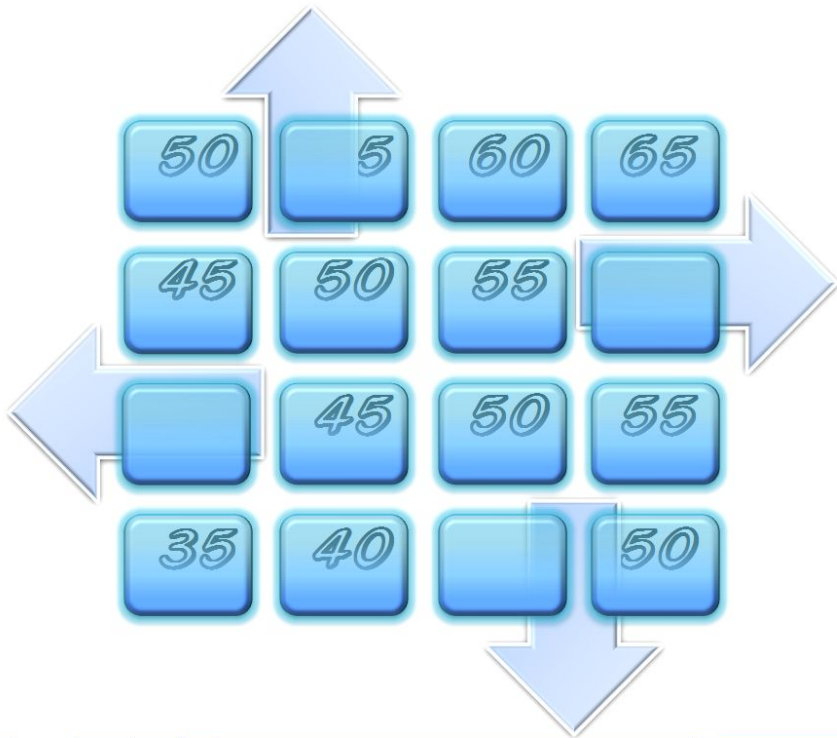


Гидродинамика флюидных систем и моделирование гидродинамических процессов



Лекция № 6

Количественная оценка движения подземных вод в условиях искусственных фильтрационных потоков (водоприток к скважинам)

Кафедра гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии ИПР ТПУ
доцент Кузеванов К.И.

Моделирование гидрогеологических условий по методу ЭГДА

Гидродинамическая сетка

Графический способ построения гидродинамической сетки

Правила построения гидродинамической сетки

Критерии корректной формы гидродинамической сетки

Ленты тока

Расчёт единичных расходов по лентам тока

Расчёт величины общего единичного расхода фильтрационного потока

Принципиальная схема установки ЭГДА

Построение эквипотенциальных линий с использованием установки ЭГДА

Построение линий тока с использованием установки ЭГДА

Использование численного моделирования для построения гидродинамической сетки

Расчёты расхода фильтрационного потока с использованием принципа эквивалентных плоских лент тока

Инженерные сооружения, предназначенные для захвата и извлечения подземных вод, используемых для различных целей (водоснабжение, орошение, осушение, водопонижение), называют **водозаборными**.

В конструктивном отношении водозаборные сооружения подразделяются на **вертикальные** (скважины, шахтные колодцы, шурфы), **горизонтальные** (каптажные галереи, дренажные канавы, водозаборные траншеи, кяризы, трубчатые дрены, горизонтальные скважины) и **комбинированные** (сочетание вертикальных сооружений с горизонтальными); например лучевые водозаборы – сочетание шахтного колодца с горизонтальными скважинами.

Среди водозаборных сооружений наибольшим распространением пользуются **скважины** (вертикального и горизонтального заложения).

По гидрогеологическим условиям эксплуатации все водозаборные сооружения можно разделить на две группы:

- 1) инфильтрационные водозаборы и
- 2) фильтрационные водозаборы

Инфильтрационные водозаборы располагают на участках активной связи подземных и поверхностных вод и работают в основном за счёт привлечения вод поверхностных водотоков или водоёмов, возможно искусственных или с искусственным восполнением в периоды паводков.

Фильтрационные водозаборы располагаются в областях распространения и разгрузки водоносных горизонтов. При их эксплуатации привлекаются естественные запасы подземных вод (и упругие и гравитационные).

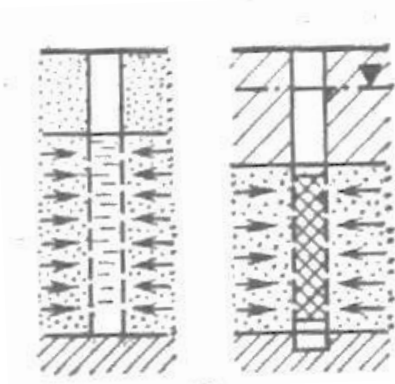
Вертикальные водозаборы, вскрывающие грунтовые безнапорные воды, называют грунтовыми. Вертикальные водозаборы, вскрывающие напорные (артезианские) подземные воды, носят название артезианских скважин или колодцев.

Типы водозаборных сооружений

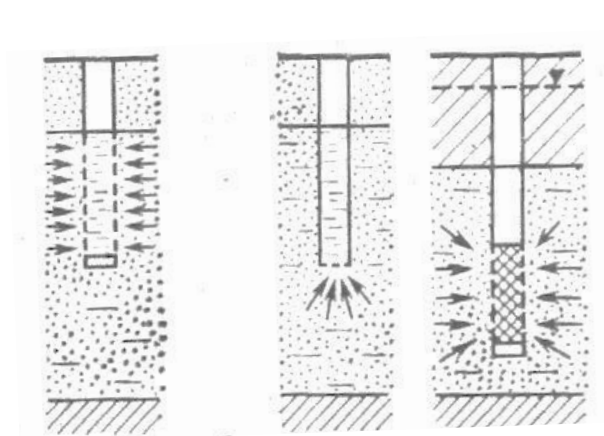
По характеру вскрытия водоносных горизонтов водозаборы делятся на совершенные и несовершенные.

Совершенными водозаборами называют выработки (вертикальные и горизонтальные), которые вскрывают водоносный горизонт на всю его мощность, обеспечивая поступление воды в выработку по всей мощности водоносного горизонта.

Несовершенные водозаборы вскрывают водоносный горизонт не на полную его мощность. Поступление воды в них происходит только в пределах вскрытой части водоносного горизонта через боковые стенки (скважины), через дно (шахтные колодцы), через боковые стенки и дно (некоторые шахтные колодцы).



Примеры совершенных скважин по степени вскрытия пласта



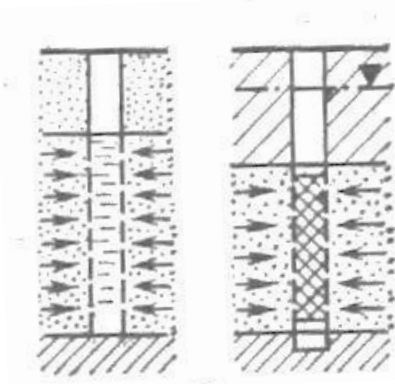
Примеры не совершенных скважин по степени вскрытия пласта

Типы водозаборных сооружений

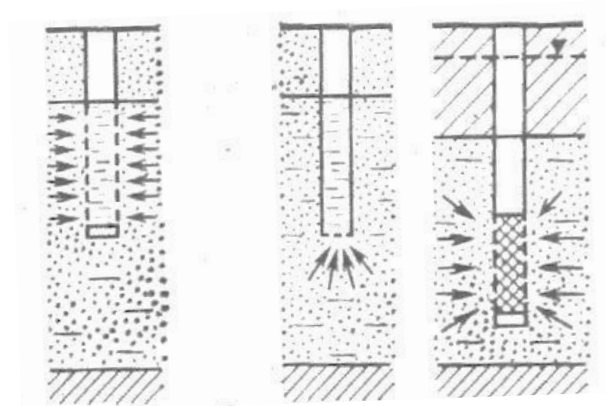
По степени вскрытия водоносных горизонтов водозаборы делятся на совершенные и несовершенные.

Совершенными водозаборами называют выработки (вертикальные и горизонтальные), которые вскрывают водоносный горизонт на всю его мощность, обеспечивая поступление воды в выработку по всей мощности водоносного горизонта.

Несовершенные водозаборы вскрывают водоносный горизонт не на полную его мощность. Поступление воды в них происходит только в пределах вскрытой части водоносного горизонта через боковые стенки (скважины), через дно (шахтные колодцы), через боковые стенки и дно (некоторые шахтные колодцы).



Примеры совершенных скважин по степени вскрытия пласта

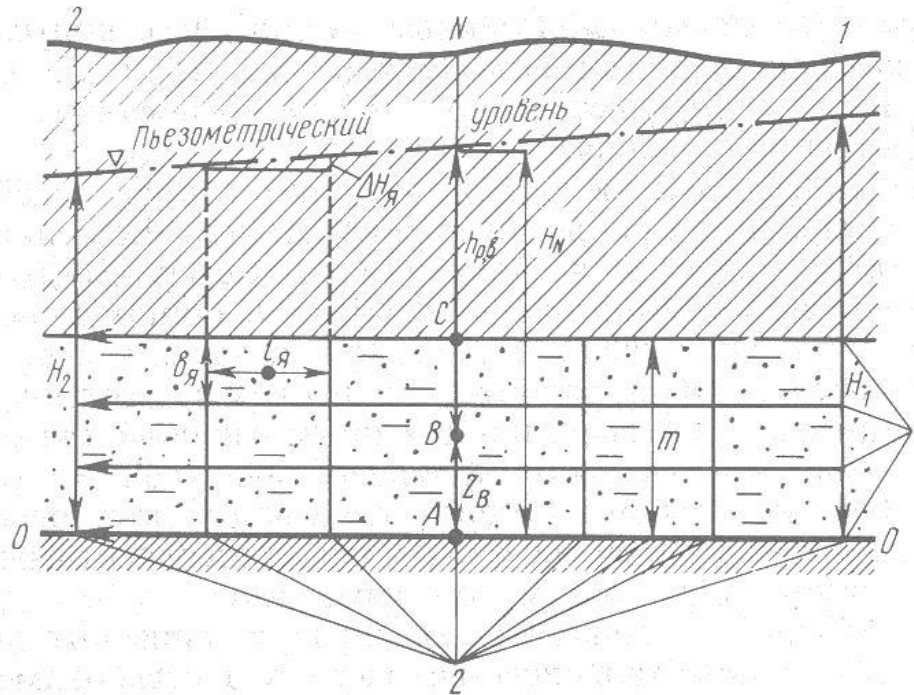


Примеры не совершенных скважин по степени вскрытия пласта

Типы водозаборных сооружений

Совершенные по степени вскрытия водоносных горизонтов скважины практически не создают (создают минимальные) дополнительные сопротивления фильтрационному потоку

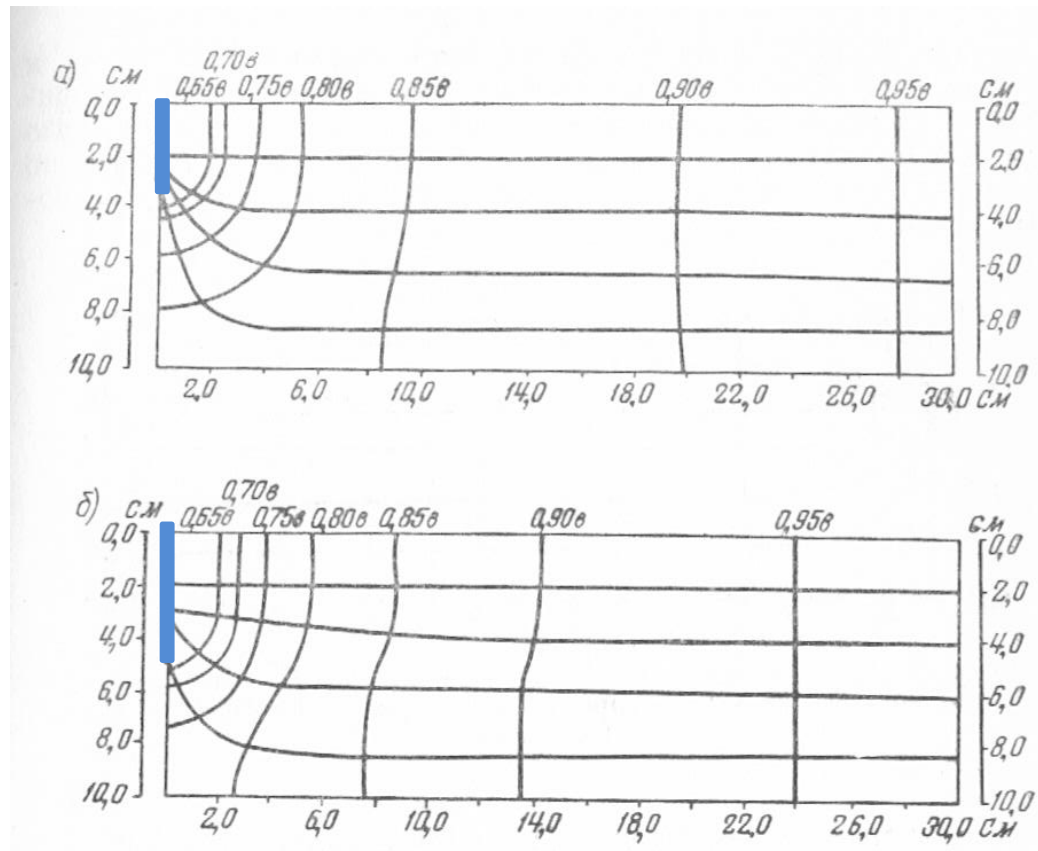
В условиях притока к фильтру скважины линии тока сохраняют параллельность кровле и подошве водоносного горизонта как в условиях естественного фильтрационного потока



Гидродинамическая сетка фильтрационного потока в однородном напорном водоносном горизонте постоянной мощности

Типы водозаборных сооружений

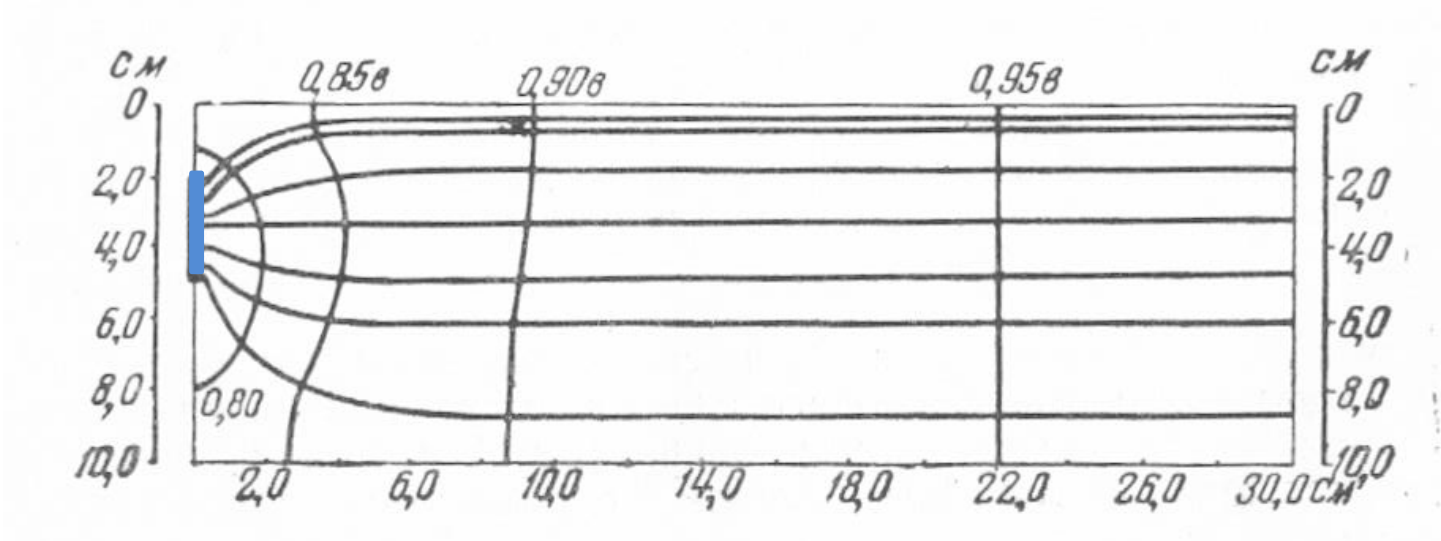
Несовершенные по степени вскрытия водоносных горизонтов скважины создают дополнительные сопротивления фильтрационному потоку за счёт искажения его формы в прифильтровой зоне.



Гидродинамические схемы притока воды к несовершенным скважинам с фильтром, примыкающим к кровле напорного водоносного горизонта при различной длине фильтра

Типы водозаборных сооружений

При удалении от скважины за пределами расстояния 1,0 – 1,5 мощности водоносного горизонта поток становится близким к плоско-радиальному.



Гидродинамическая схема притока воды к несовершенной скважине с фильтром, не примыкающим к кровле или подошве напорного водоносного горизонта

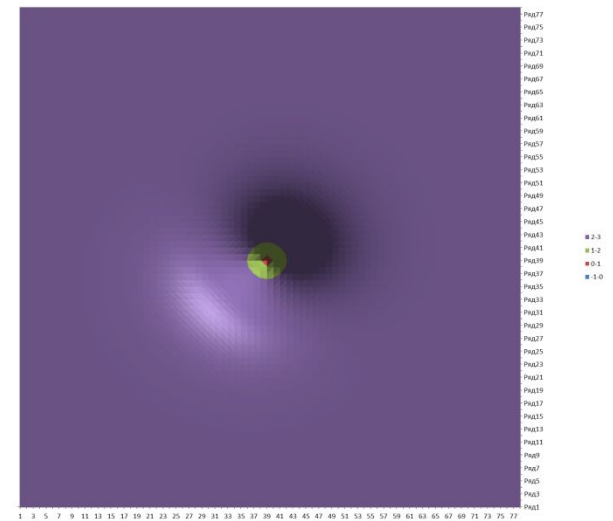
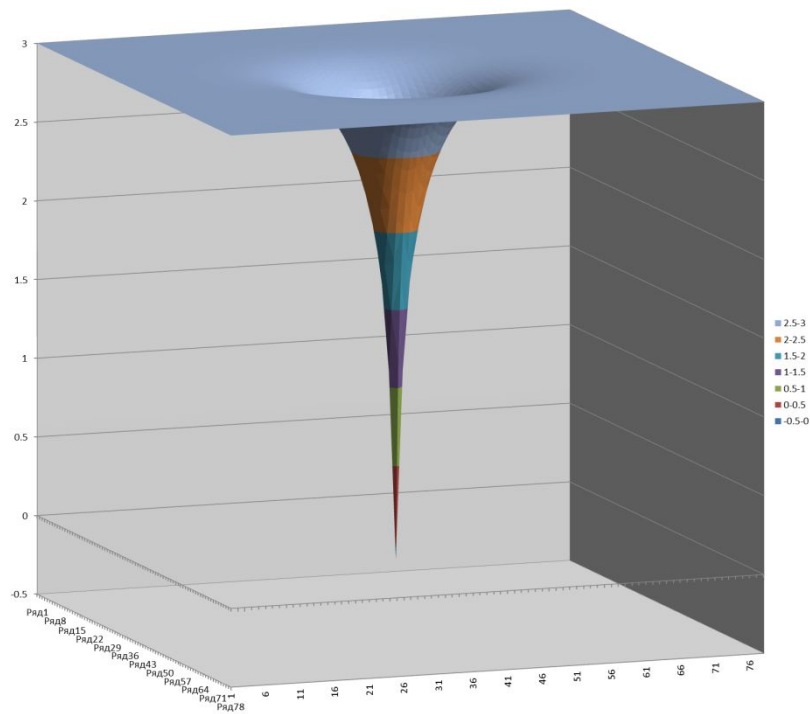
В зависимости от взаимного расположения водозаборных сооружений они бывают одиночными или взаимодействующими.

Одиночные водозаборы при эксплуатации не испытывают влияния других водозаборных сооружений.

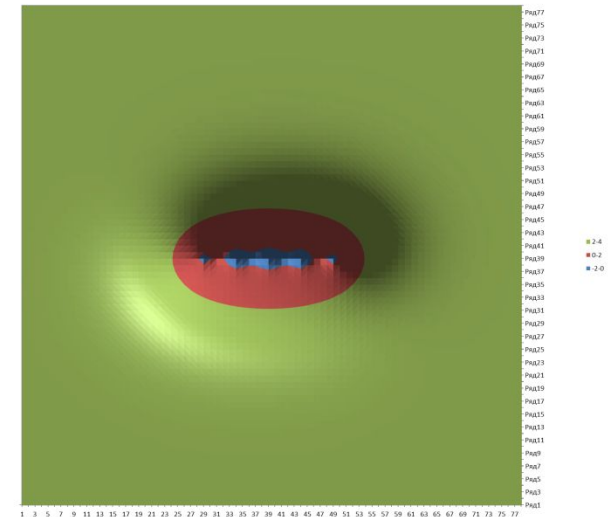
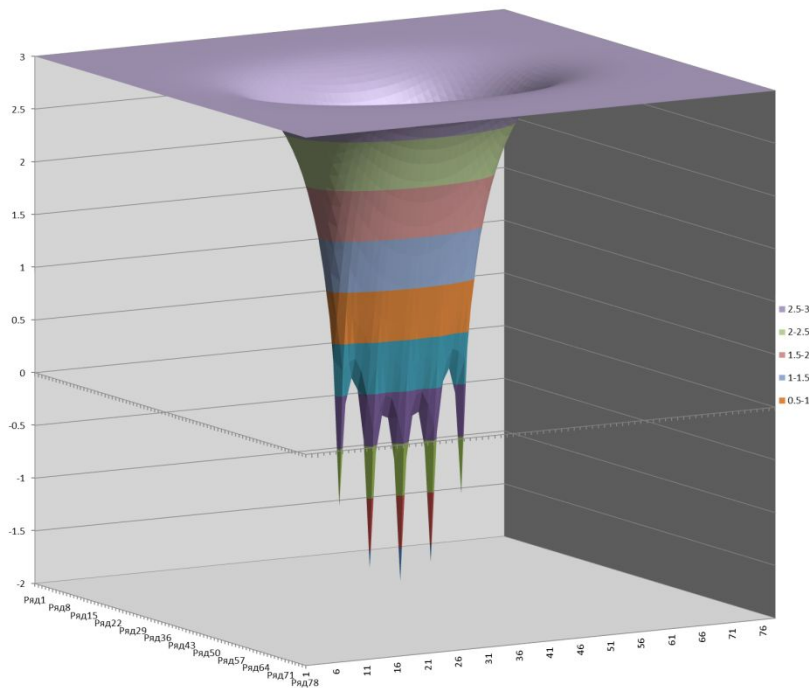
Взаимодействующие водозаборы при работе оказывают влияние друг на друга путем наложения полей действия этих водозаборов.

Они могут различаться по схеме расположения: площадные (неупорядоченное расположение скважин; квадратная сетка скважин; прямоугольная сетка скважин), линейные, кольцевые

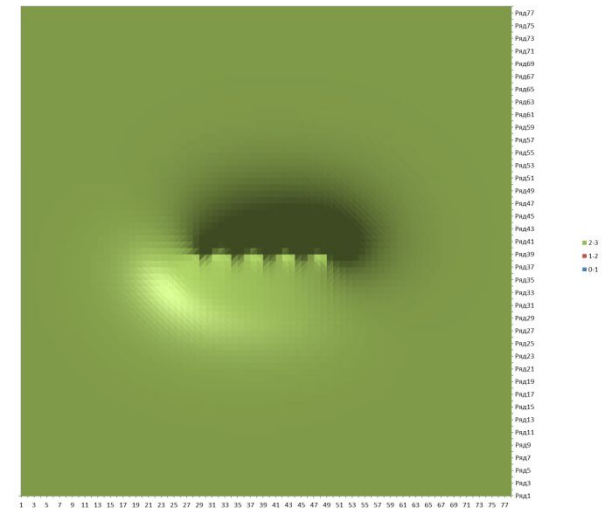
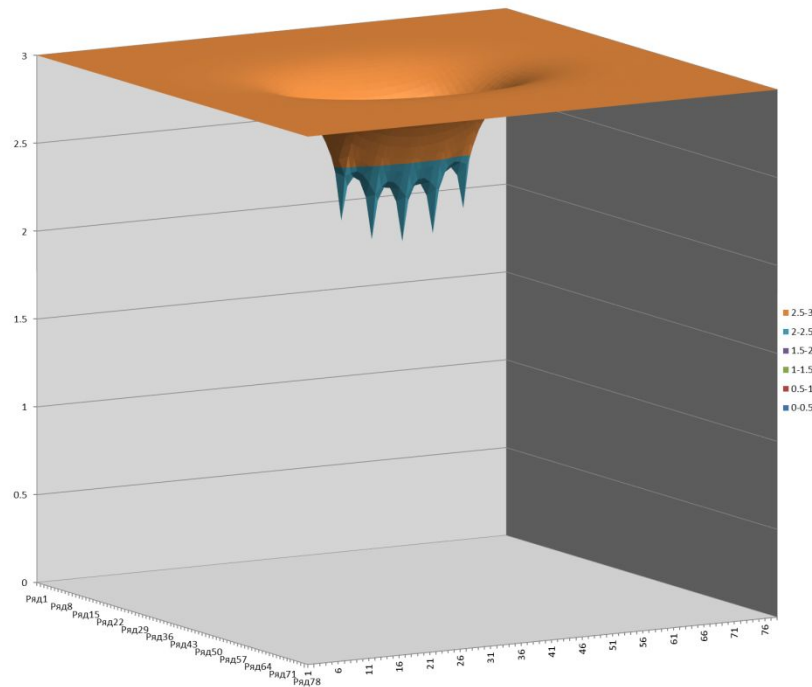
Депрессионная воронка, сформировавшаяся под влиянием одиночного водозабора



Депрессионная воронка, сформировавшаяся под влиянием группового водозабора при относительно больших и одинаковых расходах. Водозаборные скважины активно влияют друг на друга, формируется общая депрессионная воронка с большой величиной понижения



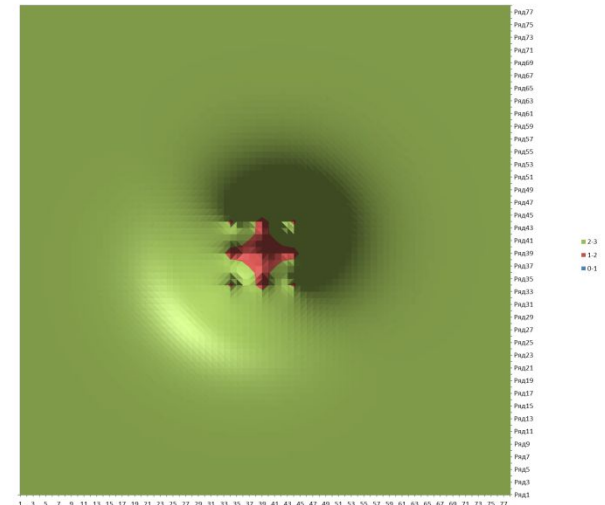
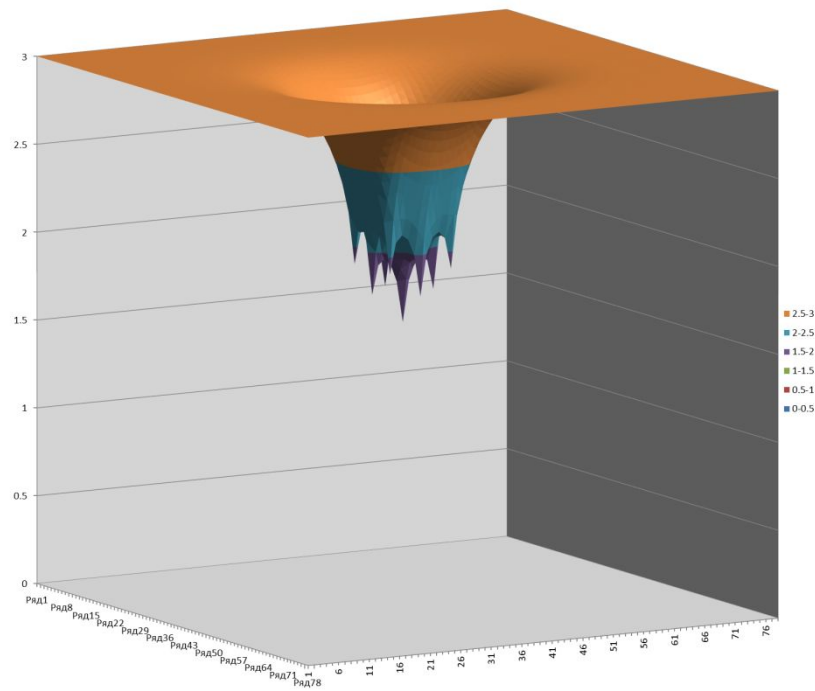
Депрессионная воронка, сформировавшаяся под влиянием группового линейного водозабора при относительно малых и одинаковых расходах. Водозаборные скважины активно влияют друг на друга, формируется общая депрессионная воронка с малой величиной понижения



Типы водозаборных сооружений

Депрессионная воронка, сформировавшаяся под влиянием группового площадного водозабора с квадратной сеткой скважин при относительно малых и одинаковых расходах.

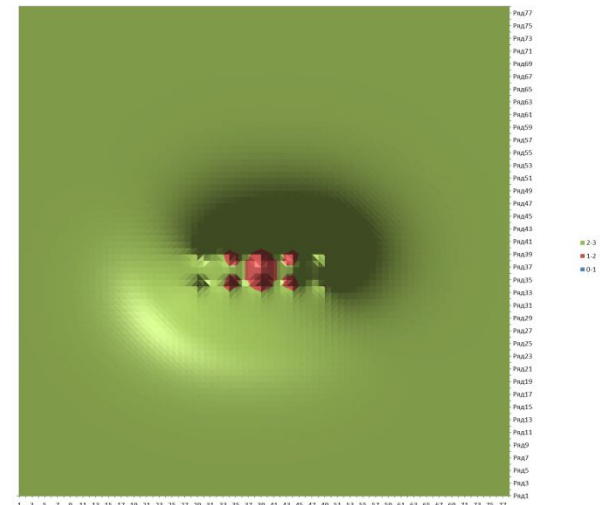
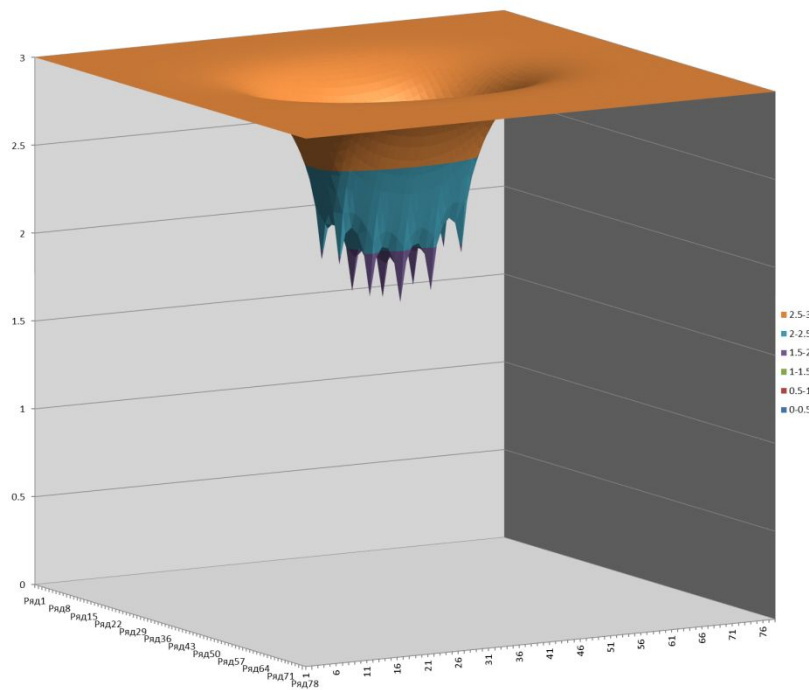
Водозаборные скважины активно влияют друг на друга, формируется общая депрессионная воронка как от работы одной скважины с увеличенным расходом



Типы водозаборных сооружений

Депрессионная воронка, сформировавшаяся под влиянием группового площадного водозабора с прямоугольной сеткой скважин при относительно малых и одинаковых расходах.

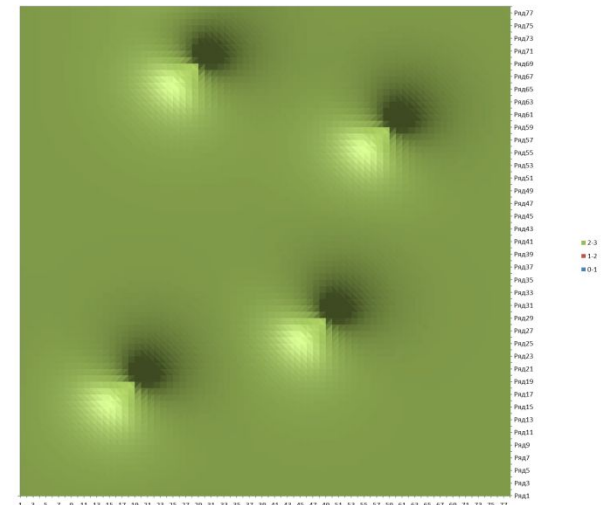
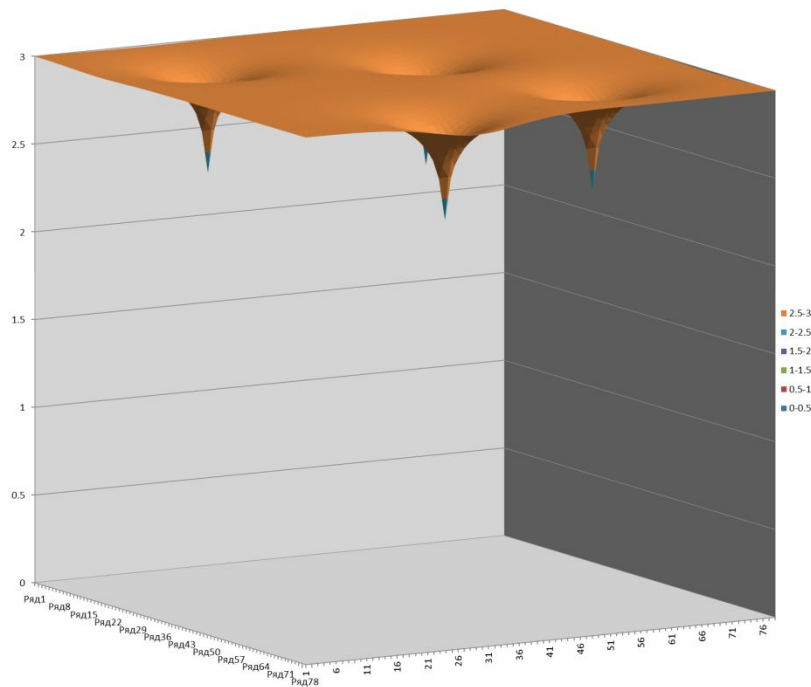
Водозаборные скважины активно влияют друг на друга, формируется общая депрессионная воронка с увеличенным понижением



Типы водозаборных сооружений

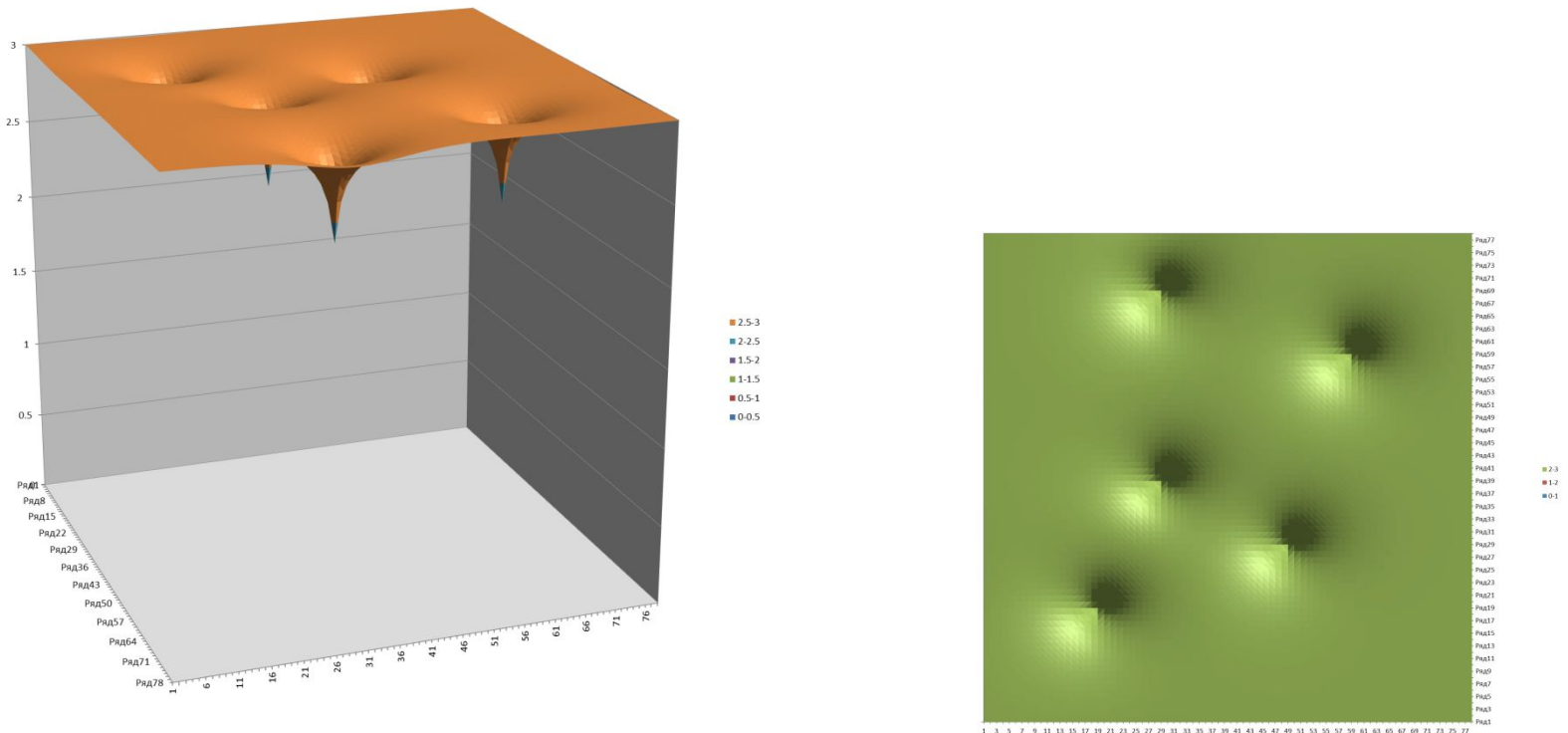
Депрессионная воронка, сформировавшаяся под влиянием группового площадного водозабора при относительно малых и одинаковых расходах.

Водозаборные скважины практически не влияют друг на друга, формируются индивидуальные депрессионные воронки водозабор только условно можно считать групповым



Типы водозаборных сооружений

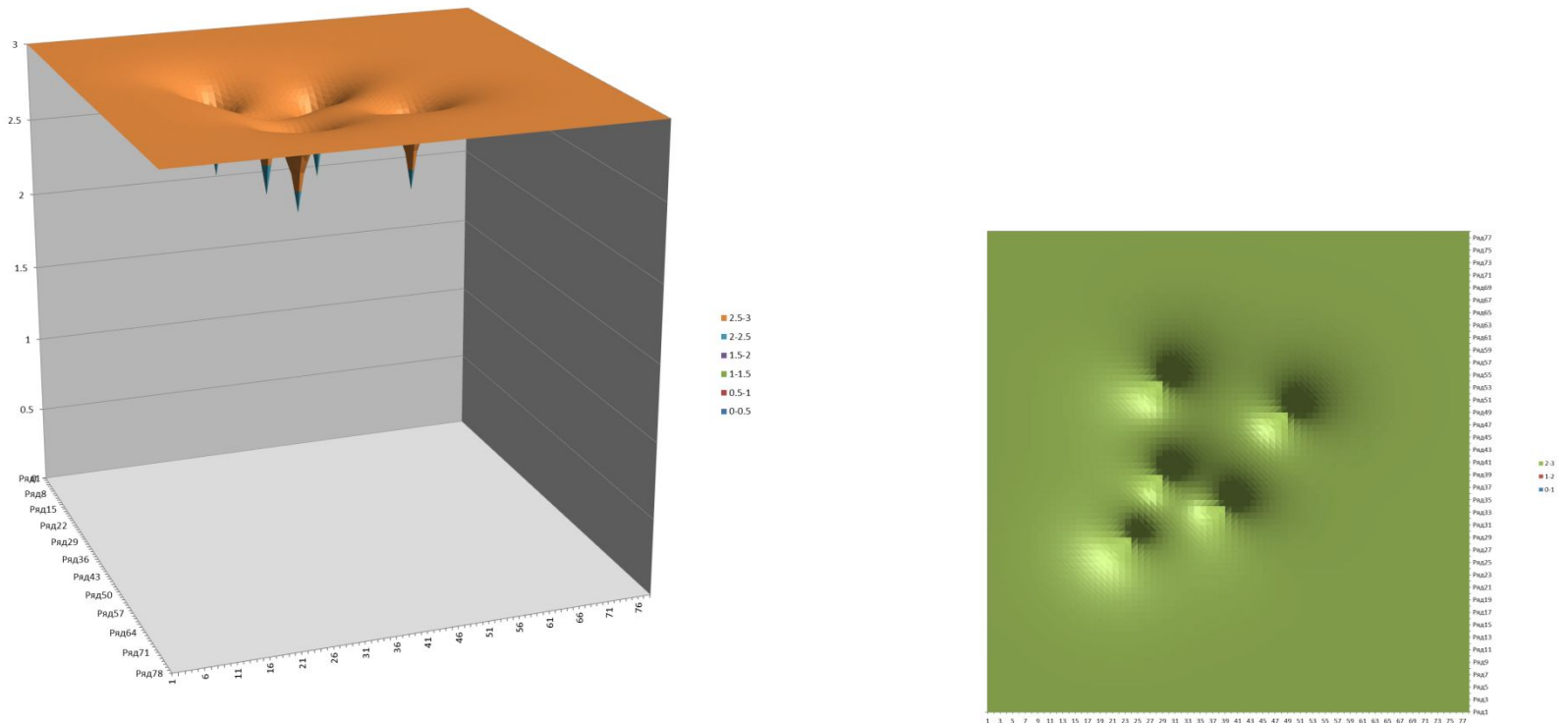
Депрессионная воронка, сформировавшаяся под влиянием группового площадного водозабора при относительно малых и одинаковых расходах. Водозаборные скважины слабо влияют друг на друга, формируются общее поле небольшого (за исключением прискважинных зон) понижения уровня на значительной площади



Типы водозаборных сооружений

Депрессионная воронка, сформировавшаяся под влиянием группового и более компактного площадного водозабора с прямоугольной сеткой скважин при относительно малых и одинаковых расходах.

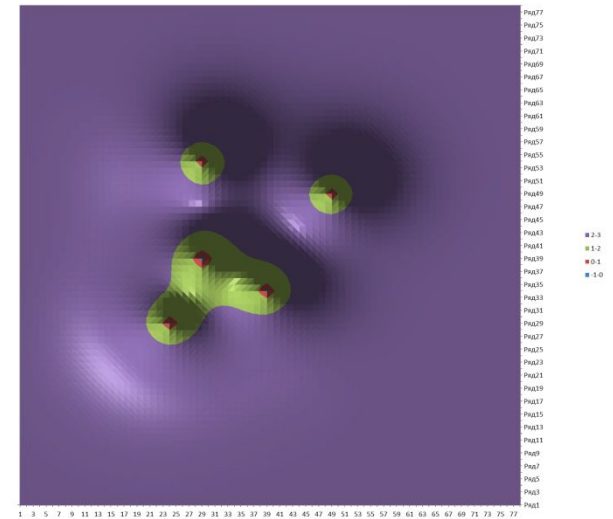
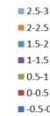
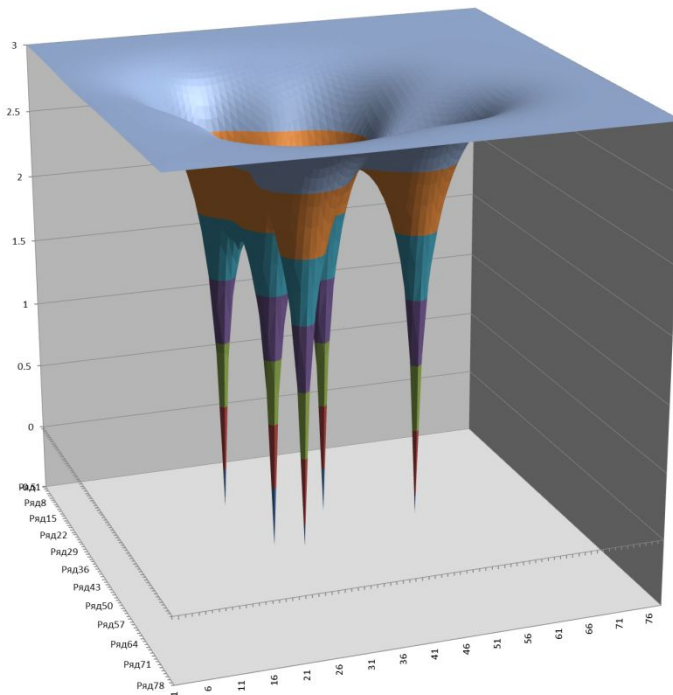
Водозаборные скважины активно влияют друг на друга, формируется общая депрессионная воронка с увеличенным понижением



Типы водозаборных сооружений

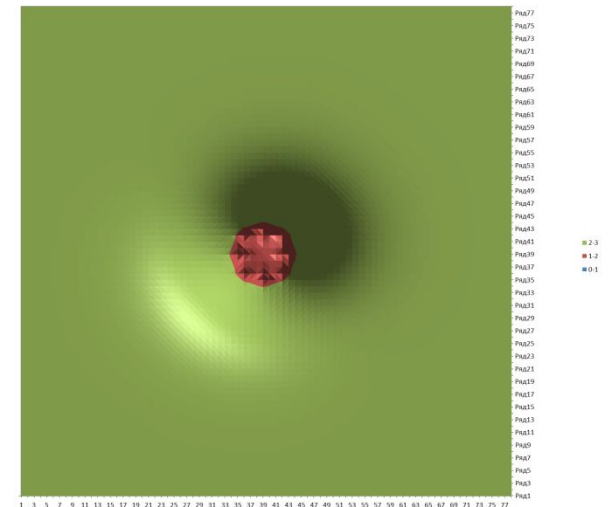
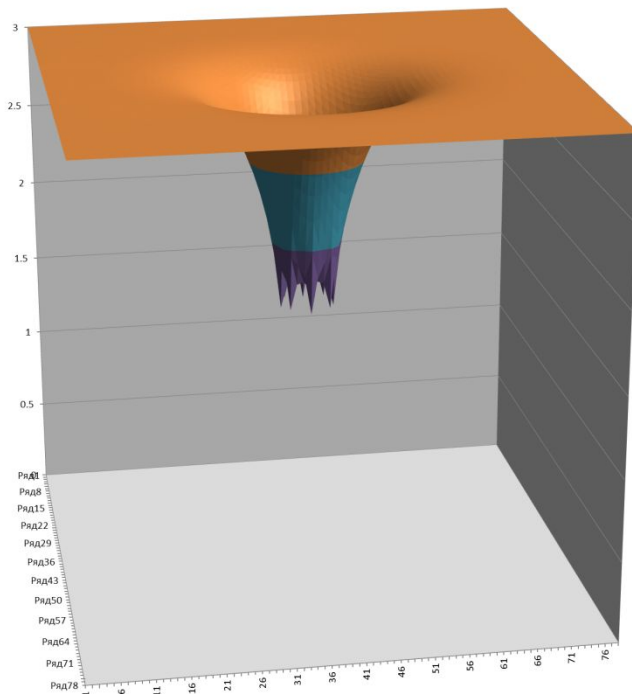
Депрессионная воронка, сформировавшаяся под влиянием группового площадного водозабора с прямоугольной сеткой скважин при увеличенных и одинаковых расходах.

Водозаборные скважины активно влияют друг на друга, формируется общая депрессионная воронка сложной формы с увеличенным понижением



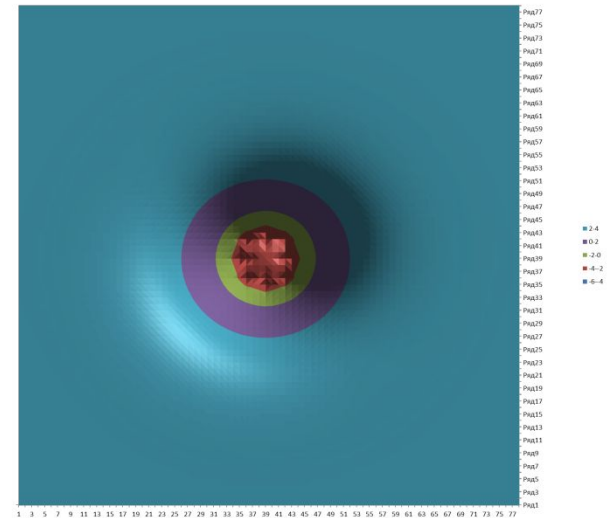
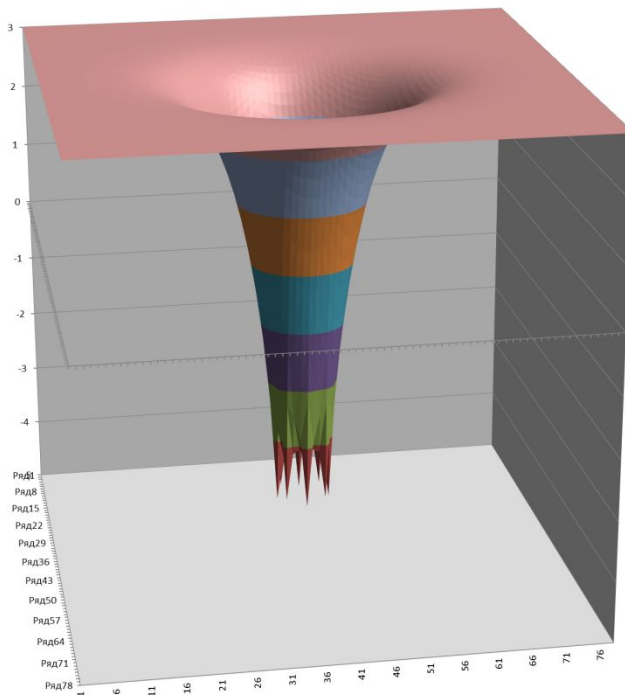
Типы водозаборных сооружений

Депрессионная воронка, сформировавшаяся под влиянием группового кольцевого водозабора малого радиуса при малых и одинаковых расходах. Водозаборные скважины активно влияют друг на друга, формируется общая депрессионная воронка подобная воронке при откачке из одной скважины



Типы водозаборных сооружений

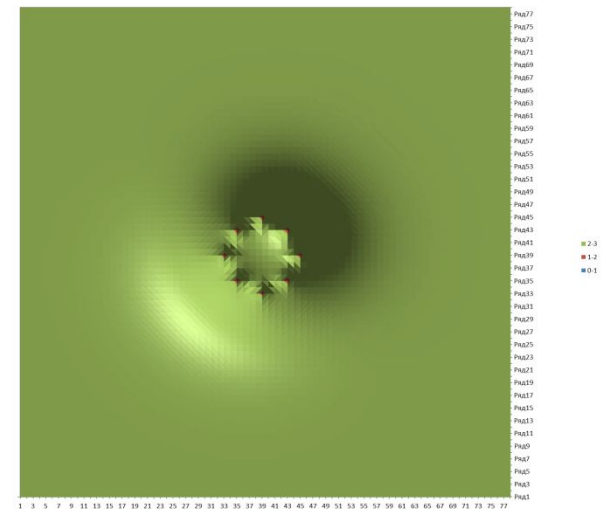
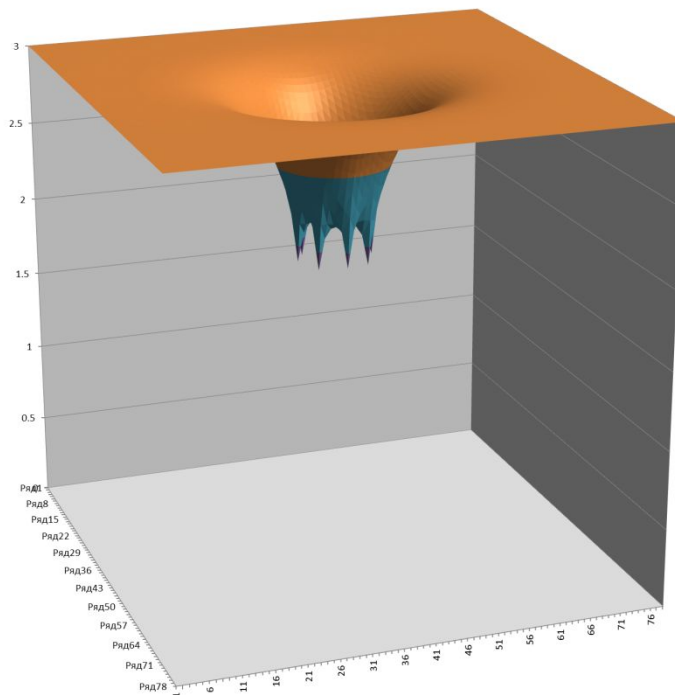
Депрессионная воронка, сформировавшаяся под влиянием группового кольцевого водозабора малого радиуса при больших и одинаковых расходах. Водозаборные скважины активно влияют друг на друга, формируется общая депрессионная воронка подобная воронке при откачке из одной скважины



Типы водозаборных сооружений

Депрессионная воронка, сформировавшаяся под влиянием группового кольцевого водозабора увеличенного радиуса при малых и одинаковых расходах.

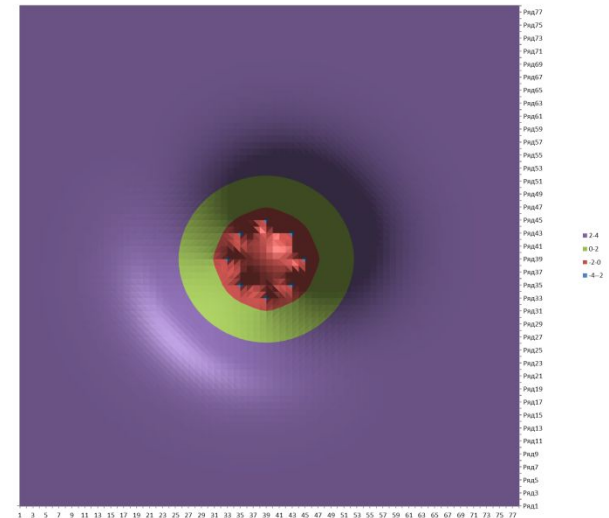
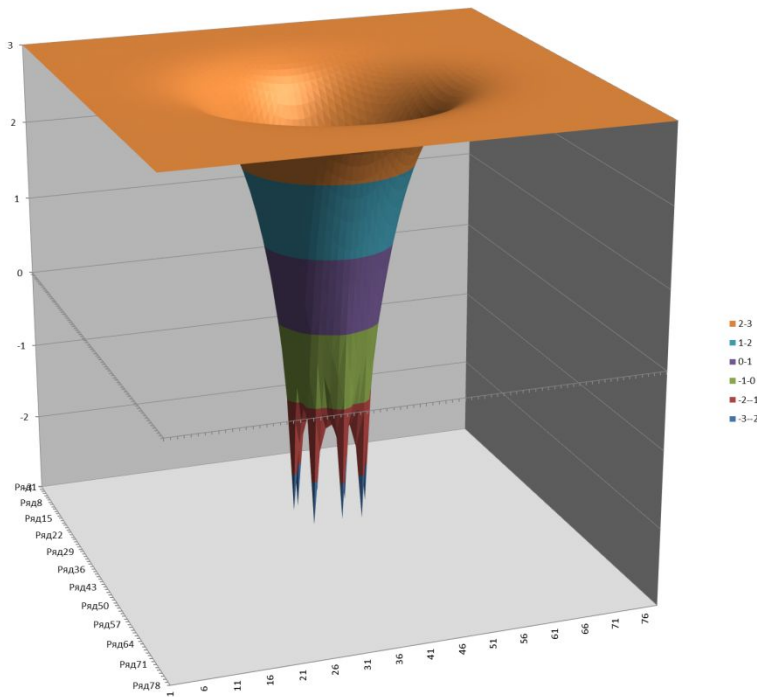
Водозаборные скважины активно влияют друг на друга, формируется общая депрессионная воронка подобная воронке при откачке из одной скважины большого диаметра



Типы водозаборных сооружений

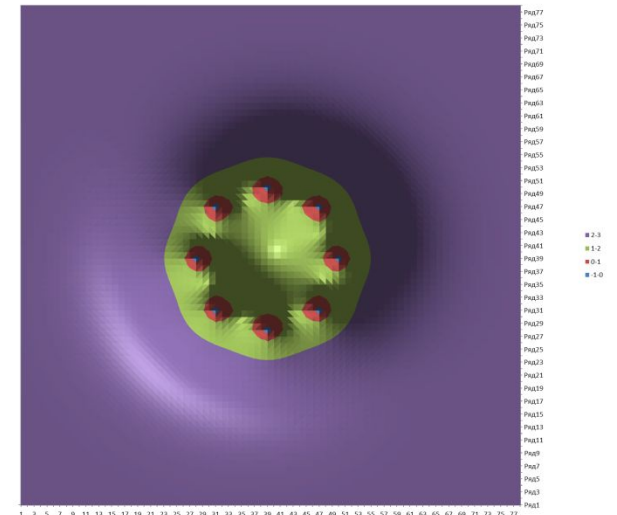
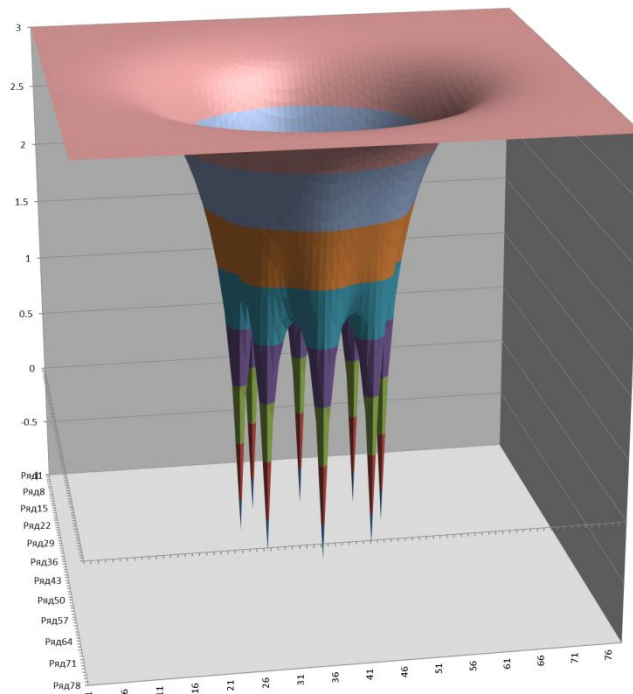
Депрессионная воронка, сформировавшаяся под влиянием группового кольцевого водозабора увеличенного радиуса при больших и одинаковых расходах.

Водозаборные скважины активно влияют друг на друга, формируется общая депрессионная воронка подобная воронке при откачке из одной скважины с большой величиной понижения уровня



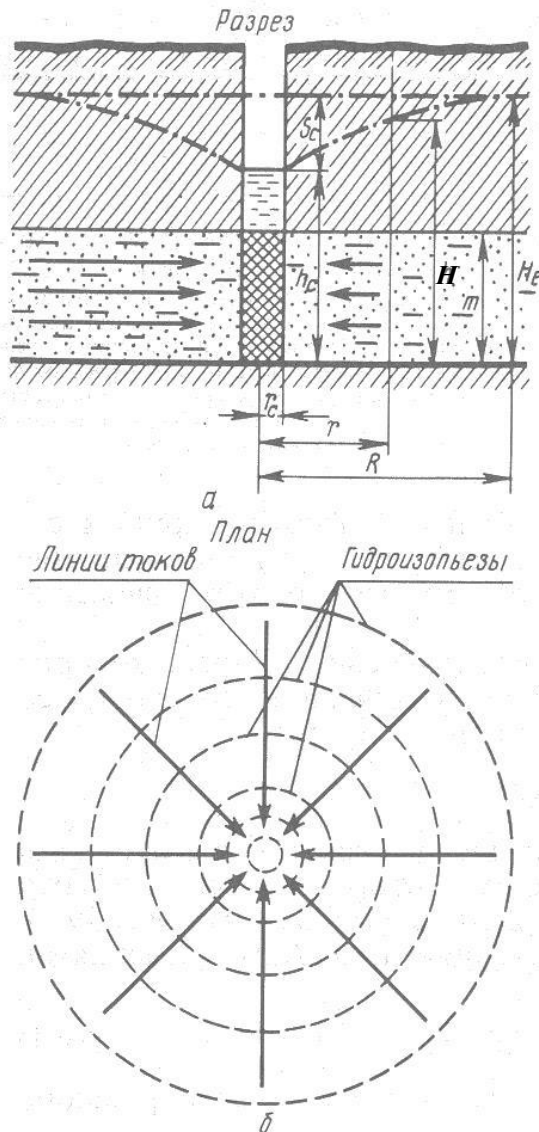
Типы водозаборных сооружений

Депрессионная воронка, сформировавшаяся под влиянием группового площадного водозабора с прямоугольной сеткой скважин при увеличенных расстояниях между скважинами и одинаковых расходах. Водозаборные скважины активно влияют друг на друга, формируется общая депрессионная воронка сложной формы увеличенной площадью и увеличенным понижением



Элементы искусственного фильтрационного потока

Элементы искусственного фильтрационного потока на водозаборном участке одиночной скважины



$H_e = H^{ст}$ – естественный напор;
статический напор;
напор до начала откачки;

$h_c = H^{дин}$ – высота столба воды в скважине;
динамический напор в скважине;

$S_c = H^{ст} - H^{дин}$; $S_c = H_e - h_c$;

S_c – понижение уровня пьезометрической поверхности в скважине;
понижение уровня подземных вод в скважине;
понижение уровня в скважине;
понижение уровня;
понижение;

m – мощность водоносного горизонта;

r_c – радиус скважины;

H – динамический напор на расстоянии r от оси скважины;

r – радиус-вектор, на конце которого определяется понижение S ;

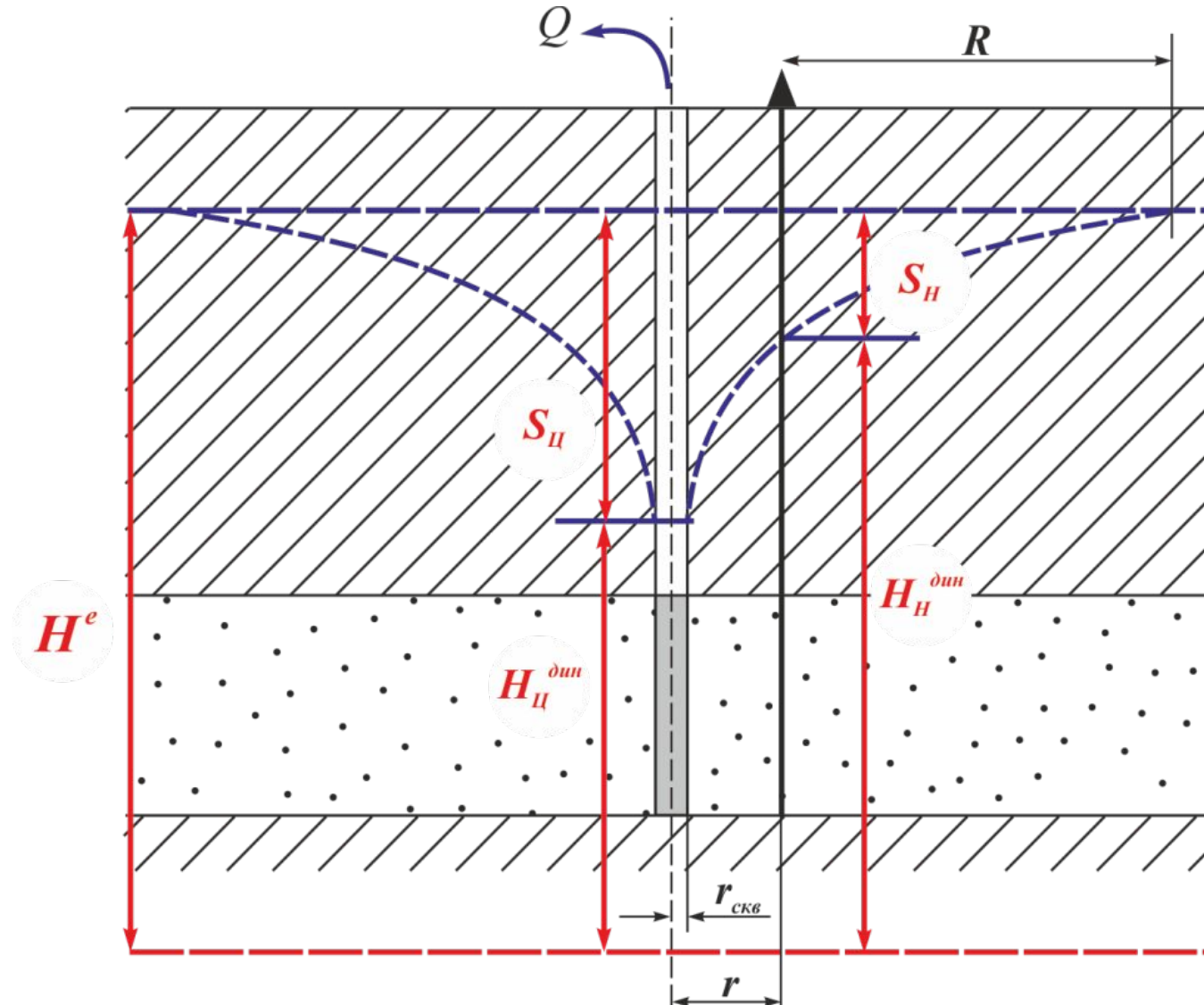
$S = H^{ст} - H$; $S = H_e - H$;

R – радиус влияния;

приведённый радиус питания;

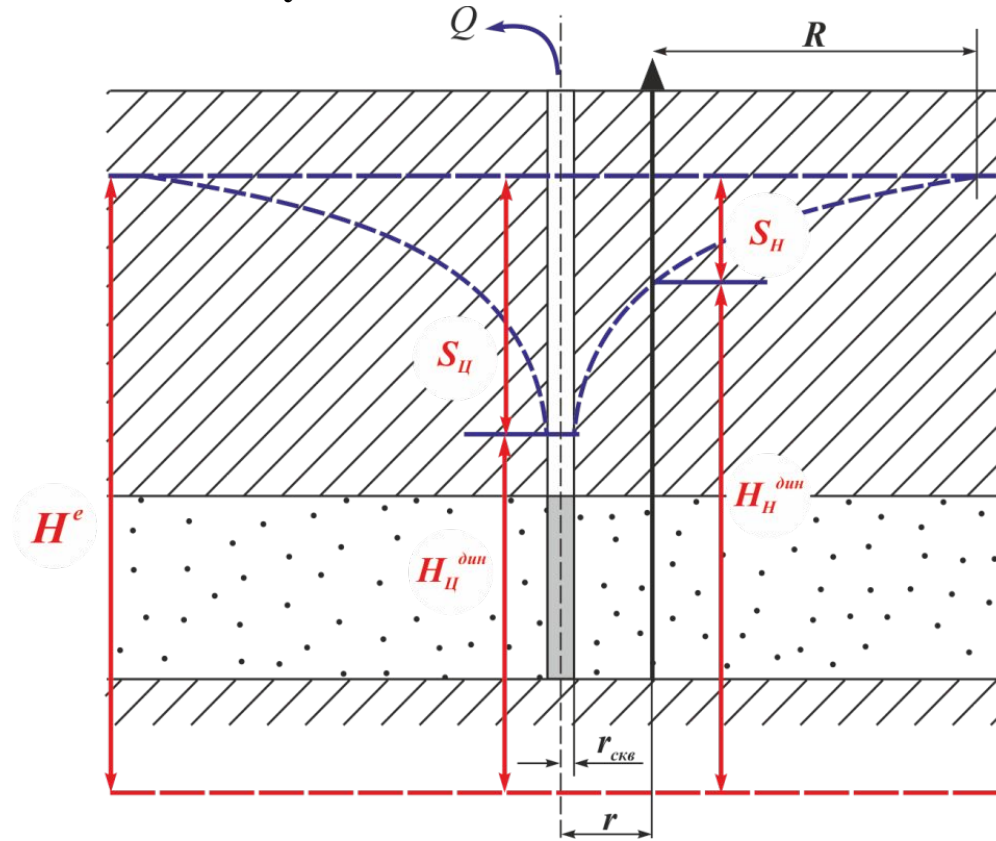
Элементы искусственного фильтрационного потока

Элементы искусственного фильтрационного потока на водозаборном участке одиночной скважины



Элементы искусственного фильтрационного потока

Элементы искусственного фильтрационного потока на водозаборном участке одиночной скважины



Градиент напора в пределах депрессионной воронки: $I_R = \frac{S_{II}}{R}$;

Градиент напора на участке r : $I_r = \frac{S_{II} - S_H}{r}$;

Градиент напора на участке $R-r$: $I_{R-r} = \frac{S_H}{R - r}$;

Режимы водопритока к скважинам

Нестационарный (неустановившийся)

депресссионная воронка формируется:
растёт понижение уровня в скважине,
гидравлические уклоны уменьшаются с течением времени

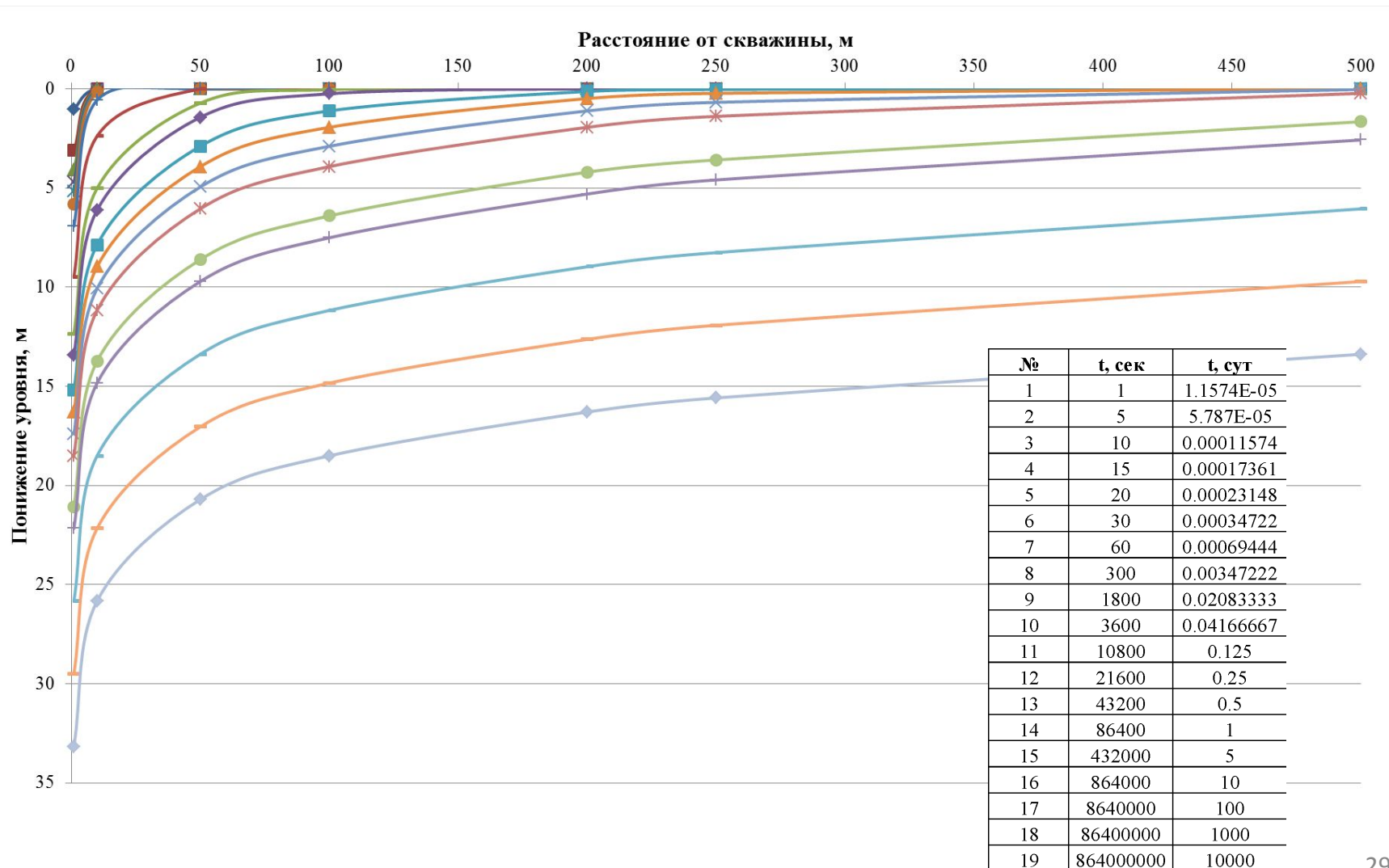
Квазистационарный (квазиустановившийся)

депресссионная растёт увеличиваясь в диаметре:
растёт понижение уровня в скважине,
гидравлические уклоны стабилизируются во времени
(депресссионная воронка опускается параллельно сама себе)

Стационарный (установившийся)

депресссионная воронка стабилизируется:
понижение уровня в скважине остаётся постоянным во времени

Изменение понижения уровня подземных вод во времени при откачке из скважины



Уравнения водопритока к скважинам

Нестационарный (неустановившийся)

уравнение Тейса:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} [-E_i(-\alpha)]; \quad \text{где} \quad \alpha = \frac{r^2}{4at};$$

Квазистационарный (квазиустановившийся)

уравнение Тейса-Джейкоба:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r^2};$$

Стационарный (установившийся)

уравнение Дюпюи:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \ln \frac{R^2}{r^2};$$

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R}{r};$$

Ограничения применения основных уравнений водопритока к скважинам

Все уравнения справедливы для:

одиной откачки

из напорного

неограниченного водоносного горизонта

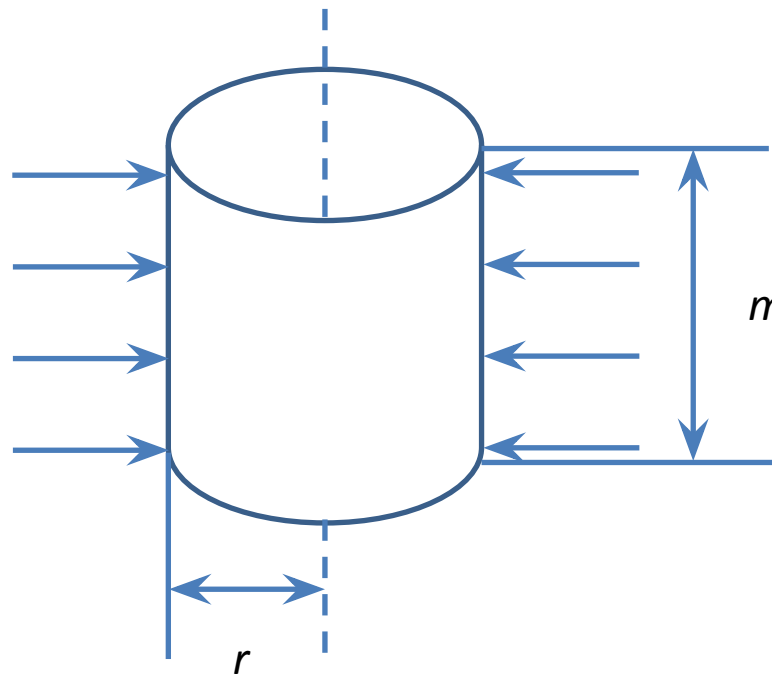
Уравнение стационарного водопритока к скважине (уравнение Дюпюи)

В соответствии с линейным законом фильтрации расход потока подземных вод определяется выражением:

$$Q = kIF;$$

где в качестве площади поперечного сечения F рассматривается боковая поверхность цилиндра:

$$F = 2\pi r m$$



Уравнение стационарного водопритока к скважине (уравнение Дюпюи)

Учитывая, что гидравлический уклон можно выразить как первую производную по расстоянию в системе цилиндрических координат:

$$I = \frac{dH}{dr};$$

Получим следующее выражение для расхода потока поступающего через фильтр в совершенную скважину:

$$Q = 2\pi r m k \left(\frac{dH}{dr} \right);$$

Полученное выражение является уравнением с разделяющимися переменными, которые в области фильтрации могут изменяться в пределах от H_e до $H_{скв}$ (напор: в скважине и за пределами области влияния) и от $r_{скв}$ до R (расстояние: от оси скважины до стенки фильтра и до границы области влияния) :

Уравнение Дюпюи

$$\int_{H_{\text{СКВ}}}^{H_e} dH = \frac{Q}{2\pi km} \int_{r_{\text{СКВ}}}^R \frac{dr}{r};$$

Интегрирование полученного выражения даёт итоговое уравнение стационарного водопритока:

$$H_e - H_c = \frac{Q}{2\pi km} \ln\left(\frac{R}{r}\right);$$

$$S_{\text{СКВ}} = \frac{Q}{2\pi km} \ln\left(\frac{R}{r}\right);$$

Получено уравнение для определения установившейся величины понижения уровня (разность между статическим и динамическим напором) на стенке фильтра скважины при её известной производительности

Табличные интегралы от некоторых функций

$$1. \int dx = x + C. \quad \int_{H_{\text{СКВ}}}^{H_e} dH;$$

$$2. \int x^a dx = \frac{x^{a+1}}{a+1} + C \quad (a \neq -1).$$

$$3. \int \frac{dx}{x} = \ln |x| + C. \quad \int_{r_{\text{СКВ}}}^R \frac{dr}{r};$$

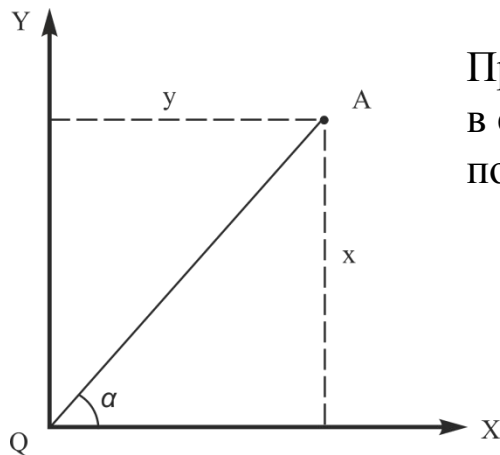
$$\ln(R) - \ln(r) = \ln\left(\frac{R}{r}\right);$$

Уравнение нестационарного водопритока к скважине (уравнение Тейса)

Уравнение нестационарной фильтрации выведено на основе использования фундаментальных положений теории теплопроводности (закон Фурье: плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры):

$$V_{(x,y,t)} = \frac{Q}{4\pi\eta t} e^{-\frac{x^2+y^2}{4\eta t}};$$

V – изменение температуры в точке с координатами x и y за время t , расположенной в плоском тепловом поле, образованном источником с интенсивностью Q при коэффициенте теплопроводности среды η



Пространственное положение точки A , однозначно определяется в системе полярных координат длиной радиус-вектора r и углом его поворота α

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{y}{x};$$

Уравнение нестационарного водопритока к скважине (уравнение Тейса)

Для понижения уровня S в точке, расположенной на конце радиус-вектора r уравнение принимает такую форму:

$$S = \frac{1}{4\pi km} \int_{\tau=0}^{\tau=t} \frac{Q(\tau) e^{-\frac{r^2}{4a(t-\tau)}}}{(t-\tau)} d\tau;$$

где km – коэффициент водопроницаемости пласта;

τ – текущее время

t – расчётное время

a – коэффициент пьезопроводности

Тейс сделал подстановку:

$$\frac{r^2_{\text{тогда}}}{4a(t-\tau)} = \alpha;$$

$$(t-\tau) = \frac{r^2}{\alpha 4a};$$

$$-\tau = \frac{r^2}{4a\alpha} - t = \frac{r^2 \alpha^{-1}}{4a} - t;$$

Уравнение нестационарного водопритока к скважине (уравнение Тейса)

После замены:

$$d\tau = \frac{r^2}{4a\alpha^2} d\alpha;$$

Возможна подстановка и сокращение:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-\alpha} 4a\alpha r^2}{r^2 4a\alpha^2} d\alpha;$$

После сокращения под знаком интеграла появляется известная интегральная показательная функция:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-\alpha}}{\alpha} d\alpha;$$

Если $\frac{r^2}{4at} = \alpha;$, то:

Уравнение нестационарного водопритока к скважине (уравнение Тейса)

получаем уравнение Тейса:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} [-E_i(-\alpha)];$$

Значения интегральной показательной функции могут вычислены разложением в ряд Тейлора:

$$[-E_i(-\alpha)] = -0,5772 - \ln \alpha + \alpha - \frac{\alpha^2}{4} + \frac{\alpha^3}{18} - \frac{\alpha^4}{96} + \dots \mp \frac{\alpha^n}{n \cdot n!};$$

и табулированы

Упругий режим фильтрации

В условиях упругого режима фильтрации возмущение от скважины распространяется с задержкой во времени с учётом емкостных и упругих свойств воды и водовмещающей породы.

Сжимаемость воды

$\beta_{\text{в}}$ - коэффициент упругости воды, $(2,7 \div 5) \times 10^{-6} \text{ 1/at}$

$\beta_{\text{в}} = -\frac{1}{V_{\text{в}}} \frac{dV_{\text{в}}}{dP}$; показывает на какую часть своего первоначального объёма изменяется объём воды при увеличении гидростатического давления на единицу (одну атмосферу или 10 м водяного столба), минус показывает, что при увеличении давления объём жидкости уменьшается

Упругий режим фильтрации

Сжимаемость скелета горной породы

при воздействии на воду избыточного гидростатического давления жидкость передаёт внешнее усилие на частицы дисперсной породы и сжимает их, увеличивая объём пор (порового пространства)

β_c - коэффициент сжимаемости скелета породы, $(0,3 \div 2) \times 10^{-6} \text{ 1/at}$

$$\beta_c = \frac{1}{V_0} \frac{dV_{\text{пор}}}{dP} = \frac{dn}{dP};$$

показывает на какую часть первоначального объёма изменяется объём скелета породы при увеличении внешнего давления на единицу (одну атмосферу);

V_0 – начальный объём скелета;

dP – интенсивность изменения давления

Упругий режим фильтрации

Комплексный коэффициент, учитывающий упругость воды и породы

β^* - упругоёмкости породы

$\beta^* = \beta_v n + \beta_c$ эта объёмная величина показывает характеризует свойства любой единицы объёма водонасыщенной горной породы в условиях упругого режима фильтрации;
 n – пористость горной породы

$\mu^* = \beta^* m$ в практике аналитических гидродинамических расчётов чаще используется величина коэффициента упругой ёмкости пласта (водоносного горизонта);
 m – мощность пласта (водоносного горизонта)

β^* - характеризует то относительное количество воды, которое выделится из какого-либо объёма водонасыщенной горной породы при изменении давления на единицу

μ^* - характеризует относительное изменение объема воды при изменении давления отнесённого ко всему пласту (водоносному горизонту)

Упругий режим фильтрации

Комплексный коэффициент, учитывающий упругость воды и породы

β^* коэффициент упругоёмкости породы входит в коэффициент пьезопроводности, который характеризует скорость перераспределения давлений в пласте (a), он тем выше, чем выше фильтрационные свойства водовмещающей породы и тем медленнее распространяется возмущение, чем выше упругость пласта.

Емкостные параметры напорных и безнапорных водоносных горизонтов

$$a = \frac{k}{\beta^*} = \frac{km}{\mu^*} \quad \text{коэффициент пьезопроводности, } (10^5 \div 10^7 \text{ м}^2/\text{сут})$$

$$a_y = \frac{kh_{\text{ср}}}{\mu} \quad \text{коэффициент уровнепроводности, } (10^3 \div 10^5 \text{ м}^2/\text{сут})$$

μ – гравитационная водоотдача

Значения интегральной показательной функции в табличной форме

$r^2/(4*a*t)$		$N*10^{-15}$	$N*10^{-14}$	$N*10^{-13}$	$N*10^{-12}$	$N*10^{-11}$	$N*10^{-10}$	$N*10^{-9}$	$N*10^{-8}$	$N*10^{-7}$	$N*10^{-6}$	$N*10^{-5}$	$N*10^{-4}$	$N*10^{-3}$	$N*10^{-2}$	$N*10^{-1}$	$N*10^1$
N		-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	1
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	33.961561	31.658976	29.356391	27.053805	24.751122	22.448635	20.14605	17.843465	15.54088	13.238296	10.93572	8.633225	6.331539	4.03793	1.822924	2.19E-01
1.1	2	33.866251	31.563665	29.26108	26.958495	24.65591	22.353325	20.05074	17.748155	15.44557	13.142986	10.840411	8.537925	6.236329	3.943614	1.737107	1.86E-01
1.2	3	33.779239	31.476654	29.174069	26.871484	24.568899	22.266314	19.963729	17.661144	15.358559	13.055975	10.7534	8.450923	6.149418	3.857597	1.659542	1.58E-01
1.3	4	33.699196	31.396611	29.094026	26.791441	24.488856	22.186271	19.883686	17.581101	15.278516	12.975932	10.673359	8.37089	6.069475	3.778548	1.588899	1.35E-01
1.4	5	33.625088	31.322503	29.019918	26.717333	24.414748	22.112163	19.809578	17.506993	15.204408	12.901824	10.599252	8.296792	5.995467	3.705433	1.524146	1.16E-01
1.5	6	33.556096	31.253511	28.950925	26.64834	24.345755	22.04317	19.740585	17.438	15.135415	12.832831	10.53026	8.22781	5.926574	3.637433	1.464462	1.00E-01
1.6	7	33.491557	31.188972	28.886387	26.583802	24.281217	21.978632	19.676047	17.373461	15.070877	12.768293	10.465722	8.163281	5.862135	3.573887	1.409187	8.63E-02
1.7	8	33.430932	31.128347	28.825762	26.523177	24.220592	21.918007	19.615422	17.312837	15.010252	12.707668	10.405099	8.102666	5.801611	3.514254	1.357781	7.47E-02
1.8	9	33.373774	31.071189	28.768604	26.466019	24.163434	21.860849	19.558264	17.255678	14.953094	12.65051	10.347941	8.045518	5.744552	3.458087	1.309796	6.47E-02
1.9	10	33.319707	31.017122	28.714537	26.411952	24.109366	21.806781	19.504196	17.201611	14.899026	12.596443	10.293875	7.991461	5.690585	3.405011	1.264858	5.62E-02
2	11	33.268414	30.965828	28.663243	26.360658	24.058073	21.755488	19.452903	17.150318	14.847733	12.54515	10.242583	7.940178	5.639391	3.354708	1.222651	4.89E-02
2.1	12	33.219623	30.917038	28.614453	26.311868	24.009283	21.706698	19.404113	17.101528	14.798943	12.49636	10.193793	7.891397	5.590701	3.306907	1.182902	4.26E-02
2.2	13	33.173103	30.870518	28.567933	26.265348	23.962763	21.660178	19.357593	17.055008	14.752423	12.44984	10.147274	7.844887	5.544281	3.261377	1.14538	3.72E-02
2.3	14	33.128652	30.826067	28.523481	26.220896	23.918311	21.615726	19.313141	17.010556	14.707971	12.405388	10.102824	7.800446	5.499929	3.217914	1.109883	3.25E-02
2.4	15	33.086092	30.783507	28.480922	26.178337	23.875752	21.573167	19.270581	16.967996	14.665411	12.362829	10.060265	7.757896	5.457469	3.176343	1.076235	2.84E-02
2.5	16	33.04527	30.742685	28.4401	26.137515	23.83493	21.532345	19.229759	16.927174	14.62459	12.322007	10.019444	7.717084	5.416747	3.136508	1.044283	2.49E-02
2.6	17	33.006049	30.703464	28.400879	26.098294	23.795709	21.493124	19.190539	16.887954	14.583369	12.282786	9.980224	7.677873	5.377626	3.098275	1.013889	2.19E-02
2.7	18	32.968309	30.665724	28.363139	26.060554	23.757969	21.455383	19.152798	16.850213	14.547628	12.245046	9.942485	7.640143	5.339986	3.061522	0.984933	1.92E-02
2.8	19	32.931941	30.629356	28.326771	26.024186	23.721601	21.419016	19.116431	16.813846	14.511261	12.208678	9.906118	7.603785	5.303718	3.02614	0.957308	1.69E-02
2.9	20	32.89685	30.594265	28.29168	25.989095	23.68651	21.383925	19.081339	16.778754	14.47617	12.173587	9.871028	7.568704	5.268727	2.992035	0.930918	1.48E-02
8.8	79	31.786809	29.484224	27.181639	24.879054	22.576469	20.273884	17.971298	15.668713	13.366129	11.063552	8.761046	6.459253	4.164569	1.939304	0.269413	1.55E-05
8.9	80	31.775509	29.472924	27.170339	24.867754	22.565169	20.262584	17.959999	15.657414	13.35483	11.052253	8.749748	6.447963	4.153369	1.928962	0.264749	1.39E-05
9	81	31.764336	29.461751	27.159166	24.856581	22.553966	20.251411	17.948826	15.646241	13.343656	11.041079	8.738575	6.4368	4.142295	1.918745	0.260184	1.24E-05
9.1	82	31.753286	29.450701	27.148116	24.845531	22.542946	20.240361	17.937776	15.635191	13.332606	11.03003	8.727526	6.42576	4.131345	1.908651	0.255714	1.11E-05
9.2	83	31.742357	29.439772	27.137187	24.834602	22.532017	20.229432	17.926847	15.624262	13.321677	11.019101	8.716598	6.414841	4.120515	1.898678	0.251336	9.99E-06
9.3	84	31.731546	29.428961	27.126376	24.823791	22.521206	20.218621	17.916036	15.613451	13.310867	11.00829	8.705788	6.40404	4.109804	1.888822	0.24705	8.95E-06
9.4	85	31.720851	29.418266	27.115681	24.813096	22.510511	20.207926	17.90534	15.602755	13.300171	10.997595	8.695094	6.393355	4.099208	1.879081	0.242851	8.02E-06
9.5	86	31.710269	29.407684	27.105099	24.802514	22.499929	20.197343	17.894758	15.592173	13.289589	10.987013	8.684513	6.382783	4.088725	1.869453	0.238738	7.18E-06
9.6	87	31.699798	29.397213	27.094627	24.792042	22.489457	20.186872	17.884287	15.581702	13.279118	10.976541	8.674043	6.372321	4.078354	1.859936	0.234708	6.44E-06
9.7	88	31.689435	29.38685	27.084265	24.78168	22.479094	20.176509	17.873924	15.571339	13.268755	10.966179	8.663681	6.361969	4.06809	1.850526	0.23076	5.77E-06
9.8	89	31.679178	29.376593	27.074008	24.771423	22.468838	20.166253	17.863668	15.561083	13.258499	10.955922	8.653425	6.351722	4.057933	1.841222	0.226891	5.17E-06
9.9	90	31.669026	29.366441	27.063856	24.761271	22.458686	20.156101	17.853515	15.55093	13.248346	10.94577	8.643274	6.34158	4.04788	1.832022	0.2231	4.64E-06

Уравнение квазистационарного водопритока к скважине (уравнение Тейса-Джейкоба)

Большая часть слагаемых бесконечного знакпеременного ряда Тейлора быстро убывает по модулю и в практических расчётах её можно не учитывать:

$$[-E_i(-\alpha)] = -0,5772 - \ln \alpha + \alpha - \frac{\alpha^2}{4} + \frac{\alpha^3}{18} - \frac{\alpha^4}{96} + \dots \mp \frac{\alpha^n}{n \cdot n!};$$

Тогда справедливо приближённое равенство:

$$[-E_i(-\alpha)] = -0,5772 - \ln \frac{r^2}{4at} = \ln \frac{4at}{r^2} - \ln 1,78 = \ln \frac{2,25at}{r^2};$$

и возможна замена интегральной показательной функции логарифмической:

Уравнение квазистационарного водопритока к скважине (уравнение Тейса-Джейкоба)

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \ln \frac{2.25at}{r^2};$$

При уменьшении аргумента интегральной показательной функции с ростом времени откачки наступает момент, когда значения интегральной показательной функции практически не отличаются от логарифмической зависимости.

Если $\alpha = \frac{r^2}{4at} \ll 0.05$ то возможна замена уравнения Тейса на

уравнение Тейса-Джейкоба.

В этом случае откачку считают длительной. Если указанный критерий не соблюдается, то откачка считается кратковременной, а расчеты понижения уровня выполняют по уравнению Тейса.

Формирование депрессионной воронки в окрестностях работающей скважины является сложным процессом, поэтапно развивающимся во времени.

Существует три основных режима водопритока к скважинам:
нестационарный,
квазистационарный и
стационарный.

В условиях каждого из режимов водопритока можно рассчитать понижение уровня подземных вод на произвольном расстоянии от возмущающей скважины, но для этого следует правильно выбирать уравнения водопритока:
уравнение Тейса,
уравнение Тейса-Джейкоба,
уравнение Дюпюи.

Главным критерием для выбора расчетной зависимости служит длительность откачки (периода возмущения).

Все уравнения справедливы для одиночной откачки из напорного неограниченного водоносного горизонта.