

«Эксплуатационная разведка месторождений подземных вод»

**для слушателей магистратуры ОП
«Гидрогеология и инженерная геология»**

**Лекция 7
Проф. М.Заппаров**

Лекция 7

Неустановившийся режим фильтрации при откачке, уравнение Тейса, его преобразование. Графики временного, площадного и комбинированного прослеживания.

Определение параметров водоносного горизонта по результатам прослеживания за восстановлением уровня после откачки. Откачки для изучения граничных условий, обработка полученных данных.

Неустановившийся режим фильтрации характеризуется тем, что при откачке с постоянным дебитом наблюдается постоянное снижение депрессионной кривой. Причем в начальный этап откачки неустановившийся режим выражен очень резко. На втором этапе откачки движение подземных вод остается неустановившимся, но характер его значительно меняется – депрессионная кривая продолжает снижаться, но уровни, снижающиеся во времени, остаются параллельными самим себе (рис.).

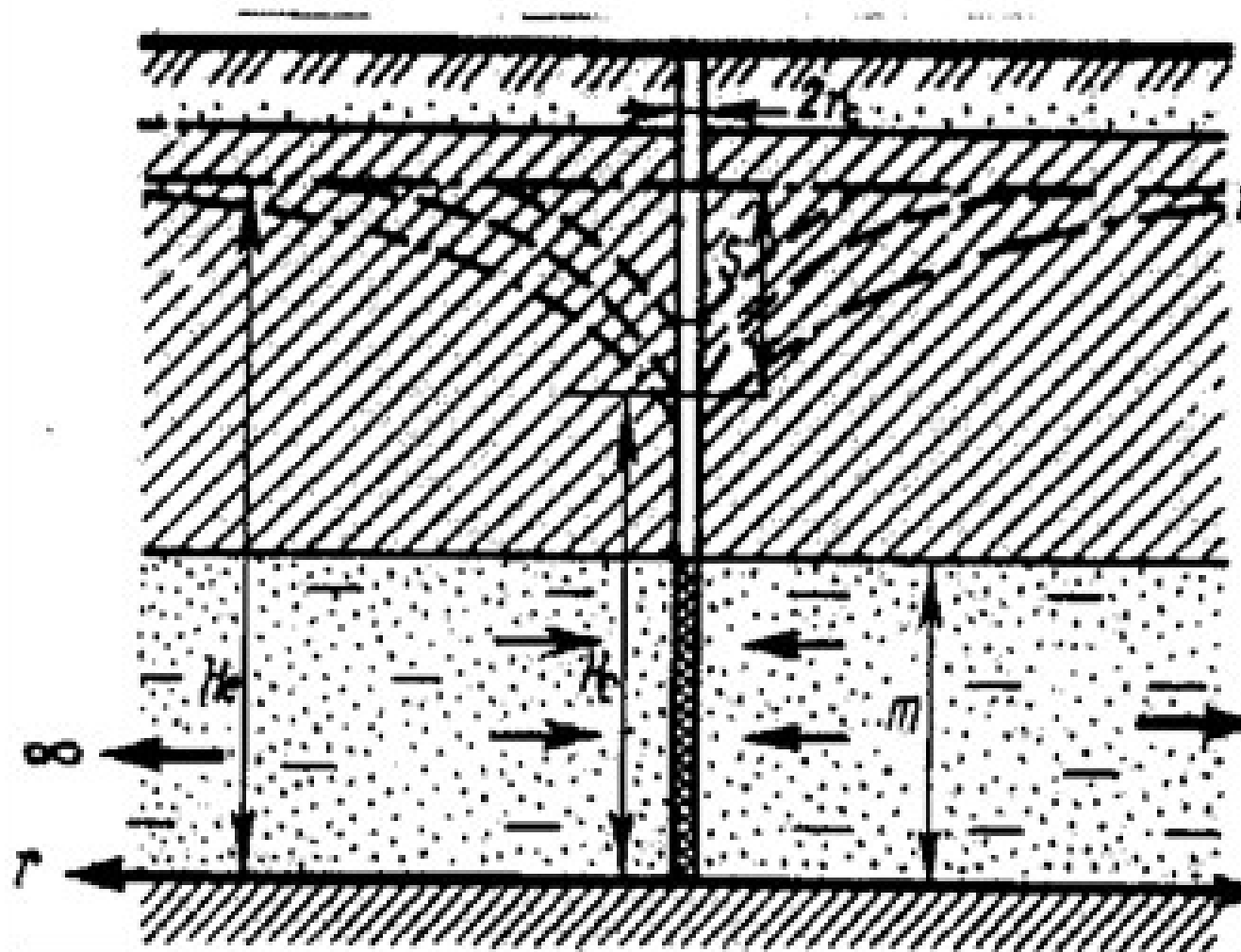


Рис. Совершенная артезианская скважина при квазистационарном режиме откачки

Режим подземных вод при опытных откачках в неограниченных напорных горизонтах в рыхлых отложениях формируется в результате проявлений упругого режима. Зависимость между понижениями уровня и временем описывается уравнением Тейса, имеющим следующий вид:

$$S = \frac{Q}{4Km} E_i\left(\frac{r^2}{4at}\right) \quad (5.12)$$

где S - понижение напора на расстоянии r от скважины, из которой проводится откачка, через время t после начала откачки;

Q - дебит откачки;

Km - водопроводимость водоносного горизонта;

a - коэффициент пьезопроводности;

E_i - интегральная показательная функция.

С возрастанием времени аргумент функции E_i уменьшается и при $\frac{r^2}{4at} \leq 0,1$ можно заменить ее с погрешностью менее 7,8 % и записать уравнение (5.12) в логарифмической формуле

$$\frac{Q}{4\pi k m r} \approx \frac{Q}{4\pi k m r} \ln \frac{4at}{r^2} \quad (5.13)$$

Начиная с того момента, когда интегральную показательную функцию можно заменить логарифмом на опытном участке и наступает квазистационарный режим фильтрации, а зона, в которой справедлива зависимость между понижением и временем, называется зоной (областью) квазистационарного режима. Время наступления квазистационарного режима определяется по формуле

$$t_0 \geq \frac{25r^2}{a} \quad (5.14)$$

Радиус зоны квазистационарного режима определяют по следующей зависимости:

$$r \leq \sqrt{5a} \quad (5.15)$$

Утверждение, что в напорном изолированном пласте понижение уровня через определенное время после начала откачки связано с логарифмом времени прямолинейной зависимостью, послужило основой графоаналитического метода определения расчетных параметров путем анализа графиков $S = f(\lg t)$. Действительно, зная, что при применении логарифмов умножение заменяется сложением, т.е. $\lg(ab) = \lg a + \lg b$ и, рассмотрев в этом аспекте уравнение (5.13), получим



Рассмотрев слагаемые этого уравнения, убедимся, что переменной величиной здесь является лишь время t . Таким образом обозначим постоянные

$$\frac{0,025}{\text{Km}} = C, \quad (5.17)$$

$$\frac{0,83}{\text{Km}} = C. \quad (5.18)$$

Тогда уравнение (5.16) примет вид

$$S = C \cdot t^2. \quad (5.19)$$

Это уравнение можно представить на графике $S = f(t)$ в виде прямой линии, отсекающей от оси ординат отрезок A и наклоненной к оси абсцисс с угловым коэффициентом $C = \text{tg} \alpha$ (рис. 5.5).

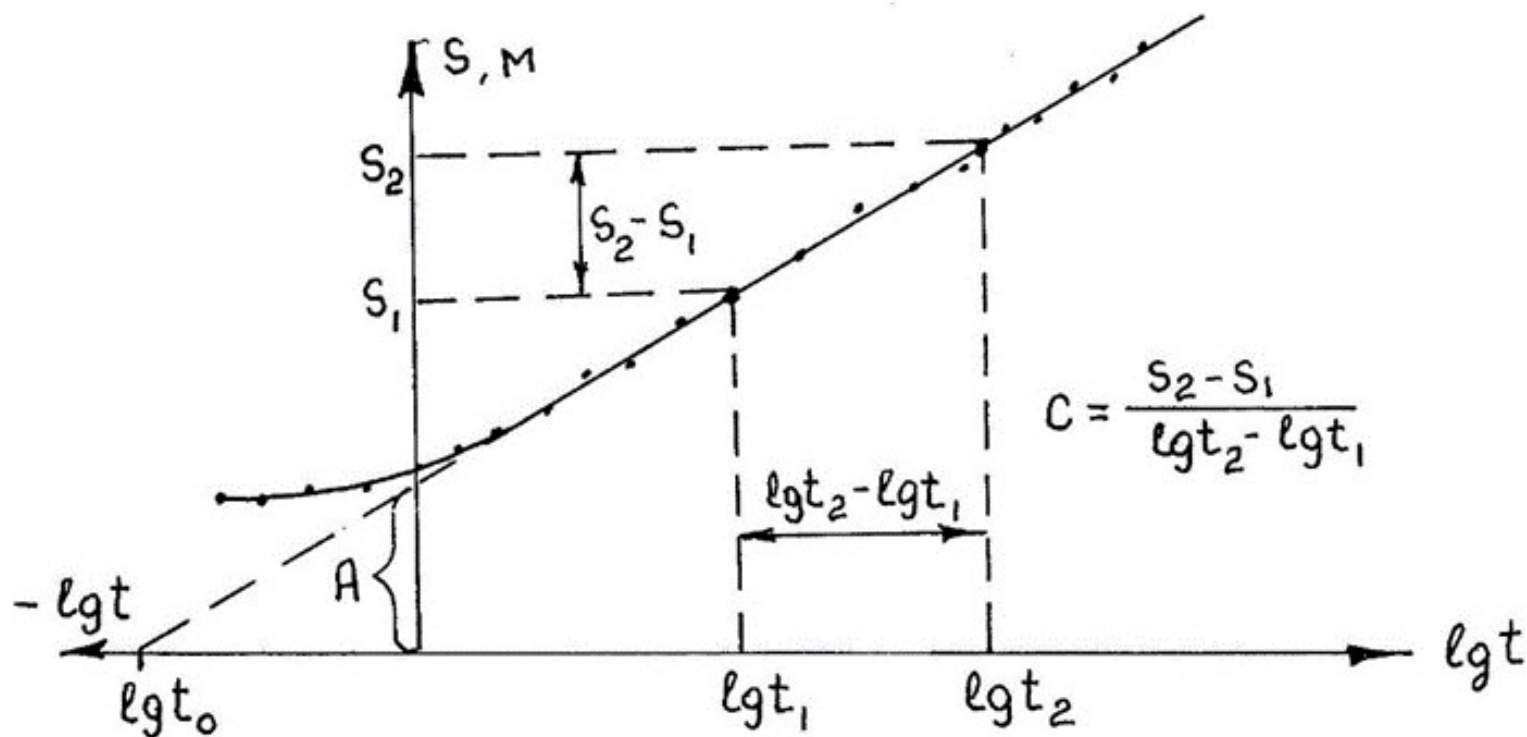


Рис. График изменения уровня в процессе откачки из бесконечного напорного пласта в координатах $S = f(\lg t)$ (график временного прослеживания)

Из уравнения (5.19), определяя уклон графика, можно оценить водопроводимость (5.20). Зная отрезок А, отсекаемый на оси ординат, и уклон С, можно найти коэффициент пьезопроводности (5.21)

$$K_{\text{п}} = \frac{Q \cdot S}{C}; \quad (5.20)$$

$$I = \frac{Q \cdot S}{C} \cdot \frac{1}{A}. \quad (5.21)$$

Еще раз вернемся к уравнению (5.13), с которым были проделаны преобразования и было получено уравнение (5.16)

$$\frac{Q \cdot S}{C} = \frac{I \cdot A}{K_{\text{п}}}. \quad (5.22)$$

Km

Обозначим постоянные

(5.24)

$$(5.25)$$

SAC.

$$(5.26)$$

Это уравнение представляется на графике $S = f(\lg r)$ прямой линией (рис. 5.6).

Значение параметров водоносных горизонтов определяется здесь следующим образом:

$$K_{\text{м}} \frac{Q B_0}{C}; \quad (5.27)$$

$$\lg \frac{\Delta B_0}{C}. \quad (5.28)$$

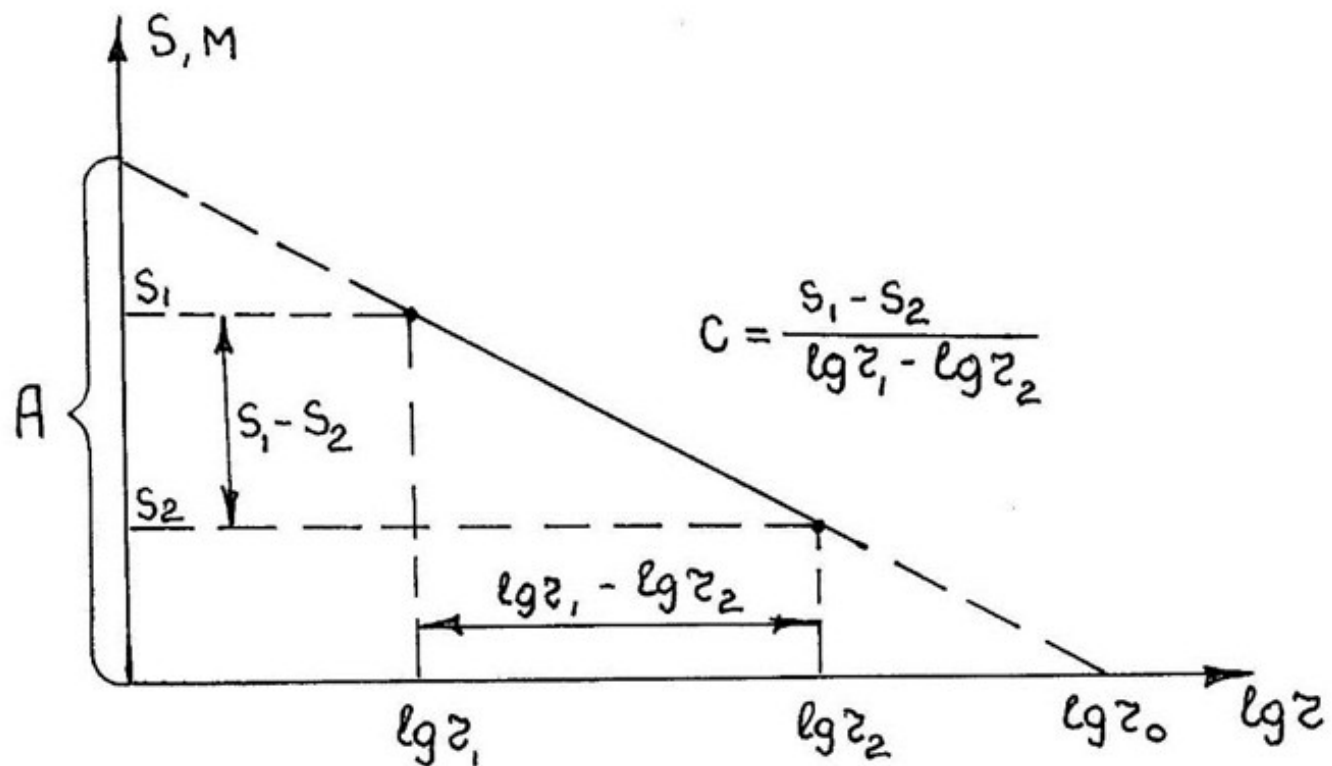


Рис. График изменения уровня в процессе откачки из бесконечного напорного пласта в координатах $S = f(\lg r)$ (график площадного прослеживания)

Осуществив преобразование уравнения (5.13) в следующем виде, получим:

$$S = A \cdot \frac{r^2}{t} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}}. \quad (5.29)$$

Отсюда

$$S = A \cdot \frac{r^2}{t} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}}. \quad (5.30)$$

Это уравнение представляется на графике $S = f(\lg(r^2/t))$ прямой линией (рис.5.7).

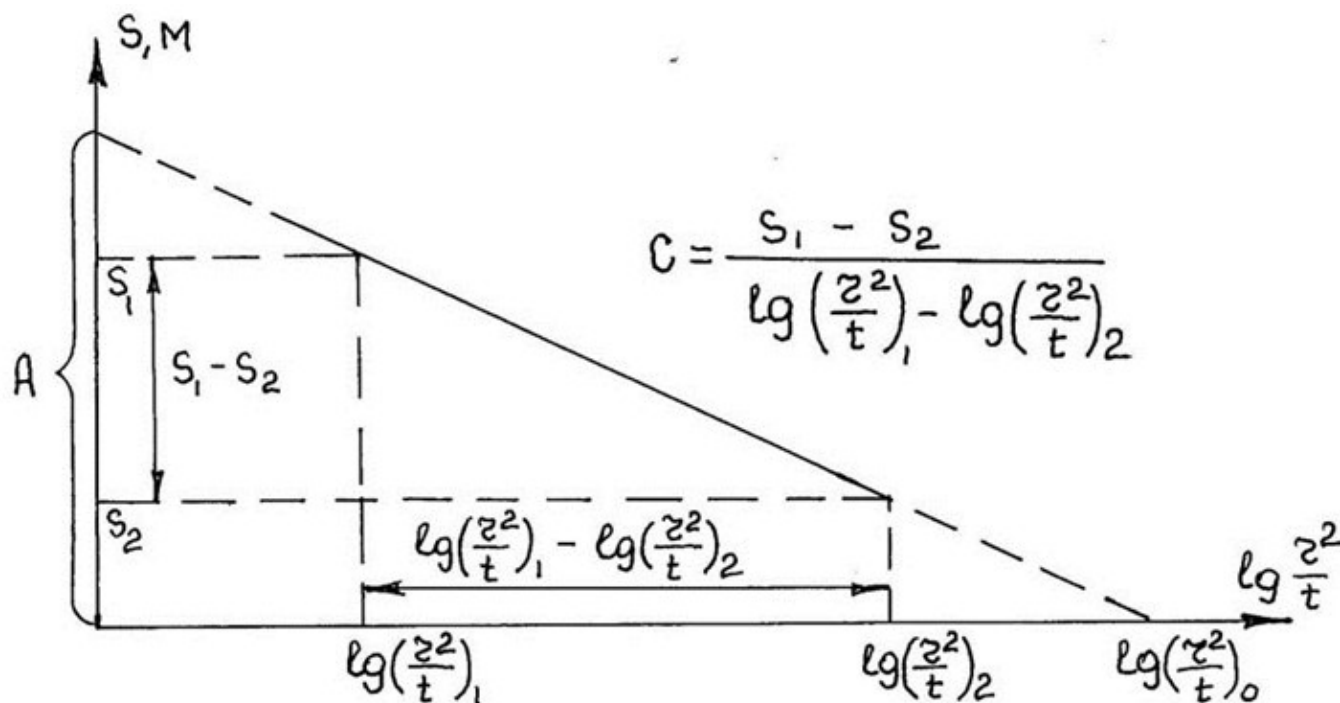


Рис. График изменения уровня в процессе откачки из бесконечного напорного пласта в координатах $S = f(\lg(r^2/t))$ (график комбинированного прослеживания)

Значения параметров водоносного горизонта рассчитываются в данном случае по следующим формулам:

$$K_m = \frac{Q_1 \cdot g}{C}; \quad (5.31)$$

$$I_g = \frac{A}{C} - Q_B. \quad (5.32)$$

В соответствии с тремя приведенными выше формулами исходных уравнений используются и три формы обработки данных опытных откачек. Использование уравнений (5.16), (5.19) и построение графика временного прослеживания ($S = f(lgt)$) возможно как при одиночных, так и при кустовых откачках. Для каждой фиксированной точки (скважины) может быть построен график, позволяющий проводить определение расчетных параметров.

Использование уравнений (5.23), (5.26), а также (5.29), (5.30) отображаемыми графиками площадного и комбинированного прослеживания возможно лишь при наличии достаточного количества наблюдательных скважин. Основной информацией для построения графиков являются единовременные замеры понижений в нескольких наблюдательных скважинах. При откачках из грунтовых водоносных горизонтов подход к определению параметров тот же, однако ось абсцисс заменяется на $(2H-S)S$ и строятся соответствующие графики с координатами $(2H-S)S = f(\lg t)$, $(2H-S)S = f(\lg r)$, $(2H-S)S = f(\lg(r^2/t))$.

Обработку материалов опытной откачки с постоянным дебитом начинают в полевых условиях с построения графиков изменения уровня подземных вод в опытной и наблюдательной скважинах в координатах $S = f(lgt)$ (рис.5.8).

На графике для наблюдательной скважины выделяется несколько участков:

- участок I соответствует начальному моменту откачки, квазистационарный режим не установился, точки наблюдения не лежат на прямой;**
- участок II соответствует квазистационарному режиму фильтрации и зависит только от свойств пород водоносного горизонта (граничные условия еще не влияют);**
- участок III возникает при деформации в связи с рядом факторов, обусловленных влиянием границ. Характер участка III несет информацию о граничных условиях водоносного горизонта в плане и разрезе.**

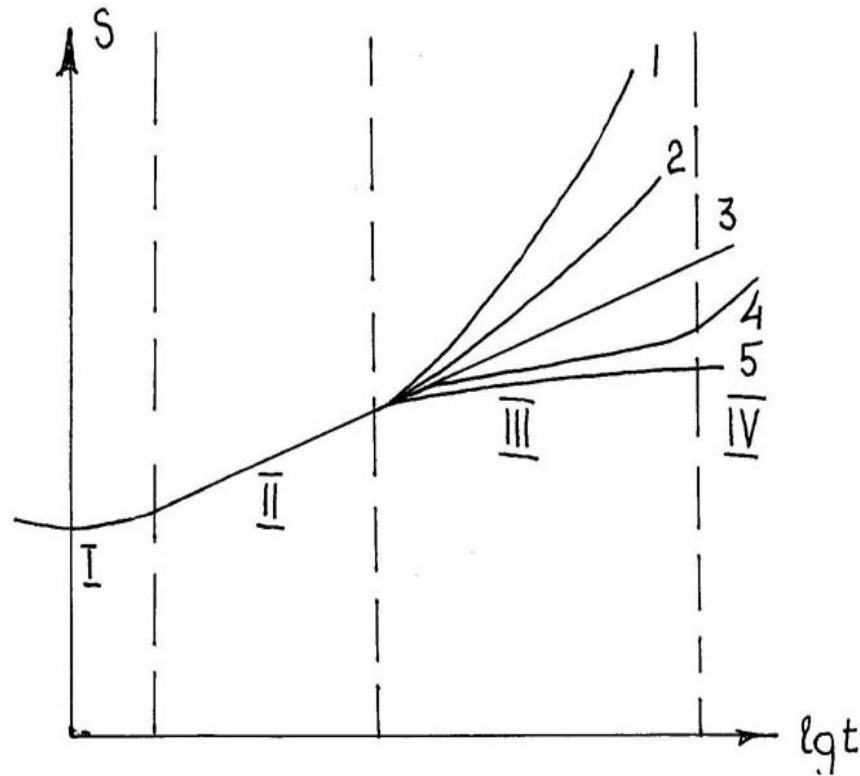


Рис. График изменения уровня в процессе откачки для различных схем (график временного прослеживания):

- 1 - пласт-полоса с непроницаемыми границами;
- 2 - полуограниченный пласт с непроницаемой границей;
- 3 - неограниченный пласт;
- 4 - двухслойный пласт с двойной пористостью;
- 5 - полуограниченный пласт с контуром постоянного напора или перетоком из пласта с постоянным напором

Рассмотрим несколько вариантов графиков и сделаем их анализ:

- 1) если график III прямолинеен и уклон его равен уклону на участке II, то пласт можно считать однородным и бесконечным (в пределах зоны влияния откачки) (рис., линия 3);**
- 2) если график III прямолинеен, но уклон его отличается от уклона II (рис., линия 2), то в пределах зоны влияния откачки имеется граница неоднородности (в данном случае – непроницаемая граница);**
- 3) если уклон графика III круче (рис., линия 1), чем, например, линия 2, то это может быть пласт-полоса с непроницаемыми границами;**
- 4) кривая 4 (рис.) указывает, что имеются две или более влияющих границ;**
- 5) кривая 5 (рис.) указывает на влияние границы с постоянным напором или перетоком из пласта.**

По завершении откачки осуществляется **наблюдение за динамикой восстановления динамического уровня**, по результатам которого определяются параметры водоносного горизонта.

Прекращение откачки или выпуска является возмущением, которое может быть рассмотрено как самостоятельный опыт.

Наблюдение можно вести как по центральной, так и по наблюдательной скважинам. При этом результаты определения параметров получаются более качественными, чем при откачках, так как исключаются сложности, связанные с техническими причинами.

Методика обработки результатов принимается та же, что и при откачке по методу временного прослеживания. Здесь лишь вместо понижения уровня берется его повышение от конечного динамического уровня при откачке. Время при построении графика берется от конца откачки, а за дебит принимается дебит скважины при откачке.

При не очень продолжительных откачках, проведенных с постоянным дебитом, обработка результата осуществляется с учетом продолжительности откачки. Уравнение, описывающее восстановление уровня, выглядит следующим образом:

$$S = \frac{Q}{4\pi k m T} \left(1 - \frac{t}{T} \right) \quad (5.32)$$

Водопроницаемость здесь определяется по формуле

$$k m = \frac{Q}{4\pi C} \quad (5.33)$$

Коэффициент пьезопроводности после несложных преобразований определяется по формуле

$$C = \frac{S_{\max}}{1 - \frac{t}{T}} \quad (5.34)$$

где C - угловой коэффициент;

$S_{\max}$ - максимальное понижение или максимальное восстановление уровня.

T - продолжительность откачки или выпуска;

t - продолжительность восстановления.

Для построения графика берется интервал времени от t_1 до t_2 , где $t_1 \leq 1,1t_0$, а $t_2 \leq 1,1t_1$. Таким образом, за начальную точку при построении графиков восстановления уровней принимается момент времени $t_1 \leq 1,1t_0$ (где t_0 - длительность откачки), а за конечную - момент времени, отвечающий условию $t_2 \leq 1,1t_1$.

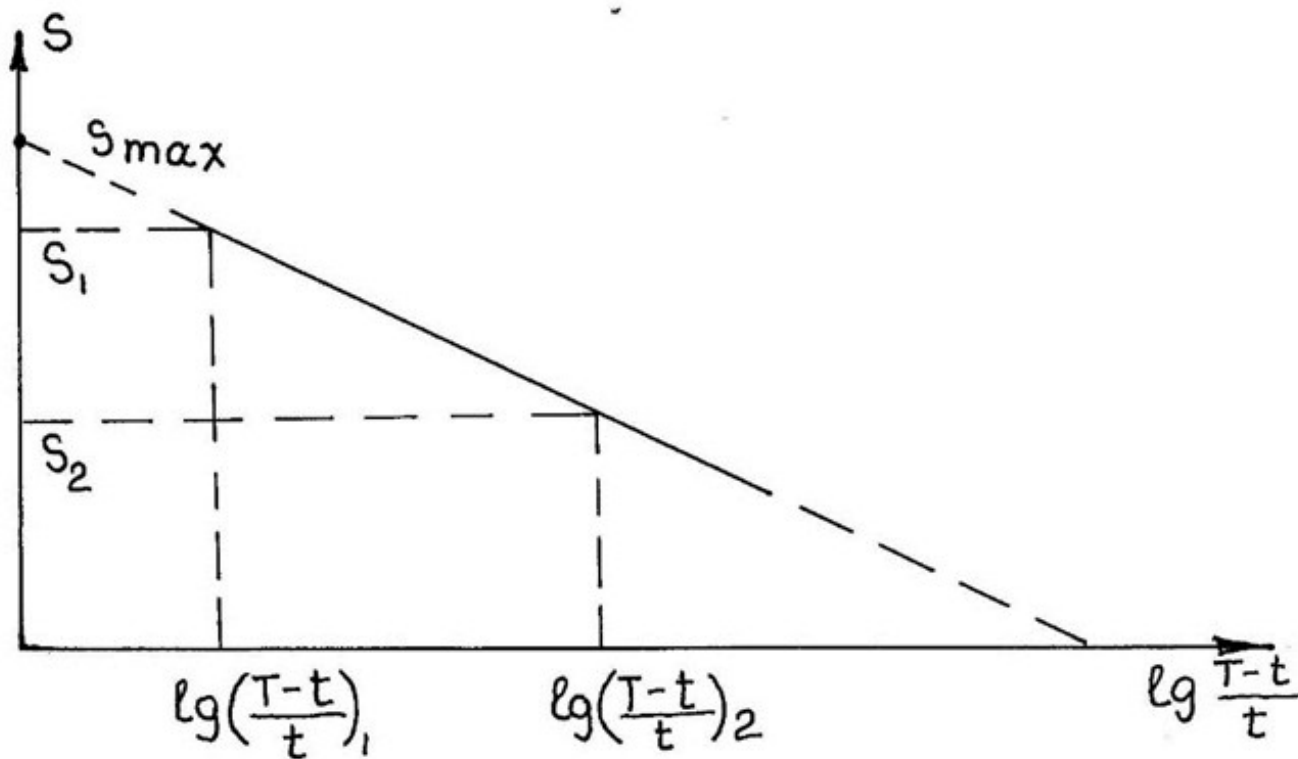


Рис. График изменения уровня при восстановлении в наблюдательной скважине в координатах $S = f(\lg((T-t)/t))$

**Проведение и обработка данных
откачек для изучения граничных
условий**

Для учета влияния границ фильтрационного потока в плане и взаимодействия скважин используется принцип сложения течений или суперпозиции. Согласно этому принципу, понижение уровня в любой точке пласта равно алгебраической сумме понижений во всех взаимодействующих скважинах.

Если есть в плане одна прямолинейная граница, то предполагается, что по другую ее сторону на таком же расстоянии от нее находится воображаемая скважина.

Если граница непроницаемая, то считается, что воображаемая скважина эксплуатируется с таким же дебитом, что и реальная (рис.) и влияет на снижение уровня в наблюдательной скважине 1.

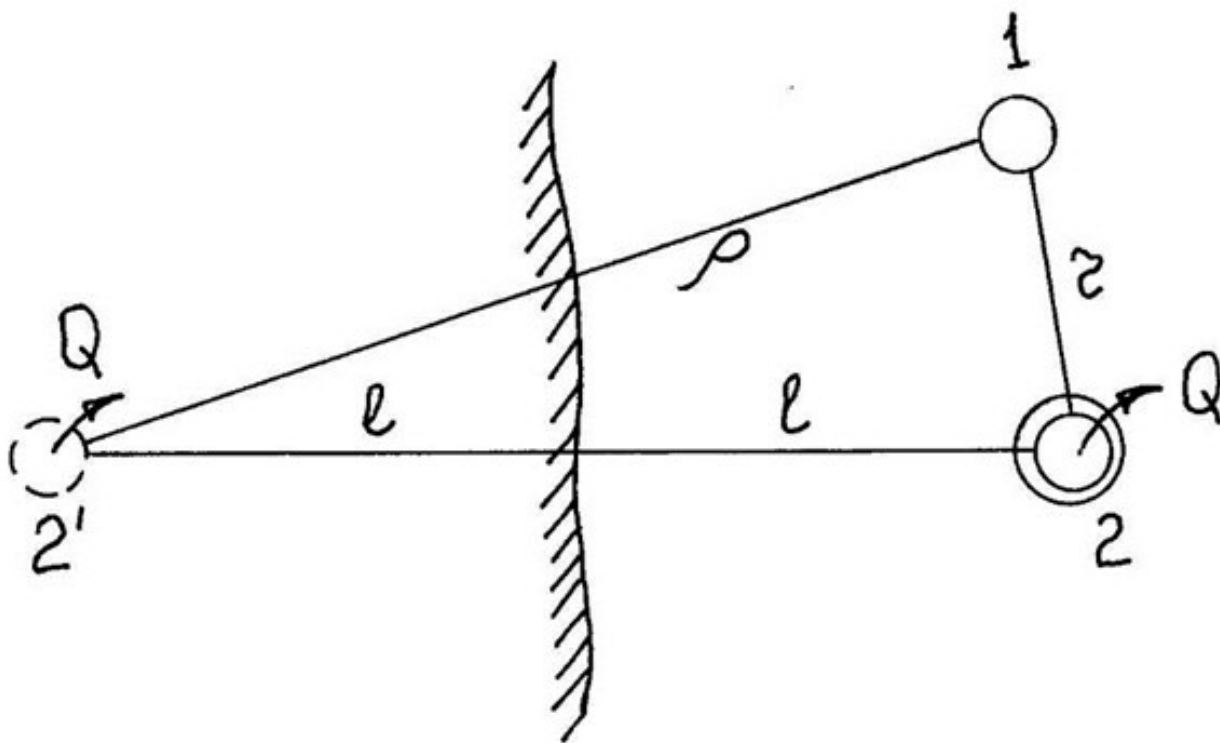


Рис. Схема к учету непроницаемой границы пласта: 1 - наблюдательная скважина;
 2 - центральная (возбуждающая) скважина; 2' - воображаемая (мнимо возбуждающая) скважина

Таким образом, понижение уровня в скважине 1 зависит от откачки из скважины 2 и мнимой откачки из скважины 2

$$h_1 = h_0 - \frac{Q}{4\pi T} \left(W(u_1) + W(u_2) \right) \quad (5.35)$$

В том случае, если границей является река или озеро (граница с постоянным напором), то воображаемая зеркально отраженная скважина работает как нагнетательная с производительностью, равной дебиту возмущающей скважины (рис. 5.11).

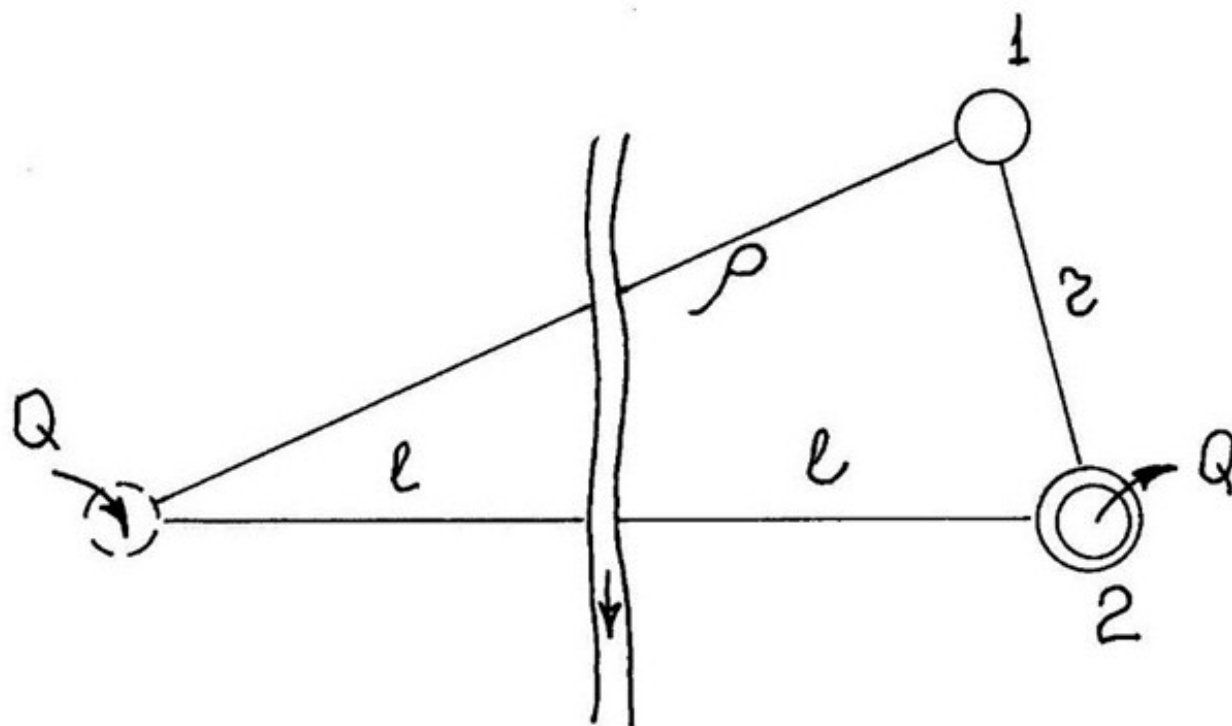


Рис. Схема к учету границы пласта с постоянным напором:

1 - наблюдательная скважина; 2 - центральная (возмущающая) скважина;
 2-- воображаемая (мнимо нагнетательная) скважина

Понижение уровня в скважине 1 зависит от откачки из скважины 2 (снижается) и от нагнетания (мнимого) в скважину 2', повышающего уровень. И если в первом случае (при непроницаемой границе пласта) понижение складывалось из суммы понижений от влияния реальной и мнимой скважин, то в этом рассматривается как разность влияний от откачивающей и нагнетающей скважин

$$h_1 - h_2 = \frac{Q}{4\pi kH} \sum_{n=1}^n \left(\ln \frac{r_{1n}}{r_{2n}} - \ln \frac{r_{1n}'}{r_{2n}'} \right)$$

(5.36)

Этот метод называется методом зеркальных отображений.

Зачастую опытные кустовые откачки проводятся для определения расстояния до непроницаемых границ или степени связи поверхностных и подземных вод.

Вопрос связи поверхностных и подземных вод часто стоит очень остро, так как от него зависит решение о выборе схемы водозабора вблизи водоемов (инфильтрационный водозабор). Для оценки такой связи проводится откачка вблизи водоема или реки, при этом определяются как параметры водоносных горизонтов, так и выявляются связи подземных и поверхностных вод.

В случае крупных водоемов (широкие реки и озера) степень связи между поверхностными и подземными водами характеризуют величиной Δl - эквивалентным удлинением при фильтрации за счет гидравлического сопротивления русловых отложений и искривления пути фильтрации. Величина Δl зависит от соотношения коэффициента фильтрации русловых отложений и пород основного пласта: чем меньше это соотношение, тем больше величина Δl .

Определять величину ΔI можно несколькими способами:

- по данным наблюдений за уровнем воды в реке и в водоносном горизонте в период межени и паводка;**
- по соотношению уровней в луче скважин, направленном к реке и др.**

При простых гидрогеологических условиях сооружаются кусты скважин вблизи реки. Обычно закладываются двухлучевые кусты с лучами, направленными вдоль и поперек реки. В каждом луче должно быть не менее двух наблюдательных скважин (рис.).

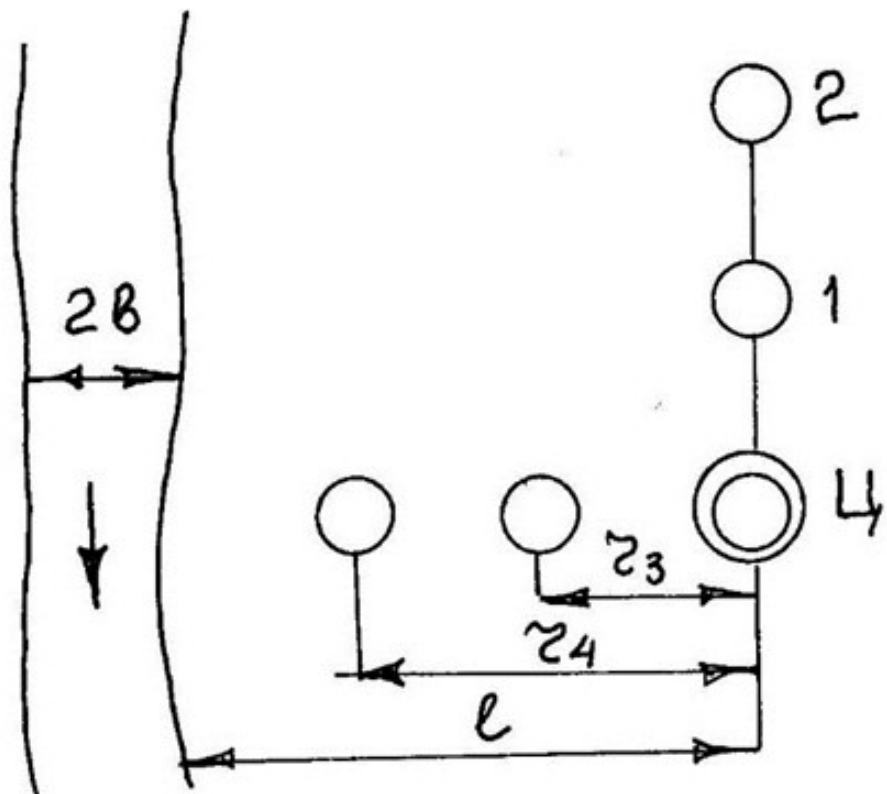


Рис. Схема куста скважин у реки

По скважинам 1 и 2 определяются параметры водоносного горизонта (коэффициент фильтрации, пьезопроводность и пр.).

По скважине 3 можно определить Δl из выражения

$$s_3 = \frac{Q}{4\pi k m_3} \left[\frac{2\pi \Delta l}{r_3} - W(u_3) \right] \quad (5.37)$$

В выражении (5.37) неизвестным является лишь величина Δl , которая определяется или методом подбора, или рассчитывается по формуле

$$\Delta l = \frac{1}{2} \left[\frac{2\pi k m_3 s_3}{W(u_3)} - r_3 \right] \quad (5.38)$$

При этом должно соблюдаться условие $l - r_3 \geq r_3$. Аналогично определяется Δl для скважины 4. Определив Δl , необходимо сделать выводы о связи подземных и поверхностных вод:

- при больших величинах Δl связь несовершенная;
- при малых величинах Δl связь совершенная.