно.

– в реальных природных условиях положение непроницаемой границы точно не известно. В таких случаях можно решить обратную задачу – по графику полулогарифмического прослеживания определяется время  $t_M$ , отвечающее точке пересечения прямых, аппроксимирующих начальный и конечный участок. Для этой точки справедливо равенство:

$$\frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at_M}{r_c^2} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{2.25at_M}{2L_0r_c},$$

откуда  $L_0 = 0.75 \sqrt{at_M}$ .

Для точки М (на рис. 5.14, Б)  $\lg t_M = 0.845$ ,  $t_M = 7$  суток, соответственно при  $a = 2.5 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>/сутки  $L_0 = 992$  м.

Необходимо заметить, что в практике подсчёта ЭЗ иногда высказывается такое мнение: если по конечному участку прослеживания понижений определить некие «обобщённые» параметры области влияния ОЭО, то их можно успешно использовать для прогноза по аналитическим зависимостям для формально неограниченной и однородной области. К этой рекомендации нужно относиться осторожно, так как «обобщённые» параметры не всегда можно применять с нулевого момента времени.

Покажем это для условий рассматриваемого численного примера ( $L_0 = 500$  м,  $T = 250$  м<sup>2</sup>/сутки,  $a = 2.5 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>/сутки). Если для периода ОЭО рассчитать динамику снижения уровня в наблюдательной скважине, расположенной на расстоянии 100 м от опытной по направлению к непроницаемой границе (используя формулу 5.7 с заменой  $r_c$  на  $r = 100$  м и  $2L_0$  на  $L = 2L_0 - r = 900$  м), то по уклону конечного



участка графика прослеживания  $S - \lg t$  можно получить оценку «обобщённых» параметров проводимости  $T^* = 125 \text{ м}^2/\text{сутки}$  и  $a^* = 2.8135 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{сутки}$ .

Используя эти параметры для аналитического прогноза на  $10^4$  суток по схеме неограниченной области, получим прогнозное понижение уровня в водозаборе 31.66 м. В то же время точный расчёт по формуле 5.7 даёт прогнозное понижение 22.72 м, то есть применение идеи «обобщённых» параметров в рассмотренной ситуации приводит к весьма значительной погрешности порядка 40%. Тем самым занижаются реальные возможности месторождения и создаётся основа для нерациональных технико-экономических решений по его освоению.

Ещё один пример возможности применения нестационарного гидравлического прогноза: полосообразный пласт с непроницаемыми границами в плане – например, полоса аллювия в речной долине, вложенная в относительно слабопроницаемые коренные отложения, или зона тектонического дробления скальных пород. Понижение уровня в действующей скважине в таких условиях формируется под влиянием теоретически бесконечной цепочки зеркальных отражений скважины относительно обеих непроницаемых границ «пласта–полосы». График полулогарифмического прослеживания  $S \div \lg t$  имеет начальный участок с уклоном, отвечающим реальной проводимости пласта (рис. 5.16); после достижения воронкой депрессии ближайшей границы полосы начинается прогрессирующее возрастание крутизны графика.

Аналитическое описание для такой схемы (при «среднем» положении водозабора в полосе, рис.5.16):

$$S_c = \frac{Q}{2\pi T} \left( \ln \frac{0.16L_{\Pi}}{r_c} + \frac{3.55\sqrt{at}}{L_{\Pi}} \right),$$

что отвечает линейной зависимости вида

$$\varphi = A + C\sqrt{t}$$

(аналитическое содержание коэффициентов  $A$ ,  $C$  очевидно).



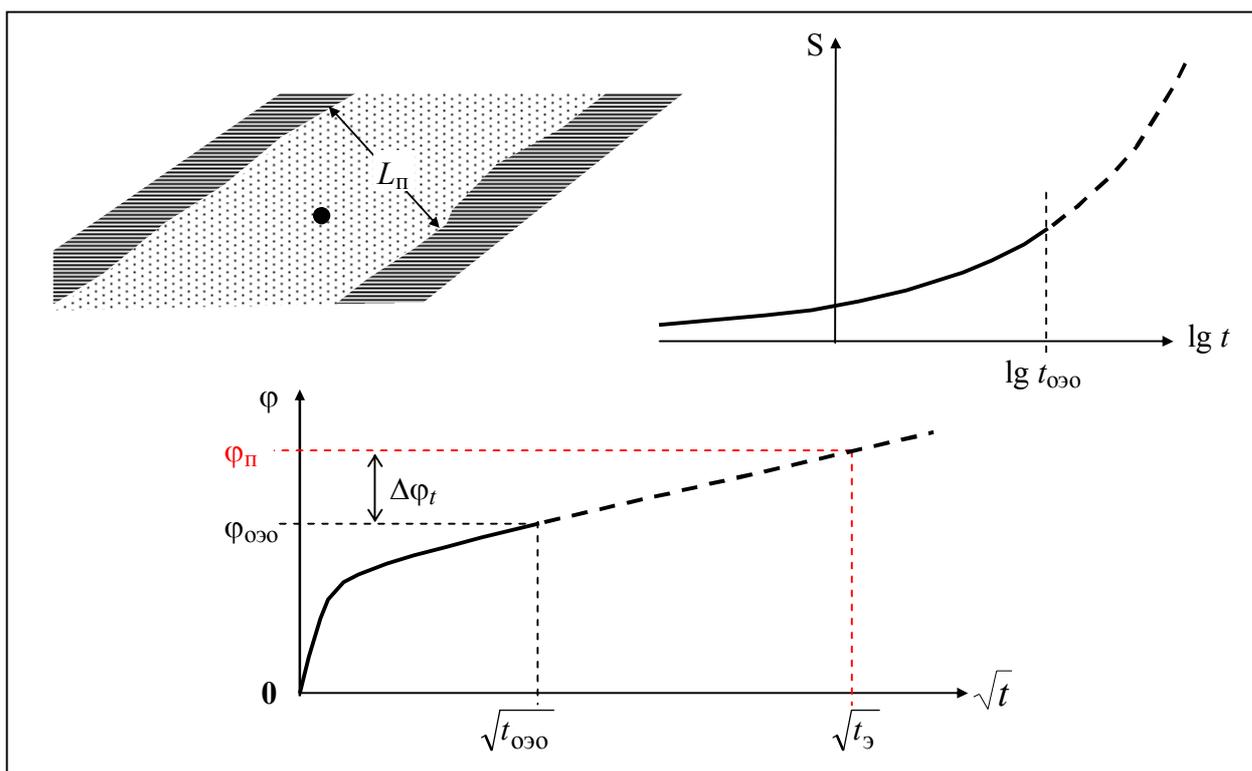


Рис. 5.16. Применение гидравлического метода при нестационарном завершении ОЭО в полосообразных пластах



### Пример

Опытно-эксплуатационная откачка в трещинно-карстовом водоносном горизонте (среднекаменноугольные известняки, рис. 5.17) проведена в течение 121 суток со средним дебитом 23500 м<sup>3</sup>/сутки. В течение первых двух суток темп снижения уровней чрезвычайно невысокий и соответствует проводимости пласта порядка 35 тыс. м<sup>2</sup>/сутки, что подтверждается многочисленными опытными откачками в зоне разведочно-эксплуатационного куста. Затем темп снижения плавно возрастает; после 10 суток и до конца откачки его можно может интерпретировать как практически постоянный – уклон графика  $\frac{S}{Q} \div \lg t$  (рис. 5.18) составляет  $C = 1.219 \cdot 10^{-4}$  сутки/м<sup>2</sup>.

Удельная срезка к концу опытно-эксплуатационной откачки  $\varphi_{\text{оэо}} = 3 \cdot 10^{-4}$  сутки/м<sup>2</sup>. Если принять этот уклон графика в качестве прогнозного, то удельная срезка к концу проектируемого срока эксплуатации составит  $\varphi_{\text{п}} = 3 \cdot 10^{-4} + C (\lg 10^4 - \lg 121) = 5.32 \cdot 10^{-4}$  сутки/м<sup>2</sup>, что при сохранении того же дебита соответствует прогнозируемому понижению 12.5 м. При расчёте на допустимое понижение на опробованном участке 15 м возможный эксплуатационный дебит составит (по формуле 5.6):

$$Q_э = \frac{15}{5.32 \cdot 10^{-4}} \approx 28200 \text{ м}^3/\text{сутки}.$$

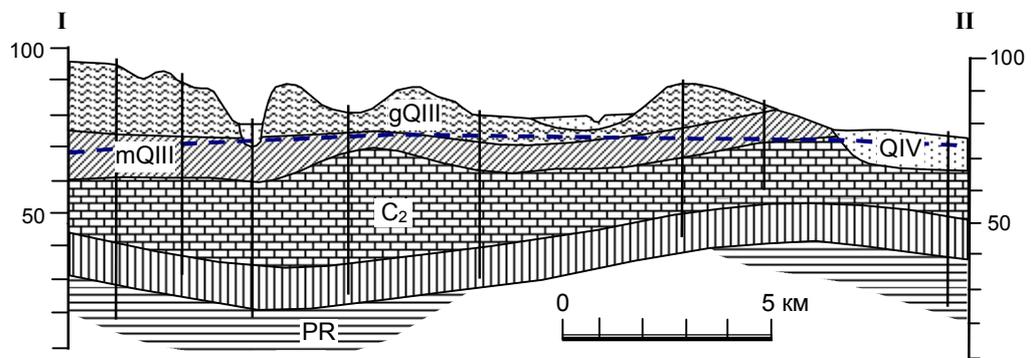
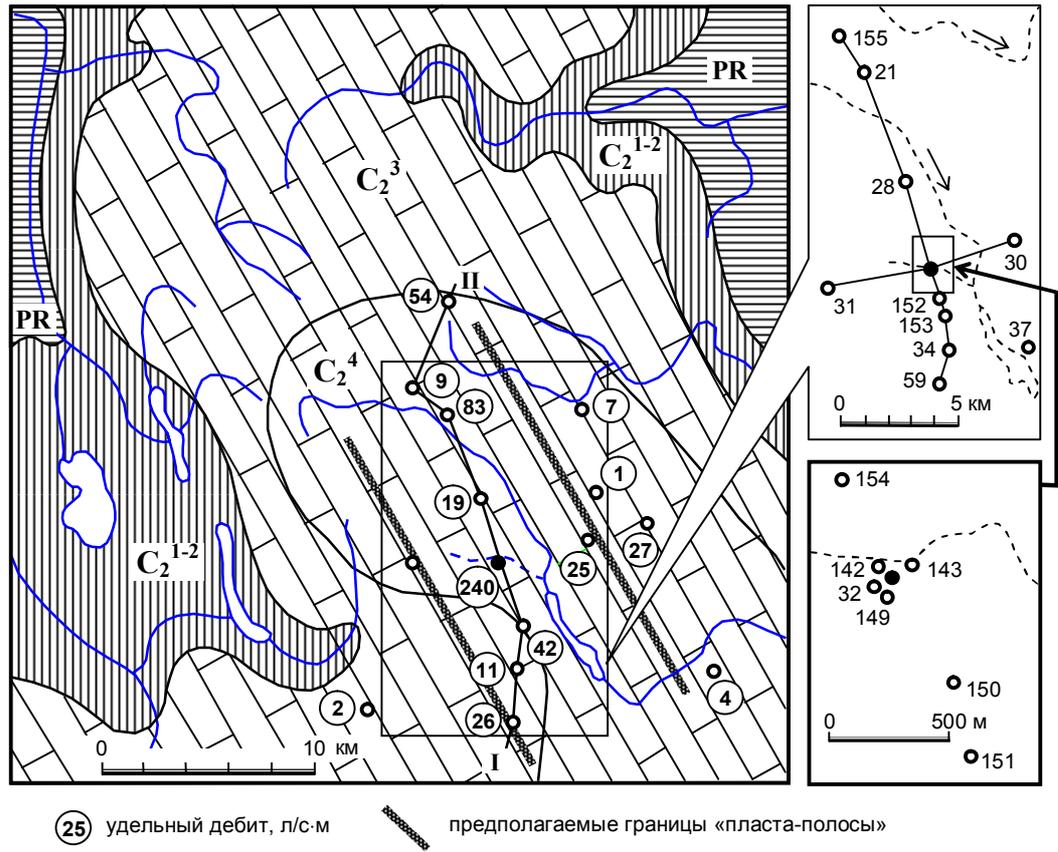


Рис. 5.17. Геолого-гидрогеологическая карта и разрез месторождения со схемой опытно-эксплуатационного опробования

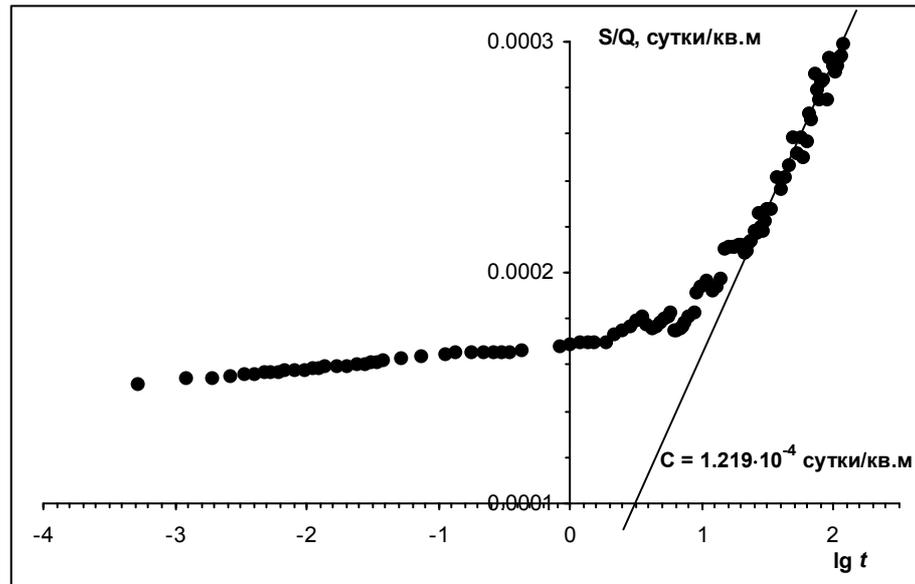


Рис. 5.18. Линейная аппроксимация развития удельной срезки в логарифмическом масштабе времени

Однако, результаты опытных откачек по всей зоне месторождения и детальный анализ временного прослеживания опытно-эксплуатационной откачки по 15-ти наблюдательным скважинам показывают, что распределение проводимости опробуемого горизонта в плане можно схематизировать в виде «пласта-полосы» с практически непроницаемыми границами. Зона высокой проводимости приурочена к осевой части антиклинальной складки в известняках и имеет ширину около 8–9 км; за её пределами проводимость довольно резко сокращается до первых сотен м<sup>2</sup>/сутки. Это предположение подтверждается важным диагностическим признаком – линейным характером графика прослеживания понижений в координатах  $\frac{S}{Q} \div \sqrt{t}$  (рис. 5.19) с угловым коэффициентом  $C_K = 1.408 \cdot 10^{-5}$  сутки<sup>0.5</sup>/м<sup>2</sup>.

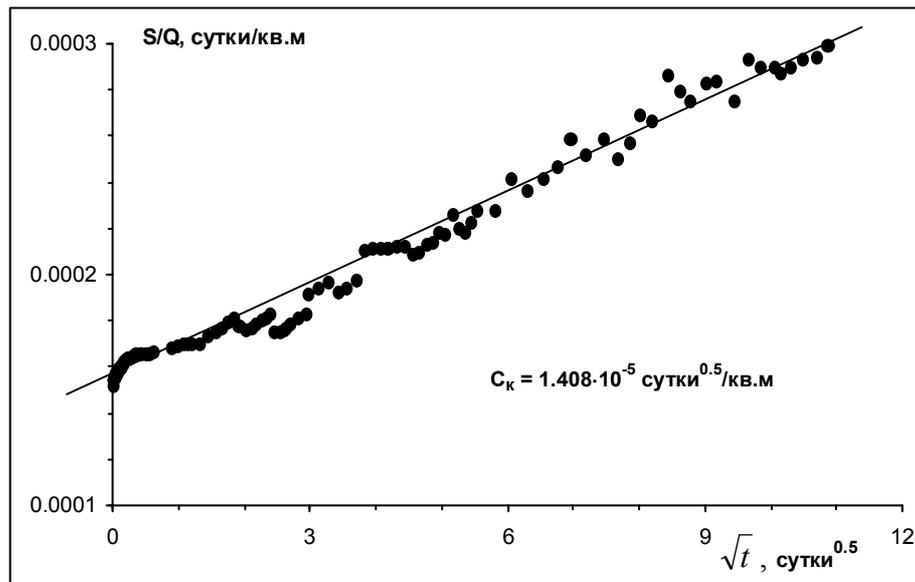


Рис. 5.19. Линейная аппроксимация развития удельной срезки в «корневом» масштабе времени



Экстраполяция графика в этих координатах даёт величину прогнозной удельной срезки  $\varphi_{\Pi} = 3 \cdot 10^{-4} + C_{\kappa}(\sqrt{10^4} - \sqrt{121}) = 1.552 \cdot 10^{-3}$  сутки/м<sup>2</sup>; прогнозное понижение – около 36.5 м, что втрое превосходит прогноз по логарифмическому темпу снижения. При расчёте на величину допустимого понижения по формуле (5.6) максимально возможный дебит при эксплуатации не должен превышать:

$$Q_{\varepsilon} = \frac{15}{1.552 \cdot 10^{-3}} \approx 9665 \text{ м}^3/\text{сутки}.$$

Близкая картина наблюдается и для замкнутого пласта с непроницаемым контуром (расчётная схема «пласт-круг»); крутизна графика полулогарифмического прослеживания прогрессирует в этих условиях ещё более резко. Аналитическое описание для центрального положения водозабора:

$$S_c = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{0.47R_{\kappa}}{r_c} + \frac{Qt}{\mu\pi R_{\kappa}^2},$$

то есть линейная зависимость проявляется в координате «чистого» времени (рис. 5.20):

$$\varphi_c = A + Ct.$$

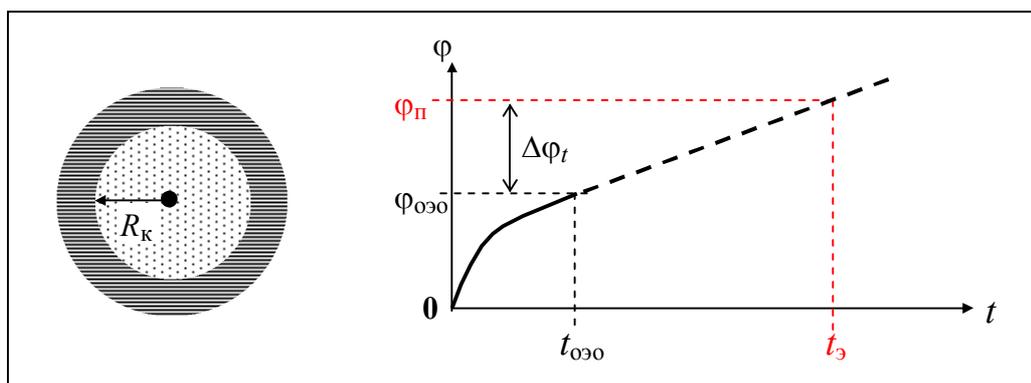


Рис. 5.20. Применение гидравлического метода при нестационарном завершении ОЗО в замкнутых пластах

• Главный вывод из приведенных примеров: для успешной экстраполяции удельной срезки во времени необходимо достаточно хорошо изучить гидрогеологические условия месторождения, чтобы ясно понимать, *какие границы и каким образом будут определять генеральный темп снижения.*

Таким образом, рассмотрев возможности применения гидравлического метода (как в стационарной, так и в нестационарной постановке), приходим к тому, с чего начинали – хотели закрыть глаза на сложные условия месторождения и охарактеризовать их интегрально, с помощью прямого показателя  $\varphi$ ; однако, получается, что всё равно нужно серьёзно заниматься изучением неоднородности строения пласта, границ с их

параметрами и других элементов фильтрационной схемы, так как нужно **ОТВЕТСТВЕННО** идти на экстраполяцию: по дебитам (кривые  $S \div Q$ ), или по времени (графики  $\varphi = f(t)$ ).

### МЕТОД ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ

Завершая рассмотрение методов подсчёта ЭЗ, кратко охарактеризуем метод гидрогеологической аналогии (подобия). В определённом смысле этот метод можно рассматривать как модификацию гидравлического подхода, поскольку его основная идея – перенос эмпирических, фактически наблюдаемых количественных характеристик на *водозаборе-аналоге* на изучаемый (перспективный) участок. Такой приём полезен для предварительной оценки эксплуатационных возможностей участка на ранних стадиях работ.

Основная проблема, которой следует уделить должное внимание – доказательство аналогии сравниваемых участков (общие гидрогеологические условия, распределение и величины параметров, тип граничных условий и т.д.). Далее используется принцип пропорциональности.

• Если, например, на объекте-аналоге работает ряд скважин длиной  $L^{\text{ан}}$  с суммарным дебитом  $Q^{\text{ан}}$ , то на перспективном участке можно предполагать дебит  $Q^{\circ}$  (при проектируемой длине ряда  $L^{\circ}$ ) или оценить необходимую длину ряда  $L^{\circ}$  при заданном дебите  $Q^{\circ}$ :

$$\frac{Q^{\text{ан}}}{L^{\text{ан}}} = \frac{Q^{\circ}}{L^{\circ}} = m' \rightarrow Q^{\circ} = L^{\circ} \frac{Q^{\text{ан}}}{L^{\text{ан}}} = m' L^{\circ},$$

где  $m'$  – линейный модуль эксплуатационных запасов, то есть удельный (с единицы длины ряда) расход водоотбора.

• Если использовать какую-то характерную *площадь*  $F^{\text{ан}}$  (например, площадь депрессионной воронки, площадь локальной гидрогеологической структуры и т.п.):

$$\frac{Q^{\text{ан}}}{F^{\text{ан}}} = \frac{Q^{\circ}}{F^{\circ}} = m'' \rightarrow Q^{\circ} = F^{\circ} \frac{Q^{\text{ан}}}{F^{\text{ан}}} = m'' F^{\circ},$$

где  $m''$  – площадной модуль эксплуатационных запасов.

В качестве объекта-аналога может быть использовано и ранее детально разведанное, но ещё не освоенное месторождение.

Если аналогия неполная, можно ввести корректирующие коэффициенты – например:



$$Q^0 = m'' F^0 \frac{T^0}{T_{\text{ан}}} \quad (\text{корректурa по различиям в проводимости}).$$