

ВСЕСОЮЗНЫЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ВОДОСНАБЖЕНИЯ, КАНАЛИЗАЦИИ, ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ
СООРУЖЕНИЙ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОГЕОЛОГИИ
(ВНИИ ВОДГЕО) Госстроя СССР

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
по оценке фильтрационных параметров
слабопроницаемых пород при экспресс-опробовании
скважин

ВСЕСОЮЗНЫЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ВОДОСНАБЖЕНИЯ, КАНАЛИЗАЦИИ,
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОГЕОЛОГИИ
(БНИИ ВОДГЭС) ГОССТРОЯ СССР

УТВЕРЖДЕНЫ
директором института
чл.-корр. АН СССР
С. В. Яковлевым
8 октября 1986 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ОЦЕНКЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ ПОРОД ПРИ ЭКСПРЕСС-ОПРОБОВАНИИ СКВАЖИН

УДК 556.332.042.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ ПОРОД ПРИ ЭКСПРЕСС-ОПРОБОВАНИИ СКВАЖИН. М., ВНИИ ВОДГЕО, 1987, 48 с.
(Всеобщий ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрогеологии Госстроя СССР).

Рассмотрены вопросы о месте и роли экспресс-спробований скважин в оценке фильтрационных параметров слабопроницаемых отложений для целей прогноза подтопления застроенных территорий и разработке рекомендаций по их защите. Для различных гидрогеологических условий и конструкций фильтров скважин изложены теоретические основы методов, технология проведения спробований, методика обработки опытных данных и приведены примеры расчета параметров.

Рекомендации предназначены для изыскательских, проектных, и научных организаций, занимающихся вопросами борьбы с подтоплением застроенных территорий.

Табл. 4, илл. 16, библи. 5.

Рекомендации публикуются в соответствии с решением секции инженерной гидрогеологии научно-технического совета ВНИИ ВОДГЕО и редакционно-издательского совета института.

Методические рекомендации составлены к.т.н. Н.П.Курановым.
Научный редактор - д.т.н. В.С.Алексеев.

ВВЕДЕНИЕ

Одними из основных исходных данных для моделей прогноза подтопления являются гидрогеологические параметры, характеризующие фильтрационные свойства грунтов (горных пород) или гидродинамические свойства водоносных горизонтов. Гидрогеологические параметры рассчитываются по данным опытно-фильтрационных работ (ОФР) и стационарных гидрогеологических наблюдений на всех стадиях гидрогеологических исследований.

Основным методом определения фильтрационных параметров горных пород в соответствии с ГОСТом 23278-78 является кустовые откачки из скважин. Этот метод хорошо зарекомендовал себя для грунтов с коэффициентом фильтрации $k \geq 3 \cdot 10$ м/сут. Для определения фильтрационных параметров слабопроницаемых пород этот метод применяется большей частью только при наличии достаточно хорошей гидравлической связи между водоносными горизонтами в проницаемых и слабопроницаемых грунтах, когда откачка ведется из проницаемых отложений, а пьезометры устанавливаются как в проницаемых, так и слабопроницаемых отложениях. При этом при обработке данных, как правило, отмечается стабильность в определении параметров проницаемых отложений и большая чувствительность расчетных значений параметров слабопроницаемых грунтов к способам интерпретации опытных данных, что нередко приводит к большому разбросу значений этих параметров в зависимости от выбранного метода расчета. Проведение же кустовых откачек с установкой фильтров скважин непосредственно в слабопроницаемых отложениях осложняется низкой величиной притока к скважинам и малым радиусом влияния скважин, что при отсутствии маломощных погружных насосов серьезно сдерживает проведение такого рода работ. Если к тому же учесть, что для получения стационарного режима фильтрации длительность откачек из слабопроницаемых грунтов должна быть очень большой (десятки суток), то становится ясным, что при изысканиях под прогноз подтопления и разработку защитных мероприятий от воздействия грунтовых вод этот способ определения параметров далеко не всегда следует считать основным. Кроме того, вопросы борьбы с подтоплением застроенных территорий являются специфической областью динамики грунтовых вод не только потому, что здесь рассматривается фильтрация в слабопроницаемых грунтах, но и потому, что про-

цессы подтопления развиваются на территориях с большим числом выработок, обратных засыпок, пазух, свайных полей, коммуникаций. В этих условиях имеет место существенная плановая неоднородность фильтрационных свойств, которую можно выявить только такими способами как экспресс-опробование скважин. В пользу экспресс-методов определения параметров в слабопроницаемых грунтах говорят и исследования, выполненные во ВНИИ ВОДГЕО в 1983-1986 гг. по сравнению результатов методами кустовых откачек, одиночных откачек и экспресс-опробований скважин на территории различных крупных промышленных площадок страны и за рубежом, которые показали, что в слабопроницаемых грунтах с коэффициентом фильтрации $k \leq 1$ м/сут. экспресс-опробования скважин дают достаточно высокую точность определения параметров для целей прогноза подтопления и разработки защитных мероприятий от подтопления. Поэтому для определения фильтрационных параметров слабопроницаемых грунтов рекомендуется наряду с традиционными методами использовать экспресс-опробования скважин. Учитывая это обстоятельство и тот факт, что определение фильтрационных параметров традиционными методами широко освещено в литературе, ниже приводятся главным образом результаты новых разработок по определению фильтрационных параметров в слабопроницаемых грунтах экспресс-методами.

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.1. К экспресс-методам (экспресс-наливы или экспресс-откачки) опробования скважин здесь отнесены методы, при которых производится быстрее (в некоторых случаях теоретически "мгновенное") возмущение в скважине водоносного пласта с регистрацией изменения уровня воды в скважине.

Возмущение может осуществляться наливом фиксированного объема воды в скважину ("мгновенно" или за фиксированный момент времени) или изъятием его из скважины, опусканием под уровень воды в скважине емкости, вытесняющей определенный объем воды, и т.д.

I.2. Экспресс-методы позволяют с достаточной степенью точности и надежности получить значения фильтрационных параметров слабopоницаемых грунтов для целей прогноза подтопления и разработки мароприятий по защите заглубленных сооружений от воздействия грунтовых вод.

Важным преимуществом экспресс-методов является возможность проведения массового опробования скважин на значительной площади за короткое время при небольших материальных затратах, что позволяет получить значительную экономию средств и времени.

I.3. Экспресс-методы можно использовать для определения фильтрационных свойств как обводненных, так и необводненных слабopоницаемых пород.

I.4. Экспресс-методы могут быть использованы также для оценки состояния ранее пробуренных скважин, для определения степени несовершенства скважин, а также для оценки состояния и инерционности наблюдательных скважин.

Кроме того, экспресс-методы можно использовать для определения фильтрационных параметров в смежных областях (ирригация, хозяйственно-питьевое, промышленное и сельскохозяйственное водоснабжение и пр.).

I.5. Несовершенство опытных скважин обычно оценивается обобщенным показателем дополнительного сопротивления

$$\xi = \xi_0 + \xi_c,$$

в котором ξ_0 определяет сопротивление, обусловленное неполно-

той вскрытия пласта фильтром скважины с фильтрующей обсыпкой (не-совершенной по степени вскрытия пласта), а ζ_c является сум-марным сопротивлением, обусловленным конструкцией фильтра, изме-нением структуры и проницаемости пород в прискважинной зоне (не-совершенство по характеру вскрытия пласта).

Такой прием позволяет с достаточной степенью точности оп-ределять распределение напоров на расстоянии двух-трех мощнос-тей водоносного горизонта от скважины. При экспресс-опробованиях зона действия возмущений невелика и поэтому такой прием не явля-ется обоснованным. В связи с этим при экспресс-опробованиях сква-жин следует разделять несовершенство по степени вскрытия пласта и по характеру вскрытия пласта.

В данной работе, в соответствии с физическим смыслом про-цессов, несовершенство по характеру вскрытия пласта оценивается по методу фильтрационных сопротивлений, а несовершенство по сте-пени вскрытия - особенностью фильтрации в зоне возмущения.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕОБВОДНЕННЫХ СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ ПОРОД ПРИ ЭКСПРЕСС-ОПРОВАНИЯХ СКВАЖИН

2.1. Налив с постоянным расходом в совершенную скважину в однородной толще

2.1.1. Технология проведения экспресс-налива. Скважина проходится без промыв-ки до подошвы водопроницаемых пород (рис.1) и в неустойчивых (заплывающих) грунтах оборудуется фильтром на всю опробуемую вы-соту. В устойчивых грунтах установка фильтра необязательна. На-лив в скважину производится в режиме постоянного расхода Q_{const} . Одна из возможных схем устройства для подачи постоянного расхода представлена на рис.2. Величина расхода подбирается таким обра-зом, чтобы уровень воды в скважине за время налива (от 5 до 30 мин) поднялся до верхней отметки опробуемой толщи.

В процессе налива производится замеры уровня воды в скважи-не через определенные интервалы времени (в течение первых двух минут не менее 3-4 замеров в минуту, в последующее время - не ме-нее 1-2 замеров в минуту).

После окончания налива необходимо провести замеры понижения

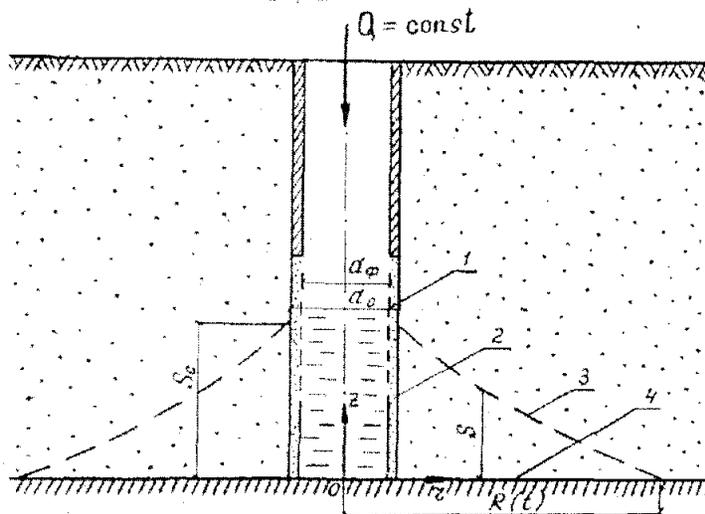


Рис. 1. Схема фильтрации при экпресс-наливе в совершенную скважину (необводненный грунт):
1 - фильтр скважины; 2 - фильтрующая обсыпка; 3 - уровень грунтовых вод; 4 - кровля водоупора

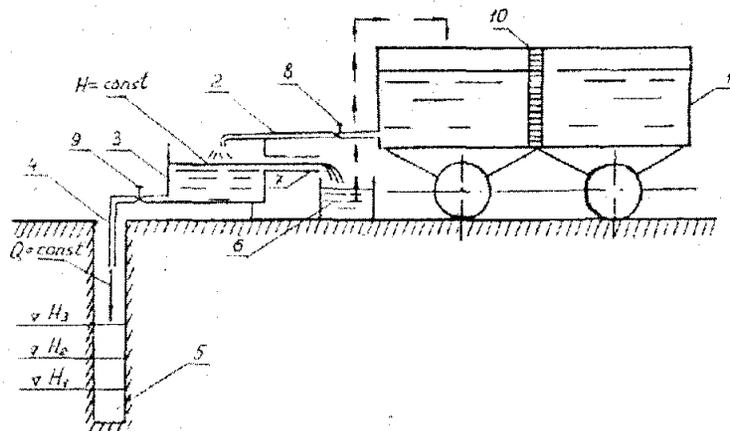


Рис. 2. Схема устройства для подачи постоянного расхода в опытную скважину:
1 - питающая емкость; 2 - питающий патрубок; 3 - регулирующая емкость; 4 - патрубок, подающий воду в скважину; 5 - сытная скважина; 6 - водосборная емкость; 7 - переходный патрубок; 8, 9 - регулирующие вентили; 10 - мерная рейка

(восстановления) уровня, при этом отсчет времени следует вести с момента прекращения налива. Методика замеров уровня воды в скважине при восстановлении уровня должна быть такой же, как и при наливе в скважину.

2.1.2. Теоретические основы метода. Расчетная схема совершенной скважины в однородной необводненной толще представлена на рис. 1. Для этой схемы математическая модель неустановившейся фильтрации представляется дифференциальным уравнением

$$\mu \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{k}{z} \frac{\partial}{\partial z} \left(z S \frac{\partial S}{\partial z} \right); \quad z_c \leq z \leq R(t); \quad t \geq 0 \quad (1)$$

и краевыми условиями

$$z = z_c, \quad -2\pi z_c k S \frac{\partial S}{\partial z} + \omega_T \frac{\partial S_c}{\partial t} = Q, \quad S_c = S; \quad (2)$$

$$z = R(t), \quad S = 0; \quad \mu \frac{\partial R}{\partial t} + k \frac{\partial S}{\partial z} = 0; \quad t = 0, \quad R(0) = z_c,$$

где k, μ - коэффициент фильтрации и недостаток насыщения пласта; $R(t)$ - граница растекания воды по водоупору; z_c - радиус скважины с учетом фильтрующей обсыпки; ω_T - площадь поперечного сечения ствола скважины в интервале, в пределах которого происходит возмущение; S и S_c - повышение уровня воды в пласте и в стволе скважины соответственно.

Решение этой задачи, после линеаризации исходного уравнения вторым способом, приближенным методом, предложенным Г.П. Гусейновым [1], для изменения уровня в стволе скважины может быть записано следующим образом:

$$S_c^2 = \frac{Q}{2\pi k} w_1(\tau; \mu);$$

$$\rightarrow w_1(\tau; \mu) = \frac{\mu \partial^2 \ln \partial^2 - \mu \partial^2 + \mu}{\mu \partial^2 + 1 - \mu}; \quad \partial = \frac{R}{z_c}; \quad (3)$$

$$\tau = 2\sqrt{\frac{kQ}{g}} \frac{t}{z_c^2} - \sqrt{\mu \partial^2 (\mu \partial^2 + 1 - \mu)} - \sqrt{\mu + 1 - \mu} \ln \frac{\partial \sqrt{\mu + 1 - \mu} + \sqrt{\mu \partial^2 + 1 - \mu}}{1 + \sqrt{\mu}}$$

Решение (3) рекомендуется использовать для расчета при $\tau \geq 1$.

Для скважины, не оборудованной фильтром, $\omega_r = \mathcal{F} z_c^2$. Если же скважина оборудуется травяным фильтром на колонне труб, радиуса z_ϕ , а обсыпка занимает кольцевое пространство толщиной $z_c - z_\phi$, то

$$\omega_r = \mathcal{F} z_\phi^2 + n (\mathcal{F} z_c^2 - \mathcal{F} z_\phi^2), \quad (4)$$

где n - пористость материала обсыпки. При отсутствии сведений о ее пористости величину n допустимо принимать равной 0,3.

2.1.3. Методика обработки данных. Для определения фильтрационных параметров k и μ пласта по данным экспресс-налива применяется метод эталонных кривых. В соответствии с этим методом по фактическим данным изменения уровней воды, в том числе и по восстановлению уровней после налива, строится на графике зависимость функции $\lg \frac{W}{S_0}$ от аргумента $\lg \frac{t}{t_{max}}$ в масштабе эталонных кривых $\lg W_i - \lg t$. Графики эталонных кривых представлены на рис.3. Накладывая эталонные кривые на факти-

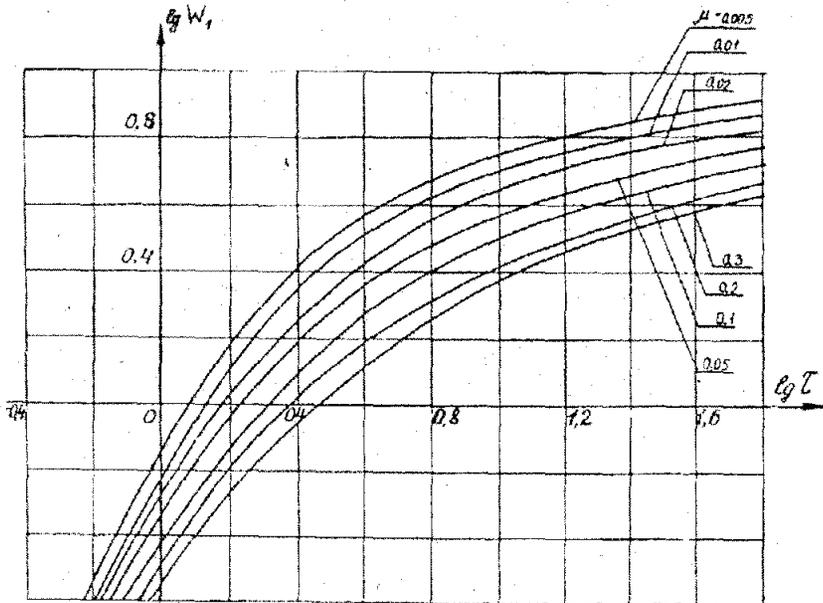


Рис.3. График функции $W(t)$

наименование объекта _____

№ скважины № 596

дата проведения опыта 7.04.91 г. (опит 1)

ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ СВАЖИНЫ

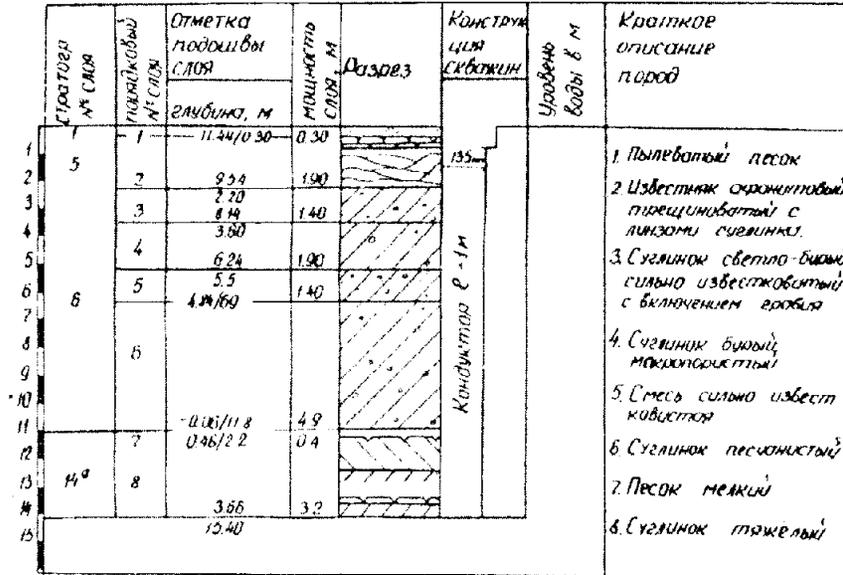


таблица исходных данных

d_c	d_p	ω_s	V	Q	S_0	t_{max}	мин.
м	м	м ²	м ³	м ³ /мин	м	мин	секунд
0.135	0.135	0.0143	0.457	0.0457	8.64	10	-

Обозначения:

r_c - радиус скважины, м; t_{max} - время налива (восстановления), мин; S_0 - максимальное повышение уровня воды в скважине при наливе, м; V - объем воды, залитый в скважину, м³; Q - расход воды при наливе, м³/мин.

Рис.4. Лист обработки результатов

ГРАФИК ПРОФИЛИРОВАНИЯ СЫТОВ

• - налив

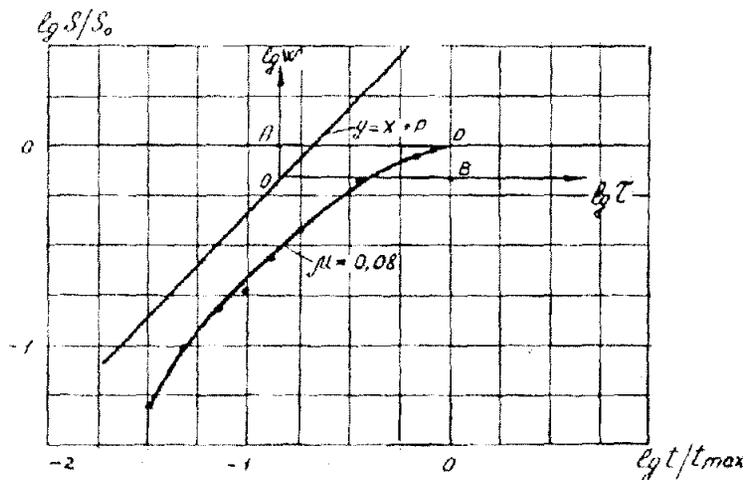


Таблица расчетных параметров

Вид сыта	$k, \text{м}^2/\text{мин}$	μ	A	B
Налив	0,33	0,08	-0,81	-0,18
Восстановл.	-	-	-	-

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

$$k = \frac{Q}{2\sqrt{t} S_0^2} 10^{-2B} \text{ - коэффициент фильтрации, м/мин;}$$

$$k = \frac{\omega_T}{2\sqrt{2} \sqrt{t} S_0 t_{max}} 10^{-A-B}$$

$$D = \lg \frac{B t_{max} \sqrt{2}}{\omega_T S_0}$$

спытного экспресс-налива в совершенную скважину

ческую и добиваясь наилучшего совмещения ее с одной из эталонных кривых, определяют координаты А и В начала координат подвижной (эталонной) системы в системе координат $lg(S/S_0)$, $lg t/t_{max}$ (см. рис.4). По этим значениям А и В, определяющим смещение абсцисс и ординат эталонной кривой от фактической, рассчитывается параметр

$$k = \frac{Q}{2\pi S_0^2} 10^{-2\mu} \quad \text{или} \quad k = \frac{\omega_T}{2\pi \sqrt{2} S_0 t_{max}} 10^{-\mu} \quad (5)$$

Величина μ соответствует той эталонной кривой, с которой проводится сравнение фактической кривой. Если значения k , рассчитанные по формулам (5), оказываются разными, то это означает, что эталонная кривая выбрана неудобно и следует провести совмещение с другой эталонной кривой и снова выполнить расчеты и т.д.

Для удобства и облегчения расчетов параметров рекомендуется использовать дополнительные построения, а именно: в системе координат $y = lg S/S_0$; $x = lg t/t_{max}$, в которой построена фактическая кривая изменения уровня воды в стаде скважины, строится прямая $y = x + \rho$, где $\rho = lg \frac{Q t_{max} \sqrt{2}}{\omega_T S_0}$ (рис.4).

Тогда система координат, в которой построены эталонные кривые, должна перемещаться таким образом по фактической кривой, чтобы соответствующие оси координат были параллельны, а начало координат перемещалось по прямой $y = x + \rho$. Добиваясь при таком перемещении эталонной системы координат наилучшего совпадения фактической и эталонной кривых, снимая координаты А и В и вычисляя коэффициент фильтрации по формулам (5), получают обязательно одинаковые значения коэффициента k по обеим формулам (5), что является критерием правильности выполнения вычислений.

Величина μ принимается равной тому значению, для которого эталонная кривая имела наилучшее совпадение с фактической.

2.1.4. Пример расчета параметров. В качестве примера рассмотрим расчет фильтрационных параметров по данным экспресс-налива в скважину на одном из объектов. Налив осуществлялся по схеме, приведенной на рис.2.

На рис.4 приведен геолого-технический разрез скважины. Там же имеется таблица исходных данных, куда заносятся основные количественные характеристики налива, необходимые для последующих расчетов.

Примем следующую последовательность выполнения расчетов параметров:

- 1) составляется геолого-технический разрез скважины;
- 2) строится график фактической кривой изменения уровня в скважине в системе координат $lg S/S_0 - lg t/t_{max}$;
- 3) заполняется таблица исходных данных по наливу;
- 4) в системе координат $lg S/S_0 - lg t/t_{max}$ строится прямая линия, отсекающая отрезки $- \rho$ и $+ \rho$ на оси абсцисс и ординат соответственно;
- 5) система координат $lg w_s - lg \tau$ с эталонными кривыми накладывается на график фактической кривой $lg S/S_0 - lg t/t_{max}$ восстановления уровня и определяются значения параметров A , B и μ ;
- 6) по формулам (5) ведется расчет коэффициента фильтрации k ;
- 7) по результатам расчетов заполняется таблица расчетных параметров (см.рис.4).

Геолого-технический разрез скважины составляется по материалам бурения и представлен на рис.4.

Для построения графика фактической кривой изменения уровня воды в скважине в дневнике наблюдений вначале составляется таблица зависимости S от t (табл.1).

Таблица I

Фактические данные по изменению уровня воды в скважине

Время от начала лива t , мин	Повышение в стволе скважины S_c , м	Время от начала лива t , мин	Повышение в стволе скважины S_c , м	Время от начала лива t , мин	Повышение в стволе скважины S_c , м
0,33	0,38	1,33	1,95	5,62	6,60
0,50	0,75	1,76	3,04	6,31	7,13
0,75	1,26	3,16	4,61	8	7,80
1	1,52	4,0	5,70	9	8,42
				10	8,64

В соответствии с табл. I общее время налива $t_{max} = 10$ мин, а повышение уровня в этот момент $S_0 = 8,64$ м.

В соответствии с этим строится график проведения опытов (рис. 4) в системе координат $lg S/S_0 - lg t/t_{max}$ в том же масштабе, что и графики эталонных кривых $lg W_i - lg t$ (рис. 3).

После построения графика заполняется таблица исходных данных по наливу. В ней a_c , a_φ берутся по геолого-техническому разрезу скважины ($a_c = a_\varphi = 0,135$ м). Величина ω_T определяется по формуле (4), т.е.

$$\omega_T = \pi a_c^2 = \pi \left(\frac{0,135}{2} \right)^2 = 0,0143 (м^2).$$

Объем воды V , затраченный при наливе, определялся с помощью мерной линейки и составил $0,457$ м³. При этом расход был $Q = \frac{V}{t_{max}} = \frac{0,457}{10} = 0,0457$ м³/мин.

После этого рассчитывается величина

$$\rho = lg \frac{Q t_{max} \sqrt{2}}{\omega_T S_0} = lg \frac{0,0457 \cdot 10 \sqrt{2}}{0,0143 \cdot 8,64} \approx 0,707.$$

Таким образом, таблица исходных данных оказывается заполненной.

После этого на оси $lg t/t_{max}$ откладывается отрезок $\rho = -0,707$, а на оси $lg S_c/S_0$ - отрезок $\rho = 0,707$ и через концы этих отрезков проводится прямая линия.

Графики эталонных кривых $lg W_i - lg t$ (рис. 3) должны быть нанесены отдельно на кальку. Эту кальку следует наложить на график фактической кривой таким образом, чтобы начало координат эталонных кривых перемещалось по построенной прямой линии, а соответствующие оси двух систем координат были параллельны. При этом наилучшее совпадение фактической кривой с эталонной получается для кривой с $\mu = 0,08$ (см. рис. 4).

Начало координат эталонной системы оказалось в точке с координатами $x_0 = A = -0,81$ и $y_0 = B = -0,18$. Вычисление коэффициента фильтрации производится по формулам (5):

$$k = \frac{0,0457}{2\pi \cdot 8,64} \cdot 10^{-2(-0,18)} \cdot 1,440 = 0,33 \text{ м/сут.}$$

Таким образом,

при обработке данных получены значения $k = 0,33$ м/сут. и $\mu = 0,08$.

2.2. Налив с постоянным расходом в гидродинамически совершенную скважину в однородной толще с учетом несовершенства по характеру вскрытия пласта

2.2.1. Технология проведения экспресс-налива полностью соответствует изложенной в п.2.1.1.

2.2.2. Теоретические основы метода. Расчетная схема гидродинамически совершенной скважины с учетом несовершенства по характеру вскрытия пласта соответствует математической модели, включающей в себя уравнение (1) с крайними условиями:

$$z = z_c - 2\pi z_c k S \frac{\partial S}{\partial z} + \omega \frac{\partial S}{\partial z} = 0; \quad S_c = S - \xi_c \frac{z_c}{2} \frac{\partial S}{\partial z};$$

$$R = R(t), S_0 = 0; \quad \mu \frac{dR}{dt} + k \frac{\partial S}{\partial z} = 0; \quad R(0) = z_c,$$

$$l = 0,$$

здесь ξ_c - сопротивление на несовершенство по характеру вскрытия пласта. Остальные обозначения соответствуют обозначениям в п.2.1.2.

Решение этой задачи методом Г.И. Гусейнова / 1 / для изменения уровня в стволе скважины может быть записано следующим образом (при $\mu \ll 1$):

$$S_c^2 = \frac{Q}{2\pi k} w_1(\tau; \mu \xi); \quad \mu \xi = \mu e^{-\xi_c/2}; \quad (6)$$

где функция $w_1(\tau; \mu \xi)$ определяется по формуле (3).

Формула (6) показывает, что уровень воды в скважине зависит от параметра $\mu \xi = \mu e^{-\xi_c/2}$, учитывающего в комплексе как недостаток насыщения грунтов, так и фильтрационное сопротивление ξ_c . С физической точки зрения это означает, что в несовершенной по характеру вскрытия пласта скважине подъем уровня при наливке идет так же, как и в совершенной скважине, но в грунтах с приведенной (меньшей) величиной недостатка насыщения $\mu \xi$.

2.2.3. Методика обработки опытных данных полностью соответствует методике, изложенной в п.2.1.3. При этом вместо парамет-

ра μ определяется параметр $\mu_f = \mu e^{f_c/2}$. Раздельно параметры μ и μ_f могут быть найдены только в том случае, если один из них известен из каких-либо других сведений. Тогда

$$\mu = \mu_f e^{-f_c/2}; \quad f_c = 2 \lg \frac{\mu}{\mu_f} \quad (7)$$

2.2.4. Пример расчета параметров. Рассмотрим тот же пример, который приведен в п.1.4, считая, что величина недостатка насыщения суглинков, в которые осуществлялся налив, известна из других опытных работ (например, наливы в шурфы) и равен $\mu = 0,1$.

Параметры в этом примере рассчитываются как и в п.2.1.4. В результате этого расчета найдены значения $\epsilon = 0,33$ м/сут и $\mu_f = \mu e^{f_c/2} = 0,08$, где f_c - сопротивление, обусловленное изменением структуры и проницаемости пород в прискважинной зоне.

Величина f_c находится по формуле (7):

$$f_c = 2 \lg \frac{\mu}{\mu_f} = 2 \lg 1,25 = 0,46.$$

2.3. Экспресс-налив в гидродинамически несовершенную скважину (работа дном)

2.3.1. Технология проведения экспресс-налива. Данный метод предлагается использовать вместо традиционного, более дорогостоящего метода налива в шурфы / 2 /. В скважину заданной глубины устанавливаются две концентрически расположенные трубы с отношением диаметров примерно равным 1:2. При этом роль внешних труб могут играть обсадные трубы.

Диаметр внутренней колонны должен быть не менее 100-200 мм. Колонны вдавливают в пиробуемую породу на 5-10 см, забой скважины защищают, насыпают на него крупнозернистый песок или мелкий щебень толщиной слоя 3-5 см. Налив осуществляют в кольцевой зазор между колоннами труб. В стенке трубы внутренней колонны на расстоянии около 2-х метров от забоя должны быть отверстия, через которые вода из кольцевого зазора переливается во внутреннюю

колонну. После выравнивания уровня воды в обеих колоннах подачу воды прекращают и наблюдают за снижением уровня воды во внутренней трубе. Наблюдения можно прекращать, когда уровень в трубе снизится до $0,2M$ для песков и $0,1M$ для суглинков, где M - мощность опробуемого слоя.

2.3.2. Теоретические основы метода. Расчетная схема скважины при работе дном в однородной неоднородной толще представлена на рис.5. Для этой схемы высота столба воды в стволе скважины определяется уравнениями:

$$\mu \frac{d\ell}{dt} = k \frac{H + H_k + \ell}{\ell}; \quad \mu \ell = H_0 - H = S_c; \quad \ell(0) = 0, \quad (8)$$

где H - высота столба воды в скважине в момент времени t ; H_0 - начальная высота столба воды в скважине; H_k - максимальная высота капиллярного поднятия; μ - недостаток насыщения; k - коэффициент фильтрации.

Решение этой задачи может быть записано в виде:

$$T = \frac{k(1-\mu)t}{\mu} = w_k - \ln(1 + w_k); \quad (9)$$

$$\mu_k = \frac{\mu(H_0 + H_k)}{1 - \mu}; \quad w_k = \frac{S_c}{\mu_k}$$

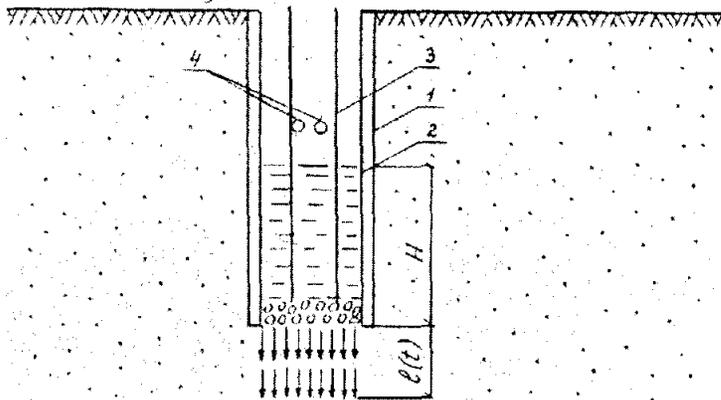


Рис.5. Схема налива в гидродинамически несовершенную скважину (фильтрация через дно):
1 - ствол скважины; 2 - обсадная труба; 3 - опускная труба для налива воды; 4 - перфорация опускной трубы

На рис. 6 приведена эталонная кривая в системе $\lg W_k - \lg T$.
 2.3.3. Методика обработки опытных данных. Для определения фильтрационных параметров k и μ пласта по данным экспресс-налива применяется метод эталонных кривых.

Фактическая кривая изменения уровня в скважине строится в системе $\lg S_c - \lg t$.

Для определения параметров на фактическую кривую накладывается эталонная кривая параллельным перемещением соответствующих координатных осей.

При наилучшем совпадении эталонной и фактической кривых определяются координаты A и B точки O (т.е. начала координат) эталонной системы в системе $\lg S_c - \lg t$ (см. рис. 7).

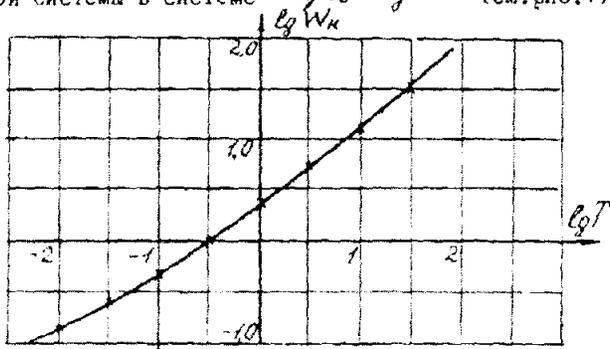


Рис. 6. График эталонной кривой $\lg W_k$ от $\lg T$

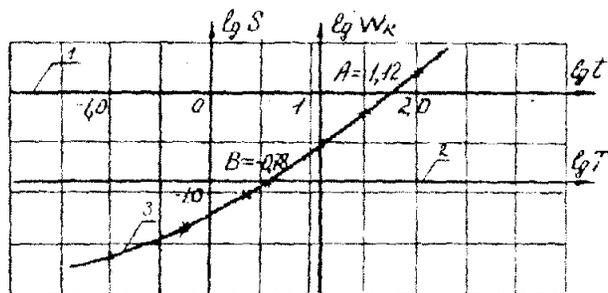


Рис. 7. К методике определения параметров A и B

- * - экспериментальные данные;
- 1 - система координат, в которой наносятся фактические данные;
- 2 - подвижная система координат с эталонной кривой 3

После этого вычисляется μ_k и k_0 :

$$\mu_k = 10^A; \quad k_0 = \frac{k(1-\mu)}{\mu_k} = 10^{-A}, \quad (10)$$

а затем

$$\mu = \frac{\mu_k}{\mu_k + H_0 + H_k}; \quad k = \frac{\mu_k}{1-\mu} k_0 \quad (11)$$

После выполнения расчетов рекомендуется провести сверку эталонной кривой с фактической с учетом того, что на фактической кривой принимаются во внимание только те точки, для которых

$$S_c \geq \mu M, \quad \text{где } M - \text{мощность опробуемого слоя.}$$

Отметим, что по данной методике можно определить еще величину капиллярного напора H_k , если по окончании опыта разбурить грунт, куда осуществлялся налив, и определить по данным о глубине промачивания величину μ известными способами / 2 /.

Тогда

$$H_k = \frac{\mu_k(1-\mu)}{\mu} - H_0 \quad (12)$$

2.3.4. Пример расчета параметров.

Зона аэрации сложена аллювиальными отложениями, которые с глубины от 6 до 10 м представляют собой относительно однородные суглинки.

Скважина глубиной 7 м обсажена трубой с внутренним диаметром 350 мм. Забой скважины тщательно зачищался, после чего в ней соосно обсадной трубе устанавливалась труба с перфорацией на расстоянии 2 м от низа, диаметром 150 см, которая задавливалась на 10 см, после чего забой во внутренней трубе снова тщательно зачищался, мелкие частицы отсасывались компрессором и в скважину засыпалось 4 дм³ песчано-гравийной смеси.

В кольцо между трубами на дно скважины опускался шланг, по которому подавалась вода. В течение 2-3 минут во внутренней трубе уровень воды достиг отметок перфорации $H_0 = 2,10$ м, после чего подачу воды прекратили. С момента прекращения подачи воды хлопущей фиксировался уровень во внутренней трубе. Данные замеров, обработанные в системе координат $\lg S_c$ от $\lg t$, представлены на

рис.7. При этом масштаб, в котором строился график этой кривой, соответствовал масштабу эталонной кривой $lg W_k$ от $lg t$.

При наложении эталонной кривой на фактическую (рис.7) определяли координаты начала координат эталонной системы в системе $lg S_c - lg t$, т.е. числа А и В. При этом оказалось А = 1,12, В = -0,78.

Вычисление по формулам (10) дало следующие результаты:

$$\mu_k = 10^{-0,78} = 0,163;$$

$$k_0 = 10^{-1,12} = 0,076.$$

Для расчета μ и k по формулам (11) необходимо знать значение H_k .

В рассматриваемом случае можно принять $H_k = 1$ м.

Тогда расчеты по формулам (11) дают:

$$\mu = \frac{0,166}{0,166 + 2,10 \cdot 1} = 0,05; \quad k = \frac{0,166}{1 - 0,05} \cdot 0,076 = 0,0133 \text{ м/сек} = 0,35 \frac{\text{м}}{\text{сут}}$$

2.4. Экспресс-налив в необходимый слабопроницаемый слой или линзу небольшой мощности

2.4.1. Технология проведения опыта. Для производства экспресс-наливов в необходимый слабопроницаемый слой или линзу небольшой мощности скважина проходится без промывки до крошки этого слоя с заглублением в него на 0,2-0,4 м (рис.8), после чего на всю глубину обсаживается глухими трубами. Обсадная труба на 0,3-0,5 м вдавливается в слабопроницаемый слой. Забой скважины зачищают, насыпают на него крупнозернистый песок или мелкий щебень слоем толщиной 3-5 см.

В скважину производят разовый налив воды в объеме, обеспечивающем подъем уровня в трубе на высоту более 1 м (рекомендуется высота 2-3 мощности опробуемого слоя, при неглубоком залегании слабопроницаемого слоя налив можно осуществлять до устья скважины). После прекращения налива проводят наблюдения за изменением уровня в стволе скважины. Наблюдения можно прекращать при снижении уровня в стволе скважины на высоту, равную половине мощности опробуемого слоя.

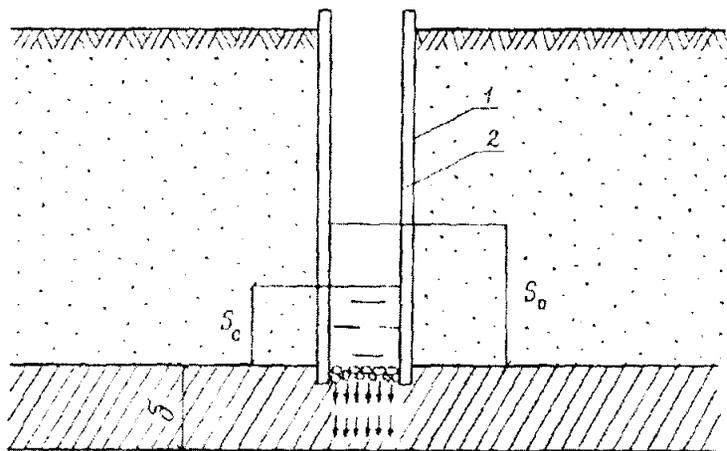


Рис.8. Схема налива в скважину для определения коэффициента фильтрации необходимого слабопроницаемого прослоя:
 1 - ствол скважины; 2 - обсадная труба;
 3 - песчано-гравийный прослой

2.4.2. Теоретические основы метода. Фильтрация через слабопроницаемый слой происходит главным образом в вертикальном направлении и поэтому математическая схема для расчета снижения уровня в скважине выглядит следующим образом:

$$v_z = \frac{dS_c}{dz} = k_z \frac{dh}{dz} = k_z \frac{S_c + \delta}{\delta}; \quad (13)$$

$$S_c(0) = S_0,$$

где S_c - повышение уровня в стволе скважины над кровлей слабопроницаемого слоя; S_0 - начальное повышение уровня в стволе скважины; δ - мощность опробуемого слоя; v_z, k_z - соответственно скорость и коэффициент фильтрации в вертикальном направлении.

Решение задачи (13) записывается в виде:

$$S_c = S_0 e^{-\frac{k_z}{\delta} t} - \delta \left(1 - e^{-\frac{k_z}{\delta} t}\right). \quad (14)$$

2.4.3. Методика обработки опытных данных. При обработке данных наблюдений за снижением уровня в скважине необходимо знать мощность δ опробуемого слабопроницаемого слоя. Ее можно определять предварительно по геологическому разрезу или непосредственно добуриванием скважины до подошвы слоя после окончания налива.

Результаты обрабатывают в соответствии с требованием "Листа обработки результатов опытного налива" (см. рис. 9). Для этого по результатам наблюдений строится график $ln \frac{S_0 + \delta}{S_c + \delta}$ от t в виде прямой линии и определяется тангенс угла α наклона этой прямой к оси t .

Коэффициент фильтрации определяется по формуле

$$k_z = \delta \operatorname{tg} \alpha \quad (15)$$

При аппроксимации опытных точек прямой линией следует исключать из рассмотрения точки в первые периоды времени, когда снижение уровня в стволе не превосходит десятой части мощности опробуемого слоя, т.е. $S_0 - S_c = 0,1\delta$.

2.4.4. Пример расчета параметров. Скважина была пройдена и оборудована в соответствии с технологией, описанной в п. 2.4.1. Мощность слабопроницаемого слоя 0,5 м. Диаметр скважины 350 мм. В скважину произвели налив воды высотой столба 4,5 м. После прекращения налива велось наблюдение за снижением уровня в скважине. Результаты наблюдений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Изменение столба воды в скважине

t , сут.	0	1	2	3	4	5
S , м	4,5	4,32	4,20	4,05	3,90	3,76

На рис. 9 приведен график снижения уровня воды в скважине во времени в системе $ln \frac{S_0 + \delta}{S_c + \delta}$. Этот график построен по данным табл. 2. По графику получаем $\operatorname{tg} \alpha = 0,032$. Тогда по формуле (15)

$$k = 0,5 \cdot 0,032 = 0,016 \text{ м/сут.}$$

Наименование объекта _____

Дата проведения опыта _____

№ скважины _____

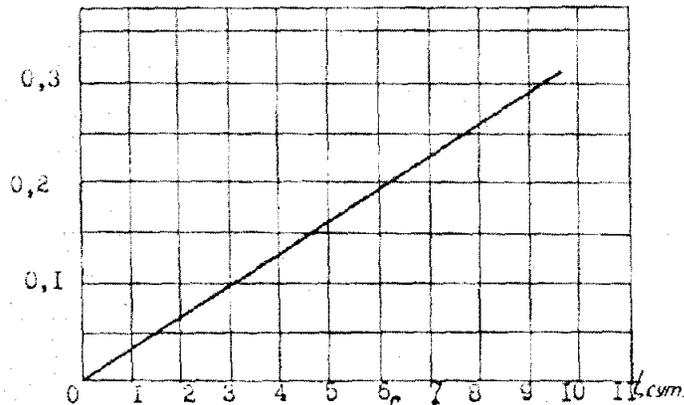
Таблица исходных данных

№№ п/п	d_c м	δ м	S_0 м	$tg \alpha$
I	0,35	0,5	4,5	0,032

$$k = 0,016 \text{ м/сут}$$

$$ln \frac{S_0 + \delta}{S_c + \delta}$$

Графики проведения опытов



Расчетные формулы: $k = \delta tg \alpha$; $tg \alpha = \frac{ln \frac{S_0 + \delta}{S_c + \delta}}{t}$

Условные обозначения:

k - коэффициент фильтрации, м/сут.; d_c - диаметр скважины, м; S_0 - максимальное повышение уровня воды в скважине при наливе, м; S_c - повышение уровня воды (в м) в скважине при наливе на момент времени t ; δ - мощность слабопроницаемого прослоя, м

Рис.9. Лист обработки результатов опытного налива в скважину в условиях ее работы дном в необводненных грунтах

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБВОДНЕННЫХ СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ ПОРОД ПРИ ЭКСПРЕСС-ОПРОВОДАНИИ СКВАЖИН

3.1. Опробование совершенной скважины в режиме постоянного расхода

3.1.1. Технология проведения экспресс-опробования. Скважина проходится до кровли (рис.10) водоупора. Если ствол скважины заплывает при опробовании (наливе или откачке), то она оборудуется фильтром с фильтрующей обсыпкой на всю опробуемую мощность водоносного горизонта. В противном случае скважина может не оборудоваться фильтром.

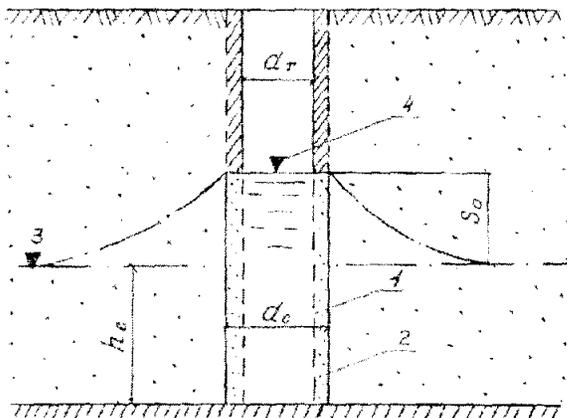


Рис.10. Схема налива воды в совершенную скважину:
1 - фильтр скважины; 2 - фильтрующая обсыпка;
3 - уровень грунтовых вод до налива; 4 - максимальный уровень воды в скважине при наливе

Налив или откачку производят в режиме постоянного расхода $Q = const$. Величина расхода подбирается таким образом, чтобы понижение (повышение) в стволе скважины за время опробования (от 5 до 60 мин) было в пределах $1 \text{ м} \leq \delta \leq 10 \text{ м}$.

В процессе экспресс-опробования производятся замеры уровня воды в скважине через определенные интервалы времени (в течение первых трех минут - не менее 3-4 замеров в минуту, в последующее время - не менее 1-2 замеров в минуту). После окончания

экспресс-опробования необходимо провести замеры по восстановлению уровня воды в скважине с той же частотой.

3.1.2. Теоретические основы метода. Расчетная схема совершенной скважины в обводненной толще представлена на рис. 10. Для этой схемы математическая модель неустановившейся фильтрации представлена дифференциальным уравнением

$$\mu \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{T}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (16)$$

с крайними условиями:

$$r = r_c - 2\pi r_c T \frac{dS}{dz} + \omega_r \frac{\partial S_c}{\partial t} = Q; S_c = S \quad (17)$$

$$r \rightarrow \infty; S = 0; t = 0; S_c = 0,$$

где $T = k h_{cp}$ - проводимость пласта, остальные обозначения прежние.

Решение этой задачи при условии $r_c \sqrt{\rho \mu / T} \leq 1$ в изображениях по Лапласу можно записать в виде:

$$f(t_p) = \frac{\bar{S}_c \cdot t_p \omega_r}{q t_p^2 - \bar{S}_c \omega_r} = \frac{\omega_r}{4\pi T} \left[\ln t_p + \ln \frac{1,28 \cdot T}{\mu r_c^2} \right], \quad (18)$$

здесь $t_p = 1/\rho$ - параметр, имеющий размерность времени и характеризующий его изменение в области изображений Лапласа;

ρ - параметр преобразования Лапласа.

Формула (18) является исходной для расчета фильтрационных параметров T и μ по результатам экспресс-опробования скважин.

3.1.3. Методика обработки опытных данных. Для определения фильтрационных параметров T и μ по формуле (18) по данным экспресс-опробования скважины в режиме

$Q = const$ применяется метод прослеживания изменения комплекса $f(t_p) = \bar{S}_c t_p \omega_r / (q t_p^2 - \bar{S}_c \omega_r)$ во времени t_p в области изображений.

Наименование объекта ДАОС и СК "Сирт"

№ скважины 592-2в

Дата проведения опыта 13.04.1984 г.

ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ СКВАЖИНЫ

№ слоя	Отметка подошвы слоя	Толщина слоя, м	Разрез	Конструкция скважин	Уровень грунтовых вод, м	Краткое описание пород
	глубины, м					
	0,9	0,9				почвенно-растительный слой пересыщенные пески суглинков и суглессей
	16,1	15,2			▽ 7,7 (поверх)	
	17,7	4,6			▽ 14,2	водонесущая глина

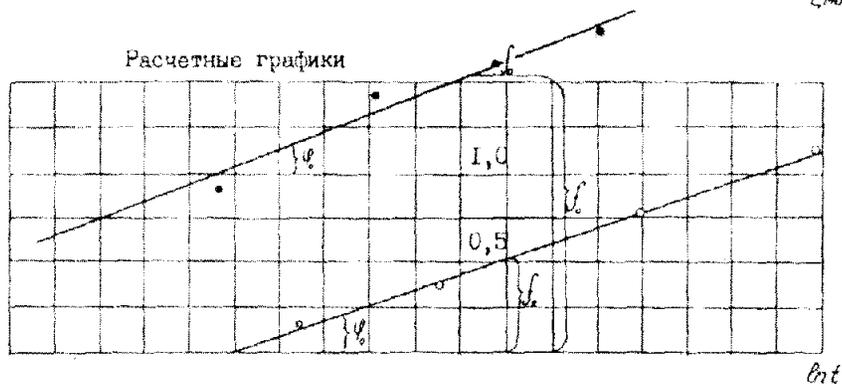
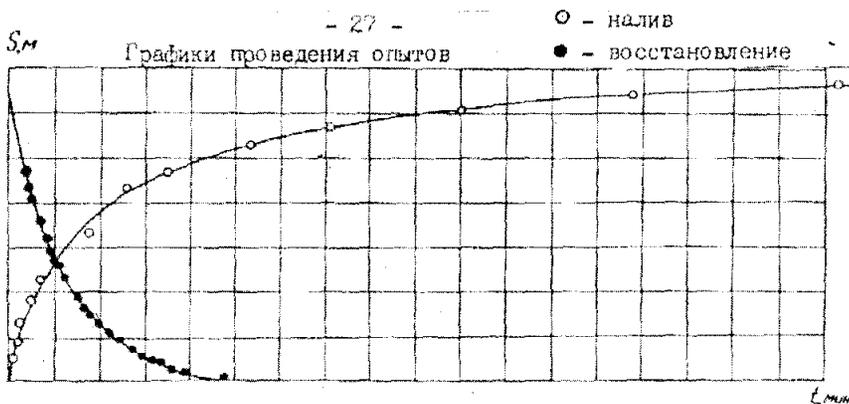
Таблица исходных данных

α_c	V	ω_r	Q	S_c	Фильтрационный коэффициент, м/сек		h_0	$t_{1/2}$ мин		h_{cp} м	
					Налив t_n	Восстан t_v		Налив	Восст	Налив	Восст
0,112	1,36	0,00945	0,03	6,5	45	14	1,9	4,5	1,75	4,68	4,56

Таблица фильтрационных параметров

Вид опыта	K м/сут	μ	α м ² /сут	T м ² /сут	Вид опыта	tg φ	f_0
Налив	0,56	0,20	12,98	2,62	Налив	0,43	0,53
Восстановительная	0,48	0,026	32,8	2,17	Восстан	0,52	1,65

Рис. 11. Лист обработки результатов



$$T = - \frac{\omega_r}{4k \lg \frac{V_0}{V_0}} - \text{проедимость, м}^2/\text{мин.}$$

$$a = 0,20 a^2 e^{-t/19t} - \text{уровнепроедимость, м}^2/\text{мин}$$

$M = T/a$ - недостаток насыщения (при наливе) или водоотдача (при восстановлении)

$k = T/h_{cp}$ - коэффициент фильтрации, м/мин

$$h_{cp} = h_e + \frac{S_0}{2} \left[1 - 1,44 \frac{t_{0,5}}{t_e} \right] - \text{средняя мощность фильтрационного потока, м}$$

Обозначения:

ω_r - площадь поперечного сечения ствола скважины в зоне возмущения, м²; V - объем воды, залитый в скважину, м³; S_0 - максимальное повышение уровня воды в скважине при наливе, м;
 $Q = V/t_n$ - расход воды при наливе, м³/мин; $t_{нал}$ - время налива (восстановления), мин; h_e - мощность водоносного горизонта, м;
 $t_{0,5}$ - время, за которое достигнута 0,5 S_{max} при наливе (восстановлении), мин

Для реализации этого метода необходимо иметь следующие опытные данные:

- график измерения повышения S_c (в случае откачки-понижения) уровня воды в скважине от времени t , мин;
- расход воды при наливе Q , м³/мин;
- площадь поперечного сечения ствола скважины в интервале, в пределах которого происходит возмущение, ω_r , м²;
- начальную мощность водоносного горизонта h_c , м;
- максимальное повышение уровня воды в скважине при наливе S_0 , м;
- время налива t_n , мин;
- время слежения за восстановлением уровня t_s , мин;
- время, за которое достигнуто возмущение, равное $0,5 S_0$ при наливе (восстановлении) t_{r_2} , мин.

Обрабатывать результаты следует в соответствии с требованием "Листа обработки результатов экспресс-налива в совершенную скважину" (рис. II). На этот лист наносится геолого-технический разрез скважины, ее конструкция, положение естественного УГВ и величины возмущения при наливе, строятся графики изменения повышений (понижений) $S_c = S_c(t)$ в ходе налива (откачки) и восстановления уровня, заполняется таблица исходных данных. Затем строится график вспомогательной функции f от la t_p (t_p - в минутах) как для процесса налива, так и для процесса восстановления уровня после налива.

Для построения графика $f = \bar{S}_c t_p \omega_r / (at_p^2 - \bar{S}_c \omega_r)$ необходимо сначала найти \bar{S}_c - изменение уровня в стволе скважины в изображенных Лапласа.

\bar{S}_c вычисляется по формуле

$$\bar{S}_c = t_p \sum_{k=1}^{k=3} A_k S_c(t_k); \quad t_k = t \cdot X_k, \quad (10)$$

где $\bar{S}_c(t_k)$ - повышение уровня в момент времени t_k ; и A_k - весовые коэффициенты, значения которых приведены в табл. 3.

Таблица 3
Значение весовых коэффициентов χ_k и A_k

k	1	2	3	4	5
χ_k	0,335	1,128	2,396	4,167	6,487
A_k	0,403	0,332	0,138	0,0316	0,00398

График функции $f(t_p)$ рекомендуется строить после заполнения таблицы по форме табл.4.

График $f - \ln t_p$ представляет прямую линию (в случае разброса опытных точек прямая $f - \ln t_p$ проводится с использованием метода наименьших квадратов).

По полученному графику определяют тангенс угла наклона $\%_0$ прямой к оси абсцисс и отрезок f_0 , отсекаемый этой прямой на оси ординат. Последующий расчет фильтрационных параметров выполняется по зависимостям, приведенным на рис. II.

Аналогичные расчеты выполняются и на основании данных изменения уровня воды в скважине при восстановлении.

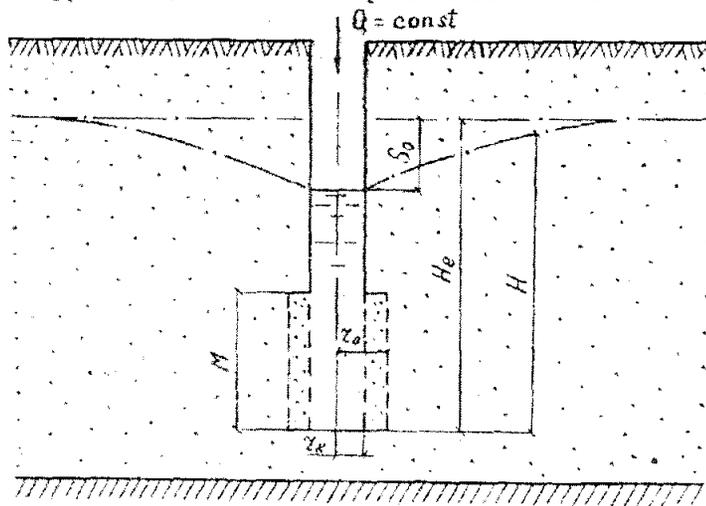


Рис. I2. Схема несовершенной наблюдательной скважины

3.1.4. Пример расчета параметров.

В качестве примера рассмотрим данные налива в скважину, конструкция которой представлена на "Листе обработки результатов опытного экспресс-налива в совершенную скважину" (рис. II). Там же приведены графики проведения опытов $S_c = S_c(t)$, которые характеризуют изменение понижения в стволе в скважине при наливе и восстановлении уровня во времени. В таблице исходных данных помещены основные показатели, характеризующие налив и восстановление уровня в скважине, а также мощность исследуемого водоносного пласта. Расчет вспомогательной функции f' приведен в табл. 4, причем принято $t_p = 45$ мин.

При заполнении табл. 4 вначале задавалось время $t_p = 0,1 \times t_n = 4,5$ мин. В первой строке таблицы записаны значения $t_n = \chi_n \cdot t_p$ для отдельных значений переменного χ . Например, для $\chi = 1$ и $t_p = 4,5$ мин с учетом χ_n (см. табл. 3) получаем $t_n = 0,335 \times 4,5 = 1,51$. Аналогично получены и последующие значения t_n . После заполнения первой строки (t_n) заполнена вторая строка ($S_n = S(t_n)$). Значения $S(t_n)$ находятся по графику $S(t)$, приведенному на рис. II для различных значений времени t_n , т.е. для значений $t_n = 1,51$ мин, $5,08$ мин и т.д.

Третья строка таблицы получена путем умножения найденных значений S_n на весовые коэффициенты A_n , которые приведены в табл. 3, например, при $\chi = 1$ и $t_p = 4,5$ мин; $S_n \cdot A_n = 1,70 \cdot 0,403 = 0,685$ и т.д. В этой же строке помещена сумма всех значений $S_n \cdot A_n$, т.е. $\sum S_n \cdot A_n$, а затем величина $\bar{S}_c = t_p \sum S_n \cdot A_n$.

Для данной строки

$$\sum S_n A_n = 0,685 + 1,345 + 0,711 + 0,029 = 2,944;$$

$$\bar{S}_c = t_p \sum S_n A_n = 4,5 \cdot 2,944 \approx 13,25$$

По найденному значению \bar{S}_c вычисляется вспомогательная функция f' :

$$f'(t_p) = \frac{\bar{S}_c \omega_r t_p}{Q t^2 - \bar{S}_c \omega_r} = \frac{13,25 \cdot 0,00985 \cdot 4,5}{0,05 \cdot 4,5^2 - 13,25 \cdot 0,00985} = 1,25$$

Таблица 4

Таблица расчетов вспомогательной функции $f(t_p)$ при наливе (восстановлении)

Опыт № 1 (налив)										
t_p 45 мин.		1	2	3	4	5	$\sum S_N A_N$	$S_D = t_p \sum \frac{S_N^2}{A_N}$	$f = f(t_p)$	$l_N t$
$t_p = 0,1$	$t_N = \chi_N t_p$	1,51	5,08	10,78	18,75	29,19				
= 4,5 мин.	$S_N = S(t_N)$	1,70	4,05	5,15	5,62	6,20				
	$S_N \cdot A_N$	0,655	1,345	0,711	0,178	0,025	2,944	13,25	1,22	1,50
$t_p = 0,06$	$t_N = \chi_N t_p$	0,90	3,04	6,47	11,25	17,5				
= 2,7 мин.	$S_N = S(t_N)$	1,10	2,90	4,50	5,20	5,60				
	$S_N \cdot A_N$	0,443	0,963	0,621	0,164	0,022	2,213	5,98	0,98	0,99
$t_p = 0,04$	$t_N = \chi_N t_p$	0,60	2,03	4,31	7,50	11,68				
= 1,8 мин.	$S_N = S(t_N)$	0,60	2,20	3,65	4,80	5,22				
	$S_N \cdot A_N$	0,242	0,730	0,504	0,152	0,021	1,649	2,97	0,77	0,59
$t_p = 0,02$	$t_N = \chi_N t_p$	0,30	1,02	2,16	3,75	5,84				
= 0,9 мин.	$S_N = S(t_N)$	0,30	1,17	2,23	3,40	4,35				
	$S_N \cdot A_N$	0,121	0,388	0,308	0,107	0,017	0,941	0,847	0,46	-0,10
$t_p = 0,01$	$t_N = \chi_N t_p$	0,15	0,51	1,08	1,87	2,92				
= 0,45 мин.	$S_N = S(t_N)$	0,15	0,51	1,20	2,10	2,95				
	$S_N \cdot A_N$	0,060	0,169	0,166	0,066	0,012	0,473	0,213	0,23	-0,80

В последнем столбце этой строки приводится значение $\ln t_p = \ln 4,5 = 1,50$. Аналогично заполняются все другие строки таблицы на другие моменты времени.

По полученным значениям вспомогательной функции f строится график $f - \ln t_p$, приведенный на рис. II. По полученному графику определяется тангенс угла наклона прямой $f(\ln t_p)$

$(\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{0,55}{1,24} = 0,44)$, а также длина отрезка, отсекаемого на оси oy , т.е. величина $f_0 \approx 0,55$.

После определения величин $\operatorname{tg} \varphi_0$ и f_0 рассчитываются значения фильтрационных параметров:

$$T = \frac{\omega r}{4,52 \operatorname{tg} \varphi_0} = \frac{0,0385 \cdot 60 \cdot 24}{4,52 \cdot 0,44} = 2,62 \text{ м}^2/\text{сут};$$

$$\alpha = 0,20 d_0^2 e^{f_0/\operatorname{tg} \varphi_0} = 0,20 \cdot 0,112^2 e^{0,55/0,44} \cdot 60 \cdot 24 \approx 12,98 \text{ м}^2/\text{сут};$$

$$\mu = T/\alpha = 2,62/12,98 \approx 0,20;$$

$$h_{cp} = h_c + \frac{S_n}{2} \left[1 - 1,44 \frac{t^{1/2}}{t_H} \right] = 1,9 + \frac{6,5}{2} \left[1 - 1,44 \frac{4,5}{45} \right] =$$

$$= 4,68 \text{ м};$$

$$k = T/h_{cp} = 2,62/4,68 \approx 0,56 \text{ м}^2/\text{сут}.$$

Аналогично рассчитаны фильтрационные параметры и по данным восстановления уровня в скважине 592-2 в. При этом близкое значение получено для коэффициента фильтрации $k = 0,48 \text{ м}^2/\text{сут}$., а для μ получено значение гораздо ниже, а именно: $\mu = 0,022$. Разные значения μ при наливке и восстановлении объясняются

тем, что они имеют разный смысл. При наливе величина $\mu = 0,20$ характеризует недостаток насыщения грунтов, а при восстановлении $\mu = 0,025$ - водоотдачу грунтов.

3.2. Опробование несовершенной по характеру вскрытия
пласта скважины в режиме постоянного расхода

3.2.1. Технология проведения экспресс-опробования полностью соответствует изложенной в п.3.1.1.

3.2.2. Теоретические основы метода. Расчетная схема несовершенной по характеру вскрытия пласта скважины представлена на рис.10. Для этой схемы математическая модель неустановившейся фильтрации представлена дифференциальным уравнением (16) с крайними условиями:

$$z = z_c; -2\pi r_c T \frac{\partial S}{\partial z} + \omega_T \frac{\partial S_c}{\partial t} = Q; S_c = S - \xi_c \frac{z_c}{2} \frac{\partial S}{\partial z}; \quad (19)$$

$$z \rightarrow \infty; S = 0; t = 0, S = 0; S_c = 0.$$

Решение этой задачи в изображениях по Лапласу при условии $\tau_c = \sqrt{\rho \mu / T} \ll 1$ можно записать в виде:

$$f(t_p) = \frac{\bar{S}_c \cdot t_p \cdot \omega_T}{Q t_p^2 - \bar{S}_c \omega_T} - \frac{\omega_T}{4\pi T} \left[\ln t_p + \ln \frac{1,26 \cdot T}{\mu_\xi \cdot z_c^2} \right], \quad (20)$$

здесь $t_p = \frac{1}{\rho}$ - параметр, имеющий размерность времени;
 $\mu_\xi = \mu \cdot e^{-\xi_c/2}$ - приведенная водоотдача.

Формула (20) совпадает с (18), где вместо μ_ξ стоит величина μ .

3.2.3. Методика обработки опытных данных полностью соответствует методике, изложенной в п.3.1.3. При этом вместо параметра μ определяется параметр $\mu_\xi = \mu \cdot e^{-\xi_c/2}$. Раздельно параметры μ и ξ_c могут быть найдены только в том случае, если один из них известен из каких-либо других сведений. Тогда другой параметр определяется по одной из формул:

$$\mu = \mu_\xi e^{\xi_c/2}; \quad \xi_c = 2 \ln \mu / \mu_\xi. \quad (21)$$

3.2.4. Пример расчета параметров. В качестве примера рассмотрим результаты налива, приведенные в п.3.1.4. При этом известно, что недостаток насыщения грунтов $\mu = 0,25$. Требуется определить коэффициент фильтрации k , фильтрационное сопротивление f_c скважины по характеру вскрытия пласта и водоотдачу грунтов.ход вычисления параметров по данным налива подробно изложен в п.1.4. При этом получено

$$k = 0,56 \text{ м/сут.}; \mu_f = 0,20.$$

Тогда по второй формуле (21)

$$f_c = 2l \frac{0,25}{0,20} = 0,44.$$

Обработка результатов восстановления уровня в скважине привела к величинам $k = 0,45 \text{ м/сут}$ и $\mu_f = 0,026$.

Тогда по первой формуле (21) имеем

$$\mu = 0,026 \cdot e^{0,22} = 0,032.$$

3.3. Экспресс-опробование несовершенной по характеру вскрытия пласта скважины при "мгновенном" возмущении

3.3.1. Технология проведения экспресс-опробования. Бурение и оборудование скважины осуществляется в соответствии с теми же требованиями, которые изложены в п.3.2.1.

Экспресс-опробование производится путем очень быстрого ("мгновенного") возмущения напора водоносного пласта с последующей регистрацией изменений уровня воды в скважине по методике, изложенной в п.3.2.1. Возмущение может осуществляться наливом (или изъятием) определенного объема воды в скважину за короткий промежуток времени, опусканием под уровень воды в скважине емкости, вытесняющей определенный объем воды, откачиванием уровня нагнетанием в скважину сжатого воздуха и т.п.

3.3.2. Теоретические основы метода.

Расчетная схема несовершенной скважины в обводненной толще может соответствовать схеме, представленной на рис.10. Для этой схемы с учетом "мгновенного" возмущения в стволе скважины на величину S_0 математическая модель неустановившейся фильтрации

представлена дифференциальным уравнением (16) с краевыми условиями:

$$z = z_c, -2\mu z_c T \frac{\partial S}{\partial z} + \omega_r \frac{\partial S_c}{\partial t} = 0; S_c = S - \xi_c \frac{z_c}{z} \frac{\partial S}{\partial z}; \quad (22)$$

$$z \rightarrow \infty \frac{\partial S}{\partial z} = 0; t = 0; S = 0; S_c = S_0$$

Решение этой задачи в изображениях по Лапласу можно записать в виде

$$\bar{S}_c = \frac{S_0}{\rho} \frac{K_0(z_0) + 0,5 \xi_c z_0 K_1(z_0)}{K_0(z_0) + 0,5 \xi_c z_0 K_0(z_0) + \frac{2\mu T}{\rho \omega_r} z_0 K_0(z_0)}; z_0 = \sqrt{\frac{\rho}{a}} \cdot z_c \quad (23)$$

При $z < 0,1$, т.е. $t_p > 100 \frac{z_c^2}{a}$ это решение упрощается и приводится к виду:

$$f(t_p) = \frac{\bar{S}_c t_p}{t_p S_0 - S_c} = \frac{\omega}{4\mu T} \left[\ln t_p + \ln \frac{1,26 T}{\mu \xi_c z_c^2} \right]; \quad (24)$$

$$t_p = 1/\rho; \quad \mu \xi_c = \mu e^{-\xi_c/2}$$

Переход к оригиналам в формуле (23) осуществлен В.С.Шержуковым / 3 / в виде:

$$\frac{S_c}{S_0} = \frac{8\mu}{\pi^2 z} \int_0^{\infty} \frac{e^{-v^2 t}}{N} \cdot \frac{\partial V}{\partial v}; \quad (25)$$

$$N = \left[v Y_0(v) - \frac{\xi_0}{2} \left(\frac{4\mu^*}{\xi_c} - v \right) Y_1(v) \right]^2 + \left[v Y_0(v) - \frac{\xi_0}{2} \left(\frac{4\mu^*}{\xi_c} - v \right) Y_1(v) \right]^2; \quad \tau = \frac{T t}{\mu z_c^2}; \quad \mu^* = \mu \frac{z_0^2}{\omega_r} \xi_c$$

здесь $Y_0(v), Y_1(v), J_0(v)$ и $J_1(v)$ - функция Бесселя; остальные обозначения прежние.

Handwritten notes and signatures at the bottom of the page, including a large checkmark and some illegible text.

3.3.3. Методика обработки опытных данных. Для определения параметров водоносного пласта могут быть использованы как формула (24), так и формула (25).

Формула (24) по форме совпадает с формулой (20), только роль функции $f'(t_p)$ в ней выполняет не $f'(t_p) = \frac{S_c t_p \omega_r}{Q t_p - S_c \omega_r}$, а $f(t_p) = \frac{S_c t_p}{t_p S_o - S_c}$. Поэтому методика расчета параметров полностью соответствует методике, изложенной в пп. 3.1.3 и 3.2.3 с той лишь разницей, что график функции $f(t_p)$ строится по формуле

$$f(t_p) = \frac{S_c \cdot t_p}{t_p S_o - S_c}.$$

Для определения фильтрационных параметров по формуле (25) следует использовать метод эталонных кривых. Подробно методика обработки опытных данных по зависимости (25) приведена в работе / 3 /. Эта методика позволяет определить два параметра: k и $\mu_c = \mu e^{1/2}$. Для отдельного определения μ и f_c необходимо привлекать результаты других исследований.

3.4. Опробование несовершенной по характеру и степени вскрытия пласта скважины в режиме постоянного расхода

3.4.1. Технология проведения экспресс-опробования. Скважина проходится на заданную глубину, оборудуется фильтром так, что верх его находится ниже зеркала грунтовых вод на величину большую, чем начальное возмущение S_o в стволе скважины. Откачку (налив) осуществляют в режиме постоянного расхода $Q = const$.

Величина расхода подбирается таким образом, чтобы понижение (повышение) в стволе скважины за время опробования (от 5 мин до 60 мин) было в пределах $1 \text{ м} \leq S_o \leq 10 \text{ м}$.

В процессе экспресс-опробования производятся замеры уровня воды в скважине через определенные интервалы времени (в течение первых трех минут - не менее 3-4 замеров в минуту, в последующее время - не менее 1-2 замеров в минуту). После окончания экспресс-опробования необходимо провести замеры по восстановлению уровня в скважине с той же частотой.

3.4.2. Теоретические основы метода. Расчетная схема несовершенной по характеру и степени вскрытия пласта скважины при наливе (откачке) в режиме $Q = const$ представлена на рис. 12. Для этой схемы математическая модель неустановившейся фильтрации представляется следующей краевой задачей:

$$\begin{aligned} \frac{k_z M}{z} \frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial S}{\partial z} \right) - \frac{k_z}{\Delta} S &= \mu \frac{\partial S}{\partial t}; \Delta = H_s - M; \\ z = z_c; -2\pi z_c k_z M \frac{\partial S}{\partial z} - \omega_r \frac{\partial S_c}{\partial t} &= Q; S_c = S - \frac{z_c}{\rho} \frac{\partial S}{\partial z}; \\ z \rightarrow \infty; S &= 0; t = 0; S = 0; S_c = 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Решение задачи (26) в изображениях по Лапласу для малых моментов времени $\frac{M\Delta}{k_z} \gg t_p = \frac{t}{\rho} > \frac{M\Delta}{k_z} \cdot \frac{\gamma^2 z_c^2}{0,01M\Delta - \gamma^2 z_c^2}$ можно представить в виде

$$\gamma(t_p) = \frac{S_c t_c \omega_r}{Q t_p^2 - S_c \omega_r} = \frac{\omega_r}{4\pi k_z M} \left[\ln t_p + \ln \frac{126 k_z M}{\mu \rho z_c^2} \right] \quad (27)$$

Для больших значений времени (квазистационарный режим $\mu = 0$) в оригиналах это решение записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{S_c}{t} &= \frac{Q}{\omega_r} \cdot W_\alpha(\tau); W_\alpha(\tau) = \frac{1 - e^{-\tau}}{\tau}; \tau = \alpha_0 t; \\ R &= \frac{z_c}{\sqrt{M\Delta}}; \delta_\rho = \rho e^{-\rho z_c/k_z}; \gamma^2 = \frac{k_z}{k_z}; \alpha_0 = \frac{2\pi k_z M}{\omega_r \ln \frac{z_c}{R \delta_\rho}}. \end{aligned} \quad (28)$$

На рис. 12 представлен график функции $W_\alpha(\tau)$.

3.4.3. Методика обработки опытных данных. Для определения фильтрационных параметров по результатам наблюдений за изменением уровня в скважине вначале следует построить фактическую кривую изменения уровня в системе $\frac{\omega_r}{Q t} - \ln t$ в том же масштабе, что и эталонная кривая $W_\alpha(\tau) - \ln \tau$. При наложении эталонной системы координат $W_\alpha(\tau) - \ln \tau$ на фактическую $\frac{\omega_r}{Q t} - \ln t$ ось абсцисс этих систем должны совпадать. Тогда координата τ_0 начала координат эталонной системы определяет параметр α_0 по формуле $\alpha_0 = e^{-\tau_0}$. Затем по начальным

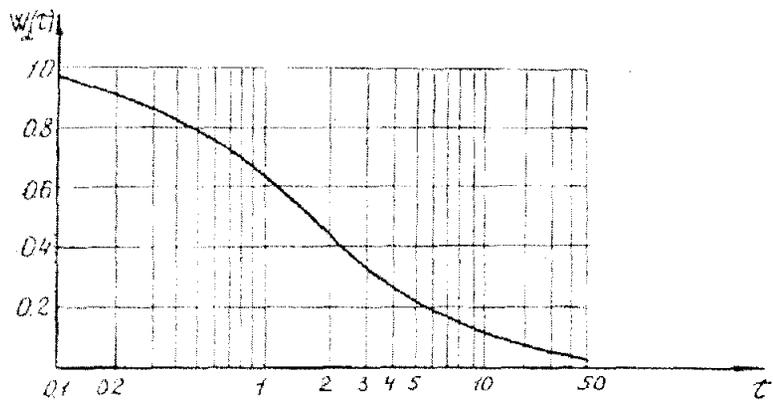


Рис.13. График функции $W_q(t)$

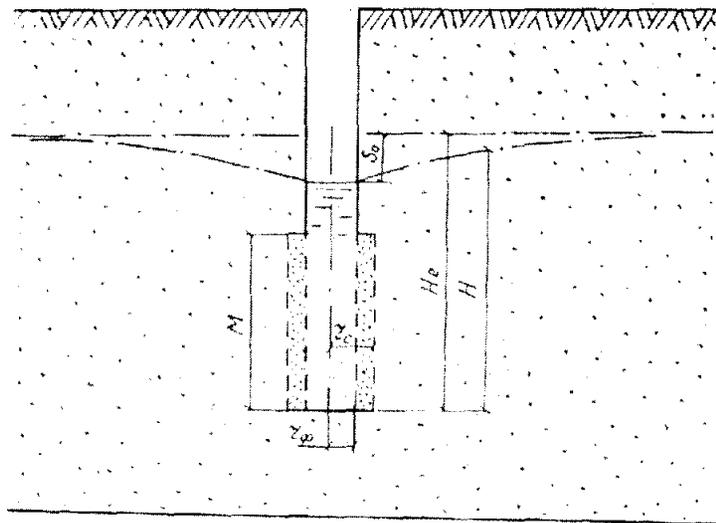


Рис.14. Схема фильтрации к несовершенной скважине

натурным точкам строится прямая $f(t_p) - \ln t_p$ по методике, изложенной в п.3.1.3 и определяются тангенс угла наклона $tg \varphi$ прямой и отрезок пересечения прямой с осью ординат f_0 (см.рис. II).

Расчет фильтрационных параметров проводится по формулам:

$$\gamma_F = \gamma e^{-\frac{r}{R}} = \frac{1,12}{z_c} \sqrt{M \Delta} e^{-\frac{1}{2} \alpha_0 \lg \varphi};$$

$$k_z = \frac{\omega_r \cdot \alpha_0}{2 \beta_c M} \ln \frac{1,12}{R \gamma_F}; \quad (29)$$

$$\mu_F = \mu e^{-\frac{r}{R}} = \frac{1,26 k_z M}{z_c^2} e^{-f_0 / \lg \varphi}.$$

Если известны величины μ или γ из других опытных данных, то по формулам (21) находится величина γ_c .

Изложенная здесь методика расчета трех параметров учитывает особенности поведения кривой изменения уровня на отдельных участках (прежде всего - начальном). Если этот участок недостаточно четко выражен, т.е. опытные точки не ложатся хорошо на прямую $f(t_p) - \ln t_p$, то в этом случае следует отказаться от расчета всех трех параметров, а определять только коэффициент фильтрации k_z в горизонтальном направлении по формуле (29) при $\gamma_F = 1$.

3.5. Экспресс-опробование несовершенной по характеру и степени вскрытия пласта скважины при "мгновенном" возмущении

3.5.1. Технология проведения экспресс-опробования. Скважина проходится на заданную глубину, оборудуется фильтром, так что верх его находится ниже зеркала грунтовых вод на величину большую, чем начальное возмущение S_0 в стволе скважины (см.рис. I4). Откачку (налив) осуществляют быстро ("мгновенно"), создавая нужное возмущение ($S_0 \geq 1$ м) в стволе скважины. После прекращения откачки (налива) ведут наблюдения за восстановлением уровня (в течение первых трех минут - не менее 3-4 замеров в минуту, в последующее время - не менее 1-2 замеров в минуту).

3.5.2. Теоретические основы метода. Расчетная схема несовершенной по характеру и степени вскрытия пласта скважины при "мгновенном" возмущении представлена на

рис.14. Для этой схемы математическая модель неустановившейся фильтрации представляется следующей краевой задачей:

$$\frac{k_2 M}{z} \frac{\partial}{\partial z} \left(z \frac{\partial S}{\partial z} \right) - \frac{k_2}{\Delta} S = \mu \frac{\partial S}{\partial t}; \quad \Delta = H_s \cdot M;$$

$$z = z_c; \quad -2\sqrt{\pi} z_c k_2 M \frac{\partial S}{\partial z} + \omega_r \frac{\partial S_c}{\partial t} = 0; \quad S_c = S - \frac{z_c}{2} \frac{\partial S}{\partial z} \quad (30)$$

$$z \rightarrow \infty, \quad S = 0; \quad t = 0; \quad S = 0; \quad S_c = S_0.$$

Решение задачи (30) в изображениях по Лапласу для малых моментов времени $\frac{\mu \Delta}{k_2} \gg t_p = \frac{z_c^2}{\rho} > \frac{\mu}{k_2} \cdot \frac{\gamma^2 z_c^2}{0,01 M \Delta - \gamma^2 z_c^2}$ можно представить в виде:

$$f^*(\gamma) = \frac{S_0 t_p}{S_0 t_p - S_c} = \frac{\omega_r}{4\sqrt{\pi} k_2 M} \left[\ln t_p + \ln \frac{126 k_2 M}{\mu_f z_c^2} \right]; \quad (31)$$

$$\mu_f = \mu e^{-t/2}; \quad \gamma^2 = \frac{k_2}{k_2}$$

Для больших моментов времени (квазистационарный режим) в оригиналах это решение записывается следующим образом:

$$\ln \frac{S_0}{S_c} = \alpha_0 t; \quad \alpha_0 = \frac{2\sqrt{\pi} k_2 M}{\omega_r \ln \frac{1,12}{R \gamma_f}}; \quad \gamma_f = \gamma e^{-k_2/2} \quad (32)$$

формулы (31) и (32) могут служить для расчета фильтрационных параметров.

Отметим, что для данных условий при установке верха фильтра скважины под уровень грунтовых вод на глубину больше 1,5 М Веригиним Н.Н. / 4 /, Шестаковым В.М. / 5 / рекомендуется для любых моментов времени зависимость

$$\ln \frac{S_0}{S_c} = \alpha_1 t; \quad \alpha_1 = \frac{2\sqrt{\pi} k_2 M}{\omega_r \ln \frac{0,77 M}{z_c}} \quad (33)$$

Эта формула по структуре соответствует зависимости (32) и совпадает с ней при $\Lambda = 0,4$ м и $\gamma_f = 1$.

3.5.3. Методика обработки опытных данных. Для определения фильтрационных параметров k_2, μ, γ, ξ_c по результатам наблюдений за восстановлением уровня в скважине следует результаты наблюдений представить на двух графиках в системах

$$\ln \frac{S_0}{S_c} - t \quad \text{и} \quad f(t_p) = \frac{\bar{S}_c}{S_0 t_p - S_c} - \ln t_p$$

Представленные в обеих системах опытные данные должны аппроксимироваться прямыми линиями. Причем, при проведении прямой линии в системе $\ln \frac{S_0}{S_c} - t$ следует ориентироваться на опытные точки, полученные при больших значениях реального времени t , а в системе $f(t_p) - \ln t_p$ - на опытные точки, полученные при малых значениях времени t_p в изображениях по Лапласу. После построения этих прямых с первой из них снимается тангенс угла наклона к оси абсцисс, что в соответствии с формулой (32) определяет величину $\alpha_0 = \text{tg } \varphi_0$.

Прямая $f(t_p) - \ln t_p$ строится в изображениях по Лапласу. Методика построения графика такого рода детально описана в п.3.1.3. По полученному графику определяют тангенс угла наклона α_0 (см. рис. II) прямой к оси абсцисс и отрезок f_0 , который отсекает эта прямая на оси ординат.

Расчет фильтрационных параметров производится по зависимостям (29), в которых $\text{tg } \varphi_0$ и f_0 определяются по графику функции $f(t_p)$.

Если известны величины μ или γ из других опытных данных, то находится величина ξ_c .

Изложенная здесь методика расчета трех параметров учитывает особенности поведения кривой восстановления на отдельных участках (начальном и конечном). Если эти участки недостаточно четко выражены, т.е. опытные точки не ложатся хорошо на прямые линии, то следует отказаться от расчета всех трех параметров, а определять только коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении по формуле (29) при $\xi_c = 1$.

3.6. Экспресс-определение обводненного слабопроницаемого слоя или линзы небольшой мощности

3.6.1. Технология проведения опыта полностью соответствует технологии по п.2.4.1. При этом при наливке рекомендуется обеспечить

подъем уровня в обсадной трубе (рис. 15) на высоту в 2-3 мощности опробуемого слоя над первоначальным уровнем воды в скважине.

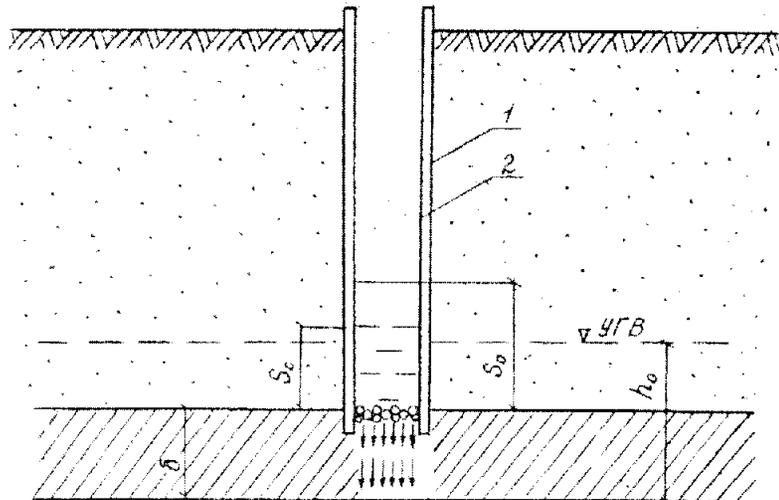


Рис. 15. Схема налива в скважину для определения коэффициента фильтрации обводненного слабопроницаемого прослоя.

1 - ствол скважины; 2 - обсадная труба; 3 - песчано-гравийный слой

3.6.2. Теоретические основы метода. Фильтрация через слабопроницаемый слой происходит главным образом в вертикальном направлении и поэтому математическая схема для расчета снижения уровня в скважине выглядит следующим образом:

$$v_z = \frac{dS_c}{dt} = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} = -k_z \frac{S_c}{\delta}; S_c(0) = S_0, \quad (34)$$

где S_c - повышение уровня в стволе скважины над уровнем грунтовых вод; S_0 - начальное повышение в стволе скважины.

Решение задачи (34) записывается в виде

$$S_c = S_0 e^{-\frac{k_z}{\delta} t}. \quad (35)$$

Наименование объекта _____
 № скважины _____

Дата проведения опытов _____

Таблица исходных данных

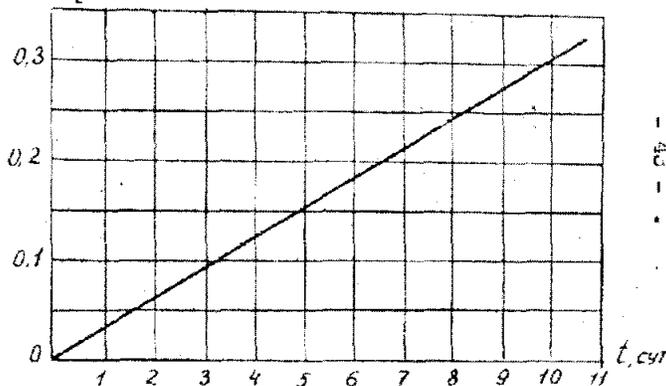
№№ п/п	d_c м	δ , м	S_0 м	$tg\alpha$
I	0,1	1,4	11,48	0,03

Расчетные формулы:

$$k = \delta tg\alpha; \quad tg\alpha = \frac{S_0}{S}$$

$$k = 0,042 \frac{м}{сут}$$

$lg \frac{S_0}{S_c}$ Графики проведения опытов



Условные обозначения:

k - коэффициент фильтрации, м/сут; d_c - диаметр скважины, м; S_0 - максимальное повышение уровня воды в скважине при наливе, м; S_c - повышение уровня воды в скважине при наливе на момент времени t ; δ - мощность слабопроницаемого прослоя, м.

Рис. 16. Лист обработки результатов опытного налива в скважину в условиях ее работы дном в необводненных грунтах

3.6.3. Методика обработки опытных данных. При обработке данных наблюдений за снижением уровня в скважине необходимо знать мощность δ опробуемого слабопроницаемого слоя. Ее можно определить предварительно по геологическому разрезу или непосредственно добуриванием скважины до подошвы слоя после окончания налива.

Обработка результатов происходит в соответствии с требованием "Листа обработки результатов опытного налива" (см. рис. 16).

Для этого по результатам наблюдений строится график $\ln \frac{S_0}{S_1}$ от t в виде прямой линии и определяется тангенс угла α наклона прямой к оси t . Коэффициент фильтрации определяется по формуле

$$K_z = \delta \operatorname{tg} \alpha \quad (36)$$

3.6.4. Пример расчета параметров. В качестве примера на рис. 16 приведены данные наблюдений за понижением уровня в стволе скважины после налива. Данные хорошо аппроксимируются в виде прямой линии в системе $\ln \frac{S_0}{S_1} - t$. Тангенс угла наклона этой прямой к оси t равен 0,03, а коэффициент фильтрации $K_z = \delta \operatorname{tg} \alpha = 1,4 \cdot 0,03 = 0,042 \text{ мквм}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусейнов Г. П. Некоторые вопросы гидродинамики нефтяного пласта. Баку, Азербайджан, 1961.
2. Определение водопроницаемости неводоносных горных пород опытными наливками в шурфы. М., Энергия, 1963.
3. Рекомендации по определению фильтрационных параметров горных пород и грунтов методом экспресс-налива в несовершенные скважины. М., ВНИИ ВДГЭС, 1979, 32 с.
4. Веригин Н. П., Васильев В. С., Саркисян Э. С., Шержуков В. С. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород. М., Недра, 1977, 271 с.
5. Мироненко В. А., Шестаков В. С. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М., Недра, 1976, 326 с.

	стр.
Введение	3
1. Общие положения	5
2. Определение фильтрационных параметров обводненных слабопроницаемых пород при экспресс-опробованиях скважин	9
2.1. Наллив с постоянным расходом в совершенную скважину в однородной толще	6
2.2. Наллив с постоянным расходом в гидродинамически совершенную скважину с учетом несовершенства по характеру вскрытия пласта	15
2.3. Экспресс-налив в гидродинамически несовершенную скважину (работа дном)	16
2.4. Экспресс-налив в обводненный слабопроницаемый слой или линзу небольшой мощности	20
3. Определение фильтрационных параметров обводненных слабопроницаемых пород при экспресс-опробованиях скважин....	24
3.1. Опробование совершенной скважины в режиме постоянного расхода	24
3.2. Опробование несовершенной по характеру вскрытия пласта скважины в режиме постоянного расхода	33
3.3. Экспресс-опробование несовершенной по характеру вскрытия пласта скважины при "мгновенном" возмущении	34
3.4. Опробование несовершенной по характеру и степени вскрытия пласта скважины в режиме постоянного расхода.....	36
3.5. Экспресс-опробование несовершенной по характеру и степени вскрытия пласта скважины при "мгновенном" возмущении	39
3.6. Экспресс-опробование обводненного слабопроницаемого слоя или линзы небольшой мощности	41