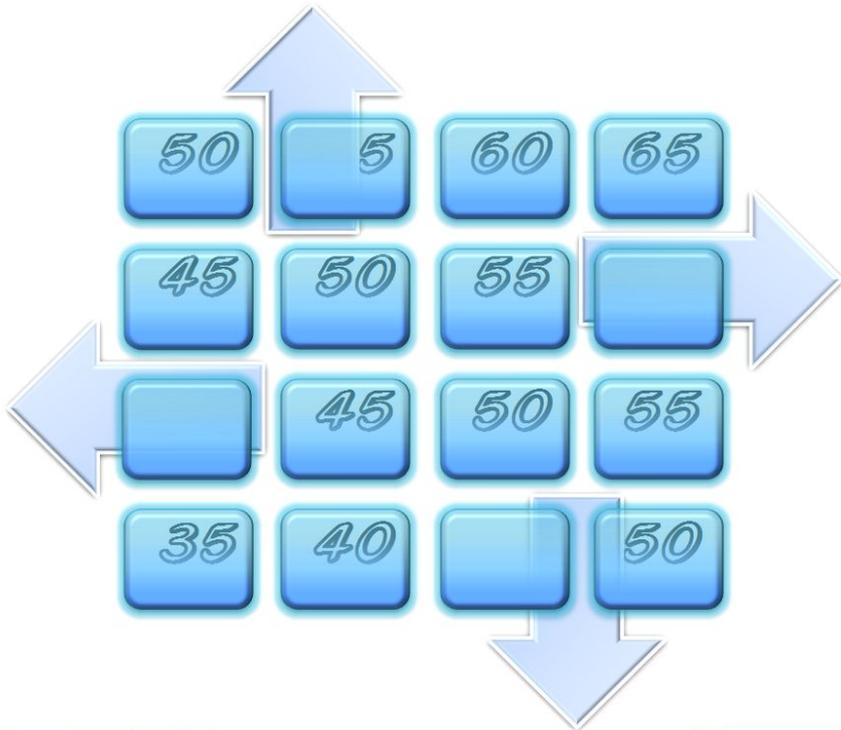


# Гидродинамика флюидных систем и моделирование гидродинамических процессов



**Лекция № 7**  
Расчёт скважин в  
условиях  
неограниченного  
водоносного горизонта

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

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

Типы водозаборных сооружений

вертикальные, горизонтальные скважины

совершенные, несовершенные скважины

ифльтрационные, фильтрационные водозаборы

одиночные, групповые (взаимодействующие) водозаборы

Элементы искусственного фильтрационного потока

понижение уровня, расход скважины, радиус влияния, радиус-вектор

Режимы водопритока к скважинам

неустановившийся (нестационарный)

квазиустановившийся (квазистационарный)

установившийся (стационарный)

Уравнения водопритока

уравнение Тейса (неустановившийся режим),

уравнение Тейса-Джейкоба (квазиустановившийся режим),

уравнение Дюпюи (установившийся режим)

Ограничения в применении базовых уравнений водопритока к скважинам

Задача № 1 (водоснабжение).

Оценить понижение уровня в скважине, вскрывшей напорный водоносный горизонт мощностью 10 м, представленный среднезернистыми песками с коэффициентом фильтрации 5 м/сут при радиусе влияния, равном 500 м. Проектный расход скважины составляет 200 м<sup>3</sup>/сут.

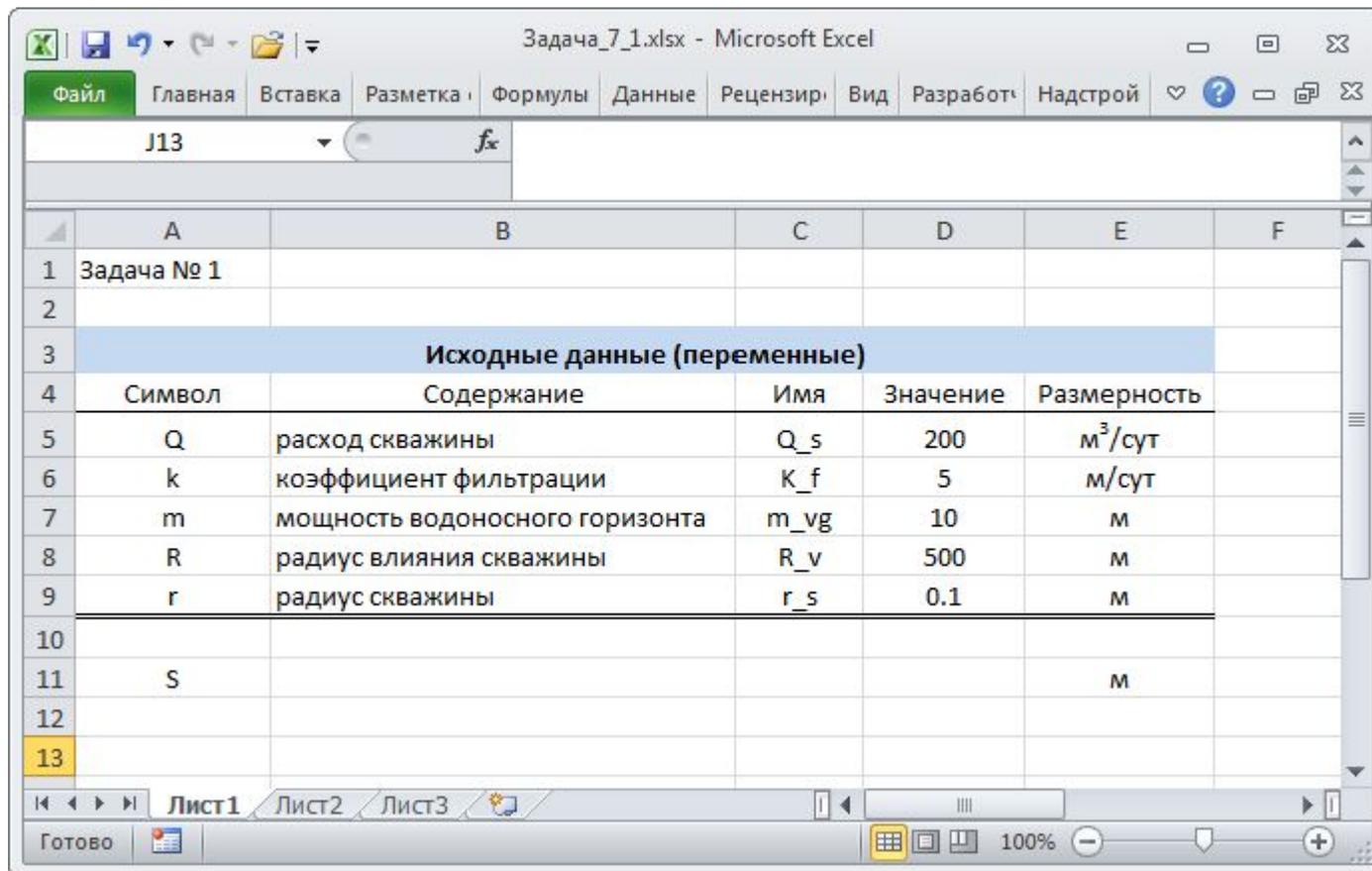
Решение традиционное:

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R}{r} = \frac{200}{2 \times \pi \times 5 \times 10} \ln \frac{500}{0,1} = 5,42 \text{ м};$$

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Зонирование поля таблицы для ввода переменных, участвующих в расчёте, их имен, значений и размерности.



The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled "Задача\_7\_1.xlsx". The spreadsheet contains a table of initial data for a well problem. The table is structured as follows:

Исходные данные (переменные)					
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут	
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут	
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м	
R	радиус влияния скважины	R_v	500	м	
r	радиус скважины	r_s	0.1	м	
S				м	

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Назначение имён из диапазона значений

Создать из выделенного (Ctrl+Shift+F3)

Автоматическое создание имен для выделенных ячеек.

Большинство пользователей предпочитает использовать текст в верхней строке крайнего левого столбца выделения.

Создание имен из выделенного диапазона

Создать имена из значений:

- в строке выше
- в столбце слева
- в строке ниже
- в столбце справа

OK Отмена

Символ	Содержание	Имя
Q	расход скважины	Q_s
k	коэффициент фильтрации	K_f
m	мощность водоносного горизонта	m_vg
R	радиус влияния скважины	R_v
r	радиус скважины	r_s

**Диапазон имен и значений переменных**

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Имя переменной «расход скважины»

The screenshot shows the Microsoft Excel interface with the file name 'Задача\_7\_1.xlsx'. The formula bar shows 'Q\_s' selected, with a value of 200. The table below contains the following data:

Исходные данные (переменные)					
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут	
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут	
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м	
R	радиус влияния скважины	R_v	500	м	
r	радиус скважины	r_s	0.1	м	
S				м	

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Имя переменной «коэффициент фильтрации»

Задача\_7\_1.xlsx - Microsoft Excel

Главная Вставка Разметка Формулы Данные Рецензирование Вид Разработчик Надстройки

**K\_f** fx 5

	A	B	C	D	E	F
1	Задача № 1					
2						
3	Исходные данные (переменные)					
4	Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
5	Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут	
6	k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут	
7	m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м	
8	R	радиус влияния скважины	R_v	500	м	
9	r	радиус скважины	r_s	0.1	м	
10						
11	S				м	
12						
13						

Лист1 Лист2 Лист3

Готово 100%

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Имя переменной «мощность водоносного горизонта»

Задача\_7\_1.xlsx - Microsoft Excel

Главная Вставка Разметка Формулы Данные Рецензирование Вид Разработчик Надстройки

m\_vg fx 10

	A	B	C	D	E	F
1	Задача № 1					
2						
3	Исходные данные (переменные)					
4	Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
5	Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут	
6	k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут	
7	m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м	
8	R	радиус влияния скважины	R_v	500	м	
9	r	радиус скважины	r_s	0.1	м	
10						
11	S				м	
12						
13						

Лист1 Лист2 Лист3

Готово 100%

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Имя переменной «радиус влияния скважины»

Задача\_7\_1.xlsx - Microsoft Excel

Формулы 500

	A	B	C	D	E	F
1	Задача № 1					
2						
3	Исходные данные (переменные)					
4	Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
5	Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут	
6	k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут	
7	m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м	
8	R	радиус влияния скважины	R_v	500	м	
9	r	радиус скважины	r_s	0.1	м	
10						
11	S				м	
12						
13						

Лист1 Лист2 Лист3

Готово 100%

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Имя переменной «радиус скважины»

Задача\_7\_1.xlsx - Microsoft Excel

Главная Вставка Разметка Формулы Данные Рецензир Вид Разработч Надстрой

$r_s$  0.1

	A	B	C	D	E	F
1	Задача № 1					
2						
3	Исходные данные (переменные)					
4	Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
5	Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут	
6	k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут	
7	m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м	
8	R	радиус влияния скважины	R_v	500	м	
9	r	радиус скважины	r_s	0.1	м	
10						
11	S				м	
12						
13						

Лист1 Лист2 Лист3

Готово 100%

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Расчётная формула с использованием имен переменных, показанная в строке формул

The screenshot shows the Microsoft Excel interface with the following data:

Исходные данные (переменные)					
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут	
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут	
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м	
R	радиус влияния скважины	R_v	500	м	
r	радиус скважины	r_s	0.1	м	
S			5.42	м	

The formula bar shows the formula: 
$$=(Q\_s/(2*ПИ()*K\_f*m\_vg))*LN(R\_v/r\_s)$$

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Расчётная формула с использованием имен переменных, показанная в строке формул и

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled "Задача\_7\_1.xlsx". The spreadsheet contains a table of initial data (исходные данные) and a formula for calculating S. The formula is highlighted in red in both the formula bar and the cell.

Исходные данные (переменные)					
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут	
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут	
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м	
R	радиус влияния скважины	R_v	500	м	
r	радиус скважины	r_s	0.1	м	

Formula bar:  $= (Q_s / (2 * \text{ПИ}() * K_f * m_{vg})) * \text{LN}(R_v / r_s)$

Cell D11:  $= (Q_s / (2 * \text{ПИ}() * K_f * m_{vg})) * \text{LN}(R_v / r_s)$

в расчётной ячейке при редактировании её содержимого ( $F2$ )

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Расчёт понижения для расхода скважины  $200 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

Screenshot of Microsoft Excel showing a spreadsheet for a well problem. The spreadsheet has columns for Symbol, Content, Name, Value, and Dimensionality. The value for  $Q_s$  is 200, and the calculated value for  $S$  is 5.42.

Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность
Q	расход скважины	Q_s	200	$\text{м}^3/\text{сут}$
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	$\text{м}/\text{сут}$
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м
R	радиус влияния скважины	R_v	500	м
r	радиус скважины	r_s	0.1	м
S			5.42	м

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Расчёт понижения для расхода скважины  $1000 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

Screenshot of Microsoft Excel showing a spreadsheet for a well problem. The spreadsheet has columns for Symbol, Content, Name, Value, and Dimension. The value for  $Q_s$  is 1000, and the calculated value for  $S$  is 27.11.

	A	B	C	D	E	F
1	Задача № 1					
2						
3	Исходные данные (переменные)					
4	Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
5	Q	расход скважины	Q_s	1000	$\text{м}^3/\text{сут}$	
6	k	коэффициент фильтрации	K_f	5	$\text{м}/\text{сут}$	
7	m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м	
8	R	радиус влияния скважины	R_v	500	м	
9	r	радиус скважины	r_s	0.1	м	
10						
11	S			27.11	м	
12						
13						

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Расчёт понижения для расхода скважины  $2000 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

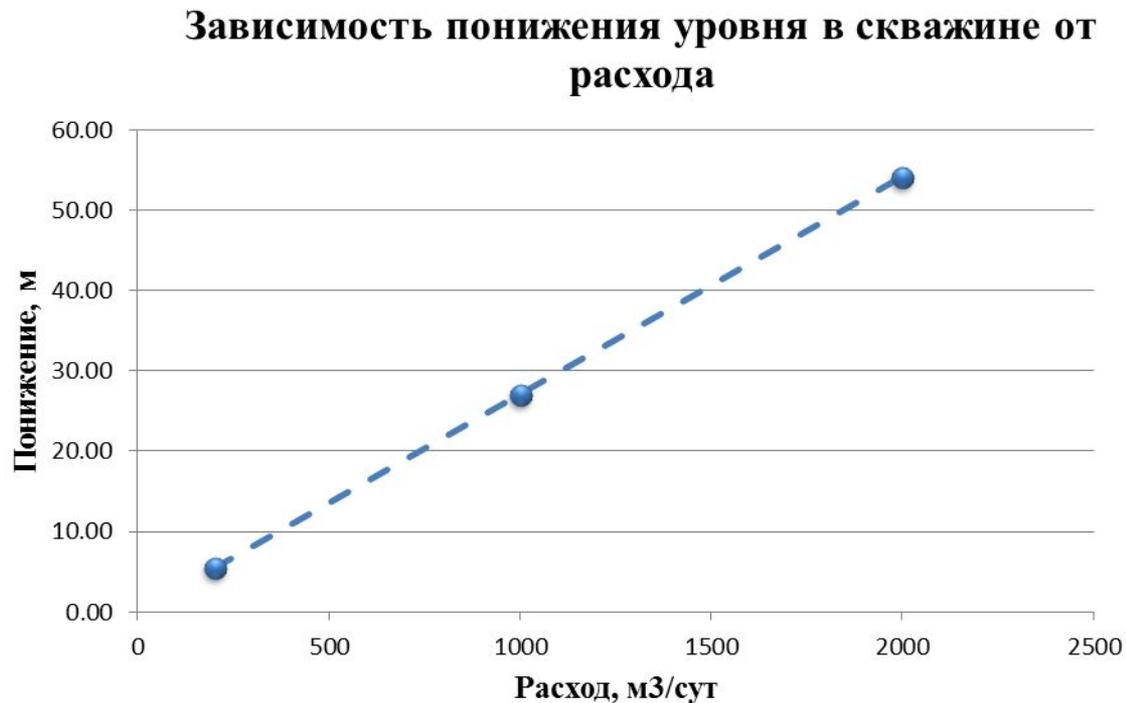
Screenshot of Microsoft Excel showing a spreadsheet for a well problem. The spreadsheet has columns A-G and rows 1-14. Row 1 is "Задача № 1". Row 3 is a header "Исходные данные (переменные)". Row 4 is a sub-header with columns: Символ, Содержание, Имя, Значение, Размерность. Rows 5-9 contain data for variables Q, k, m, R, and r. Row 11 shows a calculated value for S.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Задача № 1						
2							
3	Исходные данные (переменные)						
4	Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность		
5	Q	расход скважины	Q_s	2000	м <sup>2</sup> /сут		
6	k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут		
7	m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м		
8	R	радиус влияния скважины	R_v	500	м		
9	r	радиус скважины	r_s	0.1	м		
10							
11	S			54.22	м		
12							
13							
14							

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Результаты использования простейшей численно-аналитической модели откачки в режиме установившейся фильтрации (вариант № 1) для исследования зависимости понижения уровня от расхода.



—●— S, м

Q, м <sup>3</sup> /сут	S, м
200	5.42
1000	27.11
2000	54.22

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.  
Исследование зависимости понижения уровня от расстояния.

Задача\_7\_1.xlsx - Microsoft Excel

Исходные данные (переменные)					
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
Q	расход скважины	Q_s	2000	м <sup>3</sup> /сут	
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут	
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м	
R	радиус влияния скважины	R_v	500	м	
r	радиус скважины	r_s	0.1	м	
H	напор естественный	H_e	100	м	
	S		54.22	м	

№	Радиус-вектор	Понижение
1	r, м	S, м
2	0.1	54.22
3	1	39.56
4	5	29.32
5	10	24.90
6	20	20.49
7	50	14.66
8	100	10.25
9	150	7.66
10	200	5.83
11	250	4.41
12	300	3.25
13	350	2.27
14	400	1.42
15	500	0.00

Доработка алгоритма расчёта понижения заключается в использовании не единственного значения радиус-вектора, а массива таких значений, расположенных на рабочем листе в столбце «радиус-вектор».

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.  
Исследование зависимости понижения уровня от расстояния.

Задача\_7\_1.xlsx - Microsoft Excel

Файл Главная Вставка Разметка с Формулы Данные Рецензир Вид Разработч Надстройч ?

C15 
$$=(Q_s/(2*\text{ПИ}()*K_f*m_{vg}))*\text{LN}(R_v/B15)$$

Исходные данные (переменные)					
Символ	Содержание		Имя	Значение	Размерность
Q	расход скважины		Q_s	2000	м <sup>3</sup> /сут
k	коэффициент фильтрации		K_f	5	м/сут
m	мощность водоносного горизонта		m_vg	10	м
R	радиус влияния скважины		R_v	500	м
r	радиус скважины		r_s	0.1	м
H	напор естественный		H_e	100	м
S				54.22	м

№	Радиус-вектор	Понижение
1	r, м	S, м
2	0.1	54.22
3	1	39.56
4	5	29.32
5	10	24.90
6	20	20.49
7	50	14.66
8	100	10.25
9	150	7.66
10	200	5.83
11	250	4.41
12	300	3.25
13	350	2.27
14	400	1.42
15	500	0.00

Формула для расчёта понижения ссылается не на константу, а на текущее значение расстояния.

Формула для расчёта понижения записана (путем копирования в смежную ячейку) в каждой строке столбца «Понижение»

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.  
Исследование зависимости понижения уровня от расстояния.

Задача\_7\_1.xlsx - Microsoft Excel

Файл Главная Вставка Разметка с Формулы Данные Рецензир Вид Разработч Надстройч ?

C15 
$$=(Q_s/(2*\text{ПИ}()*K_f*m_{vg}))*\text{LN}(R_v/B15)$$

Исходные данные (переменные)					
Символ	Содержание		Имя	Значение	Размерность
Q	расход скважины		Q_s	2000	м <sup>3</sup> /сут
k	коэффициент фильтрации		K_f	5	м/сут
m	мощность водоносного горизонта		m_vg	10	м
R	радиус влияния скважины		R_v	500	м
r	радиус скважины		r_s	0.1	м
H	напор естественный		H_e	100	м

№	Радиус-вектор	Понижение
1	r, м	S, м
2	0.1	54.22
3	1	39.56
4	5	29.32
5	10	24.90
6	20	20.49
7	50	14.66
8	100	10.25
9	150	7.66
10	200	5.83
11	250	4.41
12	300	3.25
13	350	2.27
14	400	1.42
15	500	0.00

Формула для расчёта понижения ссылается не на константу, а на текущее значение расстояния.

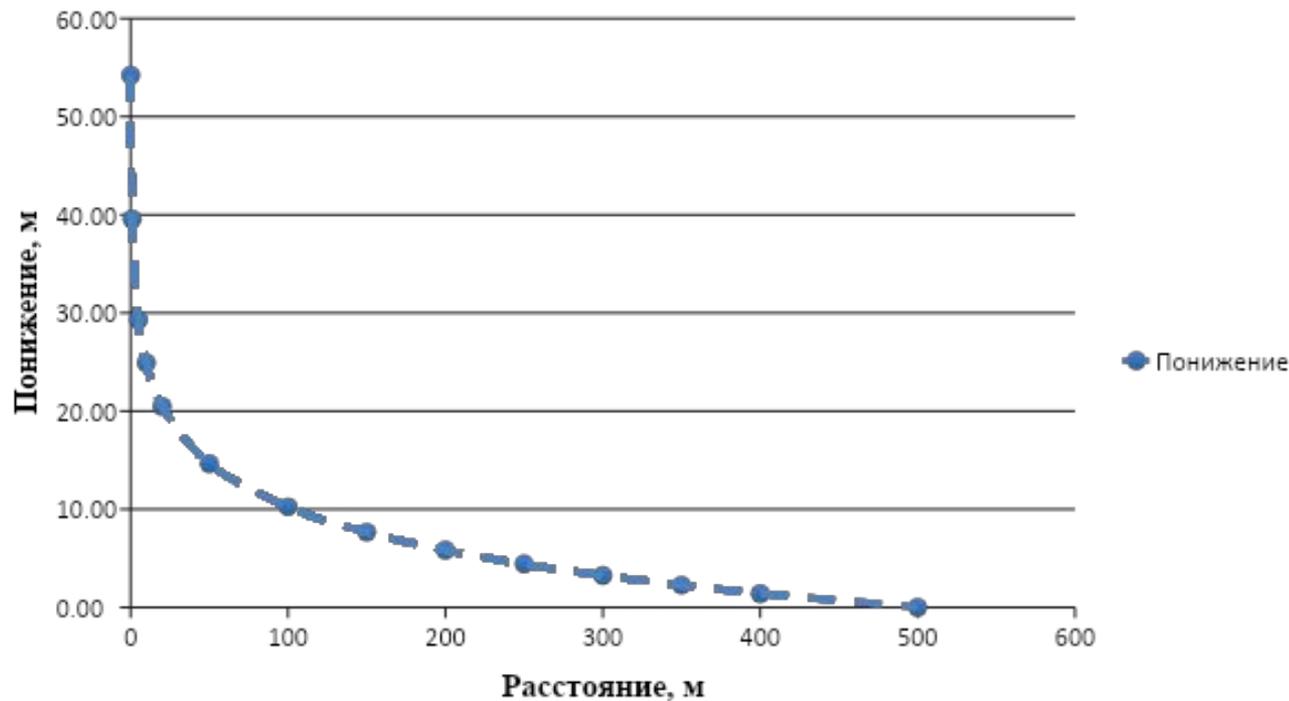
Формула для расчёта понижения записана (путем копирования в смежную ячейку) в каждой строке столбца «Понижение»

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Результаты использования простейшей численно-аналитической модели откачки в режиме установившейся фильтрации (вариант № 2) для исследования зависимости понижения уровня от расстояния.

**Зависимость понижения уровня от расстояния**



№	r, м	S, м
1	0.1	54.22
2	1	39.56
3	5	29.32
4	10	24.90
5	20	20.49
6	50	14.66
7	100	10.25
8	150	7.66
9	200	5.83
10	250	4.41
11	300	3.25
12	350	2.27
13	400	1.42
14	500	0.00

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Расчёт величины динамического напора, на основе значений понижения уровня.

Задача\_7\_1.xlsx - Microsoft Excel

СУММ  $=E10-C15$

Исходные данные (переменные)					
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
Q	расход скважи	Q_s	2000	м <sup>3</sup> /сут	
k	коэффициент	K_f	5	м/сут	
m	мощность вод	m_vg	10	м	
R	радиус влияния	R_s	500	м	
r	радиус скважи	r_s	0.1	м	
H	напор ест.ств.	H_e	100	м	

Радиус-вектор		Понижение	Напор
№	r, м	s, м	He, м
1	0.1	54.22	$=E10-C15$
2	1	39.26	
3	5	29.32	
4	10	24.90	
5	20	20.49	
6	50	14.66	
7	100	10.25	
8	150	7.66	
9	200	5.83	
10	250	4.41	
11	300	3.25	
12	350	2.27	
13	400	1.42	
14	500	0.00	

8	R_v	500	М
9	r_s	0.1	М
10	H_e	100	М
11			
12		54.22	М
13	Напор		
14	He, м		
15	$=E10-C15$		
16			

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Расчёт (путем копирования формулы в соседние ячейки) величины динамического напора, на основе значений понижения уровня.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled "Задача\_7\_1.xlsx". The spreadsheet is divided into several sections. The first section, starting from row 3, is titled "Исходные данные (переменные)" and lists parameters: Q (расход скважины), k (коэффициент), m (мощность вод), R (радиус влияния), r (радиус скважины), H (напор естественного), S (Радиус-вектор), and H\_e (Напор). The second section, starting from row 14, is a table with columns: №, r, м; S, м; H\_e, м. The data in this table is as follows:

№	r, м	S, м	H <sub>e</sub> , м
1	0.1	54.22	45.78
2	1	39.56	-39.56
3	5	29.32	24.90
4	10	24.90	-24.90
5	20	20.49	-20.49
6	50	14.66	-14.66
7	100	10.25	-10.25
8	150	7.66	-7.66
9	200	5.83	-5.83
10	250	4.41	-4.41
11	300	3.25	-3.25
12	350	2.27	-2.27
13	400	1.42	-1.42
14	500	0.00	0.00

Показана типичная ошибка при копировании формул с применением относительной адресации ячеек.

Подавляет появление подобной ошибки использование абсолютного адреса строки, в которой расположена ячейка с величиной естественного напора «E\$10»

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Расчёт (путем копирования формулы в соседние ячейки с использованием абсолютной адресации) величины динамического напора, на основе значений понижения уровня.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

Исходные данные (переменные)					
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
Q	расход скважи	Q_s	2000	м <sup>3</sup> /сут	
k	коэффициент	K_f	5	м/сут	
m	мощность вод	m_vg	10	м	
R	радиус влияния	R_v	500	м	
r	радиус скважи	r_s	0.1	м	
H	напор естественн	H_e	100	м	
S			54.22	м	
Радиус-вектор		Понижение	Напор		
№	r, м	S, м	He, м		
1	0.1	54.22	45.78		
2	1	39.56	60.44		
3	5	29.32	70.68		
4	10	24.90	75.10		
5	20	20.49	79.51		
6	50	14.66	85.34		
7	100	10.25	89.75		
8	150	7.66	92.34		
9	200	5.83	94.17		
10	250	4.41	95.59		
11	300	3.25	96.75		
12	350	2.27	97.73		
13	400	1.42	98.58		
14	500	0.00	=E\$10-C28		

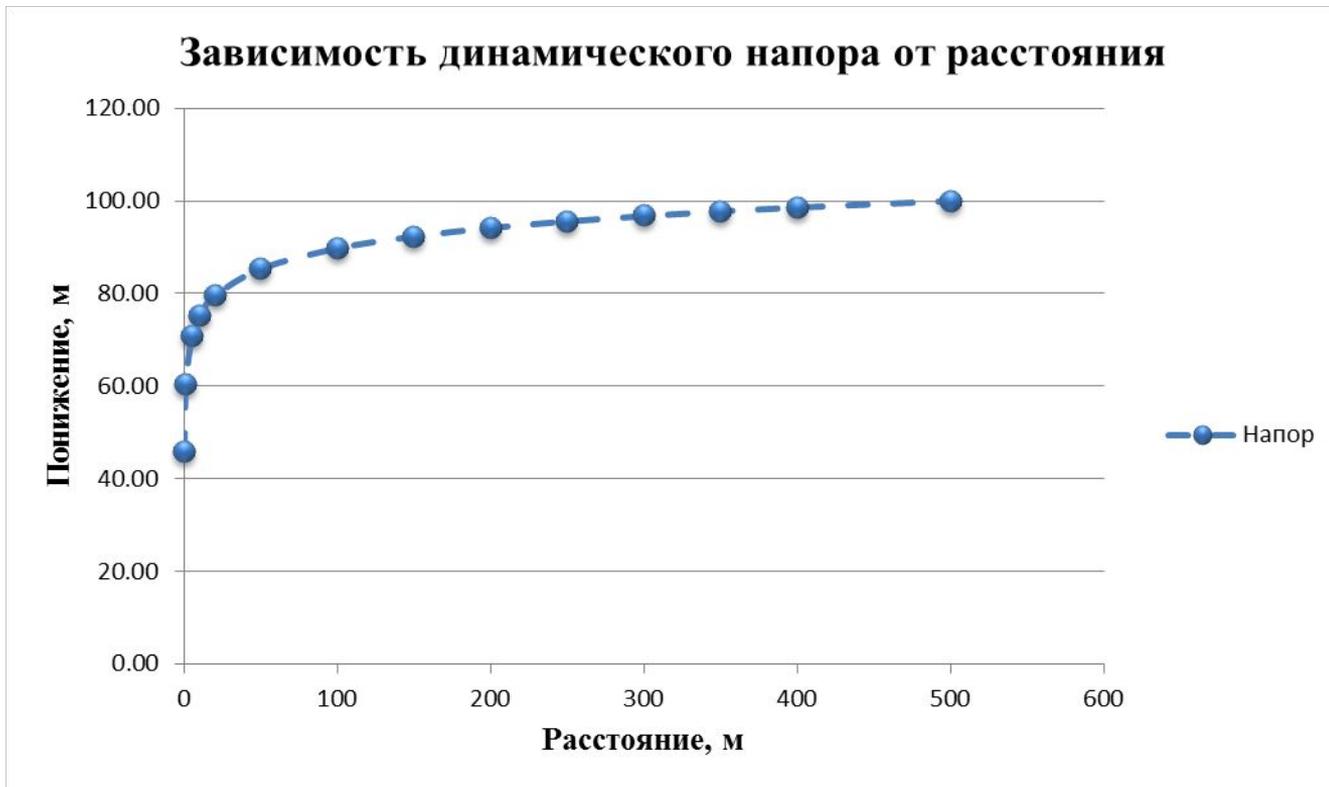
В столбце «напор» вычитание производится с использованием абсолютного адреса строки, в которой расположена ячейка с величиной естественного напора «E\$10».

При копировании расчётной формулы динамического напора адрес ячейки естественного напора не изменяется

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 1 в среде электронных таблиц.

Результаты использования простейшей численно-аналитической модели откачки в режиме установившейся фильтрации (вариант № 2) для исследования зависимости величины динамического напора от расстояния.



№	r, м	He, м
1	0.1	45.78
2	1	60.44
3	5	70.68
4	10	75.10
5	20	79.51
6	50	85.34
7	100	89.75
8	150	92.34
9	200	94.17
10	250	95.59
11	300	96.75
12	350	97.73
13	400	98.58
14	500	100.00

Задача № 1 (осушение).

Оценить производительность скважины, вскрывшей напорный водоносный горизонт мощностью 10 м, представленный среднезернистыми песками с коэффициентом фильтрации 5 м/сут при радиусе влияния, равном 500 м. Проектное понижение уровня подземных вод составляет 10 м.

Решение традиционное:

$$Q = \frac{2\pi kmS}{\ln \frac{R}{r}} = \frac{2 \times \pi \times 5 \times 10 \times 10}{\ln \frac{500}{0,1}} \cong 370 \text{ м};$$

# Одиночный водозабор в условиях установившегося водопритока

Задача № 1 (осушение).

Решение методом подбора:

Исходные данные (переменные)				
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность
Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м
R	радиус влияния скважины	R_v	500	м
r	радиус скважины	r_s	0.1	м
<hr/>				
S			5.42	м

Исходные данные (переменные)				
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность
Q	расход скважины	Q_s	300	м <sup>3</sup> /сут
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м
R	радиус влияния скважины	R_v	500	м
r	радиус скважины	r_s	0.1	м
<hr/>				
S			8.13	м

Исходные данные (переменные)				
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность
Q	расход скважины	Q_s	400	м <sup>3</sup> /сут
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м
R	радиус влияния скважины	R_v	500	м
r	радиус скважины	r_s	0.1	м
<hr/>				
S			10.84	м

Исходные данные (переменные)				
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность
Q	расход скважины	Q_s	370	м <sup>3</sup> /сут
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м
R	радиус влияния скважины	R_v	500	м
r	радиус скважины	r_s	0.1	м
<hr/>				
S			10.03	м

## Одиночный водозабор в условиях квазиустановившегося водопритока

Задача № 2.

Оценить понижение уровня в скважине через сутки после начала откачки, из напорного водоносного горизонта мощностью 10 м, представленного среднезернистыми песками с коэффициентом фильтрации 5 м/сут и упругой водоотдачей 0,002. Проектный расход скважины составляет 200 м<sup>3</sup>/сут.

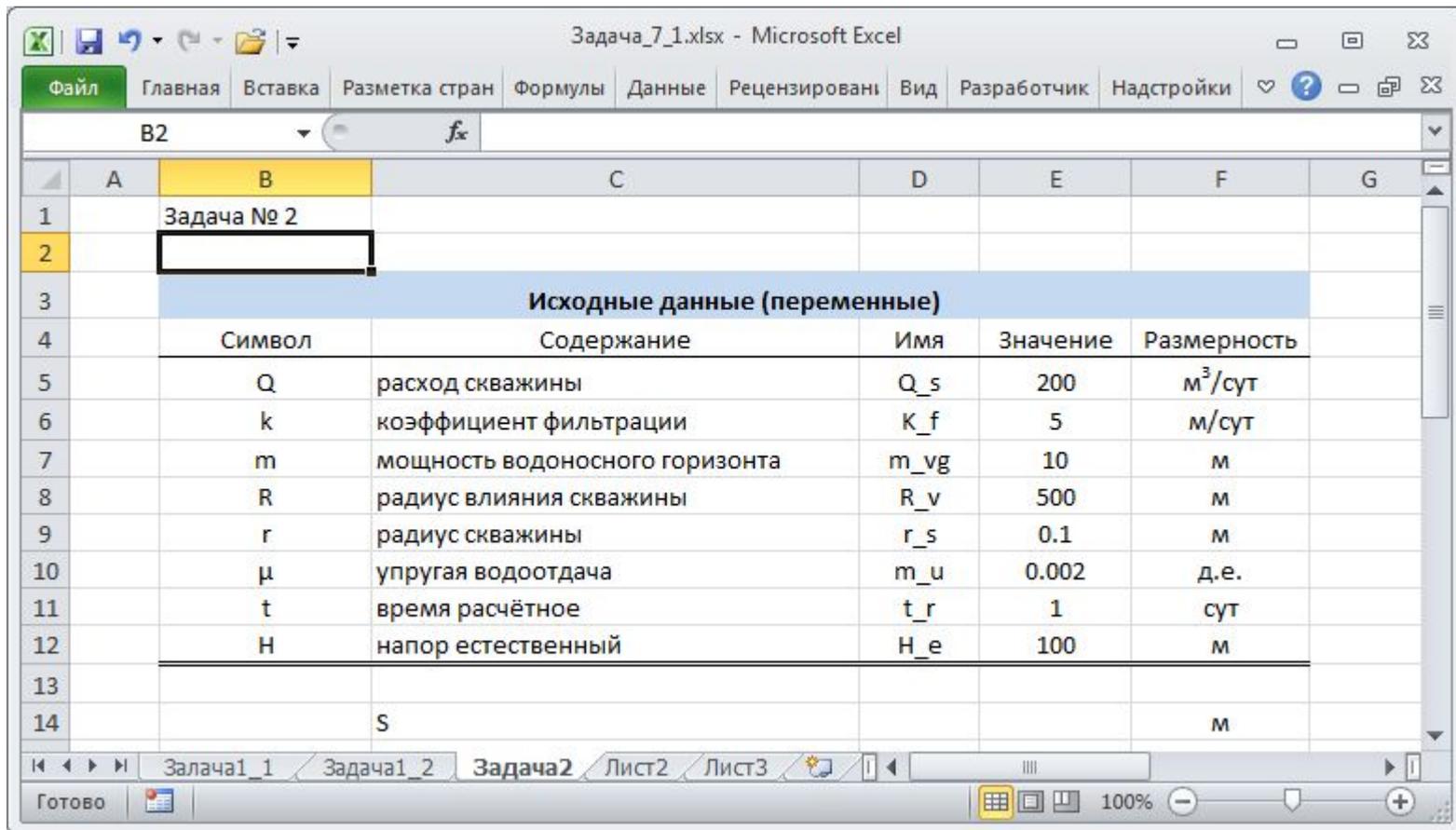
Решение традиционное:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \ln \frac{2,25 \times a \times t}{r^2} = \frac{200}{4 \times \pi \times 5 \times 10} \ln \frac{2,25 \times \frac{5 \times 10}{0,002} \times 1}{0,1^2} = 5,42 \text{ м};$$

# Одиночный водозабор в условиях квазиустановившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 2 в среде электронных таблиц.

Зонирование поля таблицы для ввода переменных, участвующих в расчёте, их имен, значений и размерности.



Исходные данные (переменные)					
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут	
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут	
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м	
R	радиус влияния скважины	R_v	500	м	
r	радиус скважины	r_s	0.1	м	
μ	упругая водоотдача	m_u	0.002	д.е.	
t	время расчётное	t_r	1	сут	
H	напор естественный	H_e	100	м	
	S			м	

# Одиночный водозабор в условиях квазиустановившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 2 в среде электронных таблиц.

Выбор команды присвоения имени переменной из соседней ячейки.

Создать из выделенного (Ctrl+Shift+F3)

Автоматическое создание имен для выделенных ячеек.

Большинство пользователей предпочитает использовать текст в верхней строке крайнего левого столбца выделения.

Символ	Содержание
Q	расход скважины
k	коэффициент фильтрации
m	мощность водоносного горизонта
R	радиус влияния скважины
r	радиус скважины
$\mu$	упругая водоотдача

R_v	500	м
r_s	0.1	м
m_u	0.002	д.е.
t_r	1	сут
H_e	100	м

Создание имен из выделенного диапазона

Создать имена из значений:

- в строке выше
- в столбце слева
- в строке ниже
- в столбце справа

OK Отмена

# Одиночный водозабор в условиях квази установившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 2 в среде электронных таблиц.

Расчётная формула понижения в скважине по уравнению Тейса\_Джейкоба.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled "Задача\_7\_1.xlsx". The spreadsheet contains a table of initial data (parameters) and a formula for calculating drawdown in a well. The formula is displayed in the formula bar and in cell E13.

Исходные данные (переменные)					
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут	
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут	
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м	
r	радиус скважины	r_s	0.1	м	
μ	упругая водоотдача	m_u	0.002	д.е.	
t	время расчётное	t_r	1	сут	
H	напор естественный	H_e	100	м	

The formula in the formula bar and cell E13 is:

$$S = \frac{Q_s}{4 \cdot \pi \cdot k \cdot m_{vg}} \cdot \ln\left(\frac{2.25 \cdot (k \cdot m_{vg} / m_u) \cdot t_r}{r_s^2}\right)$$

Уравнение показано в строке формул и в расчётной ячейке при редактировании её содержимого (**F2**)

# Одиночный водозабор в условиях квазиустановившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 2 в среде электронных таблиц.

Расчёт понижения в скважине с расходом  $200 \text{ м}^3/\text{сут}$  через сутки после начала откачки.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled "Задача\_7\_1.xlsx". The active cell is D40. The spreadsheet contains the following data:

Исходные данные (переменные)					
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность	
Q	расход скважины	Q_s	200	$\text{м}^3/\text{сут}$	
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	$\text{м}/\text{сут}$	
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м	
r	радиус скважины	r_s	0.1	м	
$\mu$	упругая водоотдача	m_u	0.002	д.е.	
t	время расчётное	t_r	1	сут	
H	напор естественный	H_e	100	м	
	S		4.95	м	

# Одиночный водозабор в условиях квазиустановившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 2 в среде электронных таблиц.

Численно-аналитическая модель одиночной откачки в условиях квазиустановившегося водопритока.

Исходные данные (переменные)				
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность
Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м
r	радиус скважины	r_s	0.1	м
μ	упругая водоотдача	m_u	0.002	д.е.
t	время расчётное	t_r	1	сут
H	напор естественный	H_e	100	м
	S		4.95	м

№	Радиус-вектор	Понижение
	r, м	S, м
1	0.1	4.95
2	1	3.48
3	5	2.46
4	10	2.02
5	20	1.57
6	50	0.99
7	100	0.55
8	150	0.29
9	200	0.11
10	250	-0.03
11	300	-0.15
12	350	-0.25
13	400	-0.33
14	500	-0.47

Область отрицательных значений находится за пределами радиуса влияния скважины.

При автоматизации вычислений требуется подавить появление физически неправдоподобных величин.

## Одиночный водозабор в условиях квазиустановившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 2 в среде электронных таблиц.

Численно-аналитическая модель одиночной откачки в условиях квазиустановившегося водопритока.

Formula bar content:

$$=ЕСЛИ\left(\left(\frac{Q_s}{4 \cdot \pi \cdot K_f \cdot m_{vg}}\right) \cdot \ln\left(\frac{2.25 \cdot \left(\frac{K_f \cdot m_{vg}}{m_u}\right) \cdot t_r}{M39^2}\right) < 0; 0; \left(\frac{Q_s}{4 \cdot \pi \cdot K_f \cdot m_{vg}}\right) \cdot \ln\left(\frac{2.25 \cdot \left(\frac{K_f \cdot m_{vg}}{m_u}\right) \cdot t_r}{M39^2}\right)\right)$$

№	Радиус-вектор г, м	Понижение S, м
1	0.1	=ЕСЛИ((Q_s/(4*ПИ()*K_f*m_vg))*LN((2.25*((K_f*m_vg)/m_u)*t_r)/M39^2)<0; 0;(Q_s/(4*ПИ()*K_f*m_vg))*LN((2.25*((K_f*m_vg)/m_u)*t_r)/M39^2))
2	1	
3	5	2.46
4	10	2.02
5	20	1.57
6	50	0.99
7	100	0.55
8	150	0.29
9	200	0.11
10	250	0.00
11	300	0.00
12	350	0.00
13	400	0.00
14	500	0.00

Вывод физически неправдоподобных величин в результатах расчётов подавлен с использованием функции «ЕСЛИ».

## Синтаксис

ЕСЛИ(лог\_выражение, [значение\_если\_истина], [значение\_если\_ложь])

**Лог\_выражение** — обязательный аргумент.

Любое значение или выражение, дающее в результате значение ИСТИНА или ЛОЖЬ. Например, A10=100 — логическое выражение; если значение в ячейке A10 равно 100, это выражение принимает значение ИСТИНА, в противном случае — значение ЛОЖЬ.

**Значение\_если\_истина** — необязательный аргумент.

Значение, которое возвращается, если аргумент *лог\_выражение* соответствует значению ИСТИНА.

**Значение\_если\_ложь** — необязательный аргумент.

Значение, которое возвращается, если аргумент *лог\_выражение* соответствует значению ЛОЖЬ.

# Одиночный водозабор в условиях квазиустановившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 2 в среде электронных таблиц.

Численно-аналитическая модель одиночной откачки в условиях квазиустановившегося водопритока.

Исходные данные (переменные)				
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность
Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м
r	радиус скважины	r_s	0.1	м
$\mu$	упругая водоотдача	m_u	0.002	д.е.
t	время расчётное	t_r	1	сут
H	напор естественный	H_e	100	м
	S		4.95	м

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a table of data. The table has columns for '№' (Number), 'Радиус-вектор' (Radius vector) in meters (r, м), and 'Понижение' (Drawdown) in meters (S, м). The data is as follows:

№	Радиус-вектор r, м	Понижение S, м
1	0.1	4.95
2	1	3.48
3	5	2.46
4	10	2.02
5	20	1.57
6	50	0.99
7	100	0.55
8	150	0.29
9	200	0.11
10	250	0.00
11	300	0.00
12	350	0.00
13	400	0.00
14	500	0.00

# Одиночный водозабор в условиях квазиустановившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 2 в среде электронных таблиц.

Численно-аналитическая модель одиночной откачки в условиях квазиустановившегося водопритока.

Исходные данные (переменные)				
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность
Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м
r	радиус скважины	r_s	0.1	м
$\mu$	упругая водоотдача	m_u	0.002	д.е.
t	время расчётное	t_r	1	сут
H	напор естественный	H_e	100	м
S			4.95	м

№	Радиус-вектор г, м	Понижение S, м
1	0.1	4.95
2	1	3.48
3	5	2.46
4	10	2.02
5	20	1.57
6	50	0.99
7	100	0.55
8	150	0.29
9	200	0.11
10	250	0.00
11	300	0.00
12	350	0.00
13	400	0.00
14	500	0.00

# Одиночный водозабор в условиях квазиустановившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 2 в среде электронных таблиц.

Численно-аналитическая модель одиночной откачки в условиях квазиустановившегося водопритока.

Исходные данные (переменные)				
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность
Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м
r	радиус скважины	r_s	0.1	м
μ	упругая водоотдача	m_u	0.002	д.е.
t	время расчётное	t_r	1	сут
H	напор естественный	H_e	100	м
	S		4.95	м

№	Радиус-вектор r, м	Время, сут				
		1	10	100	1000	10000
		Понижение, м				
1	0.1	4.95	5.68	6.41	7.15	7.88
2	1	3.48	4.21	4.95	5.68	6.41
3	5	2.46	3.19	3.92	4.66	5.39
4	10	2.02	2.75	3.48	4.21	4.95
5	20	1.57	2.31	3.04	3.77	4.51
6	50	0.99	1.72	2.46	3.19	3.92
7	100	0.55	1.28	2.02	2.75	3.48
8	150	0.29	1.02	1.76	2.49	3.22
9	200	0.11	0.84	1.57	2.31	3.04
10	250	0.00	0.70	1.43	2.17	2.90
11	300	0.00	0.58	1.32	2.05	2.78
12	350	0.00	0.49	1.22	1.95	2.68
13	400	0.00	0.40	1.13	1.87	2.60
14	500	0.00	0.26	0.99	1.72	2.46

# Одиночный водозабор в условиях квазиустановившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 2 в среде электронных таблиц.

Численно-аналитическая модель одиночной откачки в условиях квазиустановившегося водопритока.

Исходные данные (переменные)				
Символ	Содержание	Имя	Значение	Размерность
Q	расход скважины	Q_s	200	м <sup>3</sup> /сут
k	коэффициент фильтрации	K_f	5	м/сут
m	мощность водоносного горизонта	m_vg	10	м
r	радиус скважины	r_s	0.1	м
μ	упругая водоотдача	m_u	0.002	д.е.
t	время расчётное	t_r	1	сут
H	напор естественный	H_e	100	м
			4.95	м

Задача\_7\_1.xlsx - Microsoft Excel

СУММ  $=\text{ЕСЛИ}((Q_s/(4*\text{ПИ}()*K_f*m_{vg}))*\text{LN}((2.25*((K_f*m_{vg})/m_u)*R\$37)/\$M52^2)<0;0;(Q_s/(4*\text{ПИ}()*K_f*m_{vg}))*\text{LN}((2.25*((K_f*m_{vg})/m_u)*R\$37)/\$M52^2))$

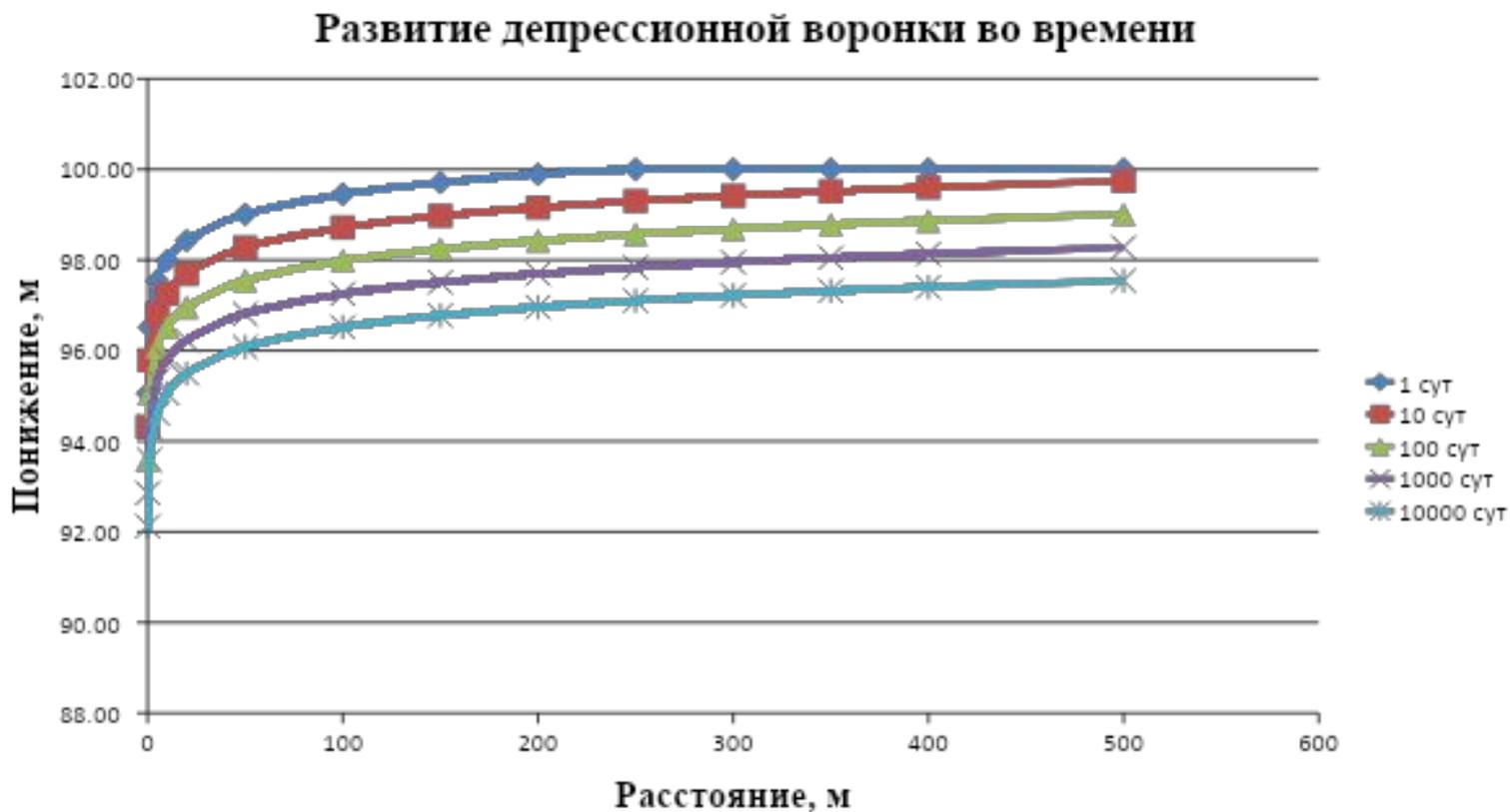
№	Радиус-вектор г, м	Время, сут				
		1	10	100	1000	10000
		Понижение, м				
1	0.1	4.95	5.68	6.41	7.15	7.88
2	1	3.48	4.21	4.95	5.68	6.41
3	5	2.46	3.19	3.92	4.66	5.39
4	10	2.02	2.75	3.48	4.21	4.95
5	20	1.57	2.31	3.04	3.77	4.51
6	50	0.99	1.72	2.46	3.19	3.92
7	100	0.55	1.28	2.02	2.75	3.48
8	150	0.29	1.02	1.76	2.49	3.22
9	200	0.11	0.84	1.57	2.31	3.04
10	250	0.00	0.70	1.43	2.17	2.90
11	300	0.00	0.58	1.32	2.05	2.78
12	350	0.00	0.49	1.22	1.95	2.68
13	400	0.00	0.40	1.13	1.87	2.60
14	500	$=\text{ЕСЛИ}((Q_s/(4*\text{ПИ}()*K_f*m_{vg}))*\text{LN}((2.25*((K_f*m_{vg})/m_u)*R\$37)/\$M52^2)<0;0;(Q_s/(4*\text{ПИ}()*K_f*m_{vg}))*\text{LN}((2.25*((K_f*m_{vg})/m_u)*R\$37)/\$M52^2))$				

Лист2

## Одиночный водозабор в условиях квазиустановившегося водопритока

Автоматизация решения задачи № 2 в среде электронных таблиц.

Численно-аналитическая модель одиночной откачки в условиях квазиустановившегося водопритока.



Расчёт систем взаимодействующих скважин  
выполняется с использованием принципа  
суперпозиции

(принципа сложения течений)

# Основные дифференциальные уравнения фильтрации

Уравнение Лапласа стационарной  
фильтрации

$$T_x \frac{d^2 H_x}{dx^2} + T_y \frac{d^2 H_y}{dy^2} + T_z \frac{d^2 H_z}{dz^2} = 0;$$

Уравнение Фурье нестационарной

фильтрации

$$T_x \frac{d^2 H_x}{dx^2} + T_y \frac{d^2 H_y}{dy^2} + T_z \frac{d^2 H_z}{dz^2} + W = \eta^* \frac{dH}{dt}$$

$$T_x \frac{d^2 H_x}{dx^2} + T_y \frac{d^2 H_y}{dy^2} + T_z \frac{d^2 H_z}{dz^2} + W = \frac{1}{a} \frac{dH}{dt}$$

где  $\eta^* = \frac{\gamma}{1+\varepsilon}$  коэффициент упругоёмкости породы

$\eta^*$  коэффициент упругоёмкости

$\gamma$  порода  
объемный вес

$\varepsilon$  воды  
коэффициент пористости горной

$\beta$  порода  
коэффициент сжимаемости

$\alpha_v$  воды  
коэффициент сжимаемости горной

$\alpha$  порода  
коэффициент  
пьезопроводности

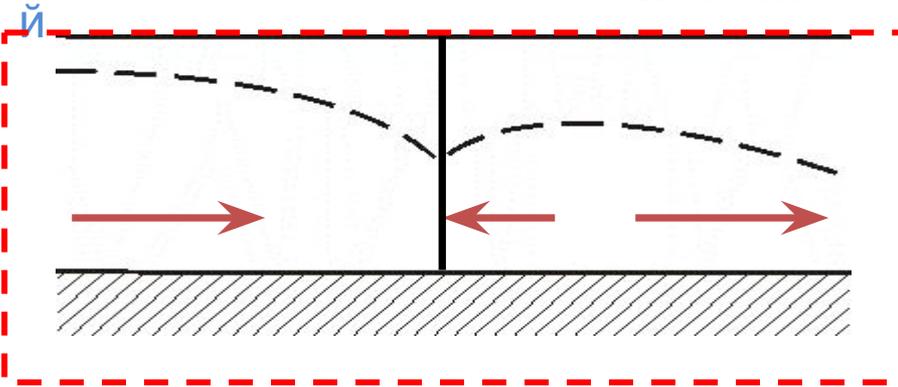
## Принцип суперпозиции:

*Любая комбинация частных решений  
уравнения Лапласа  
является одновременно и его решением*

# Принцип суперпозиции

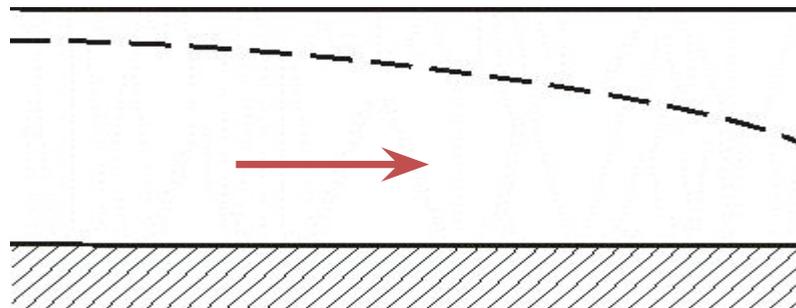
нарушенны

Фильтрационные  
потоки



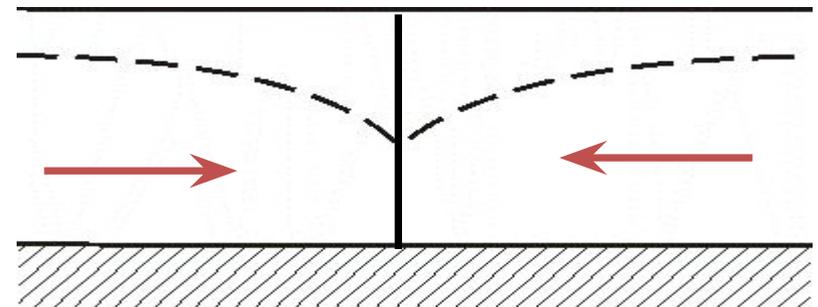
=

естественны  
й



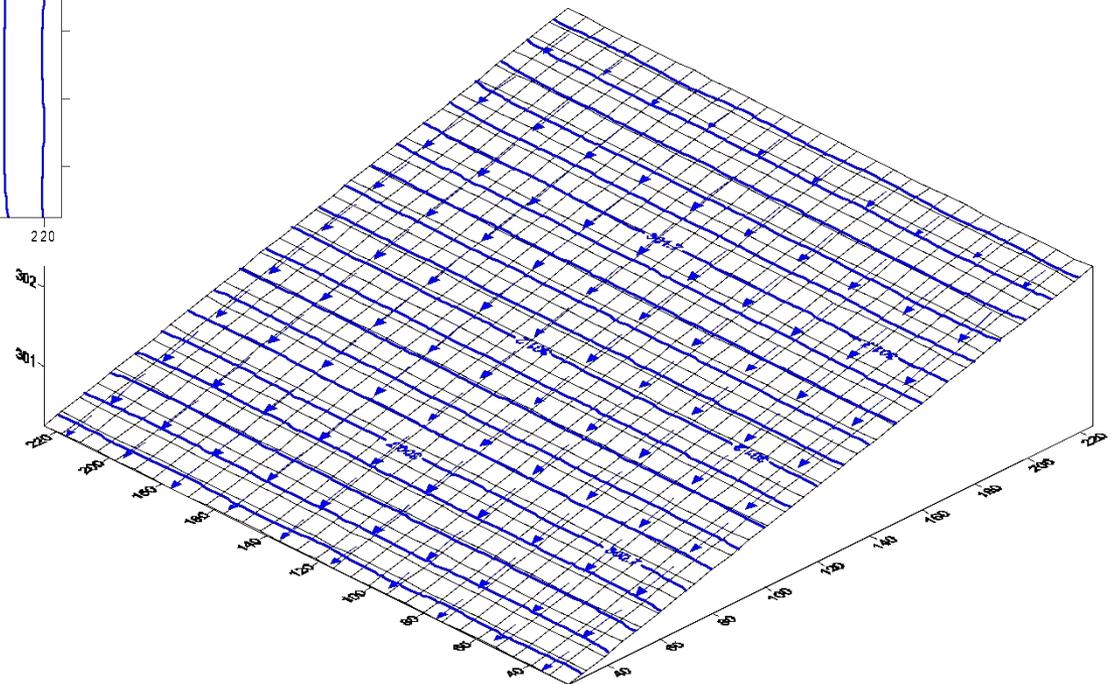
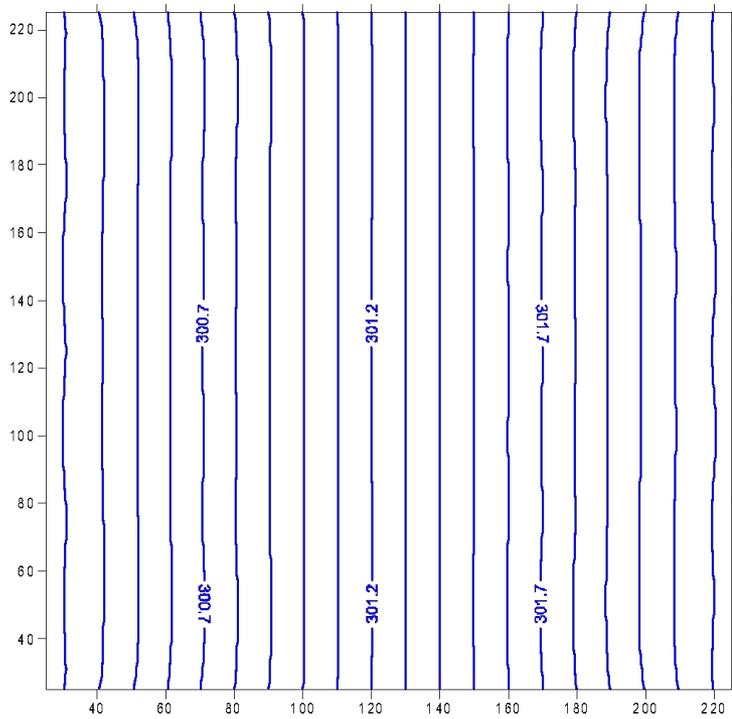
+

искусственны  
й

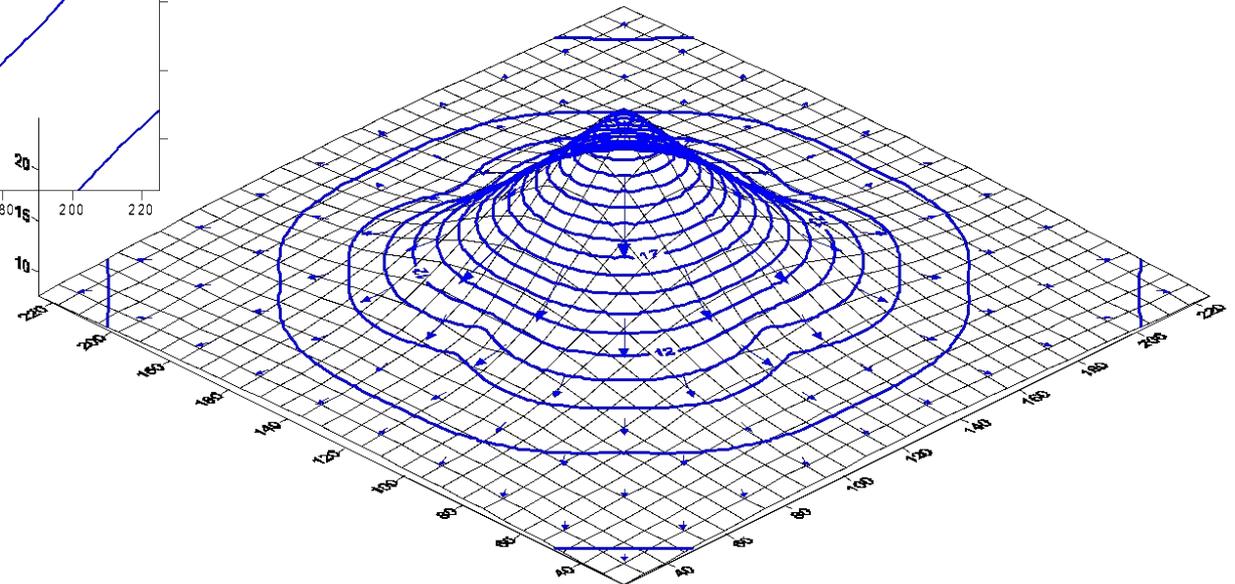
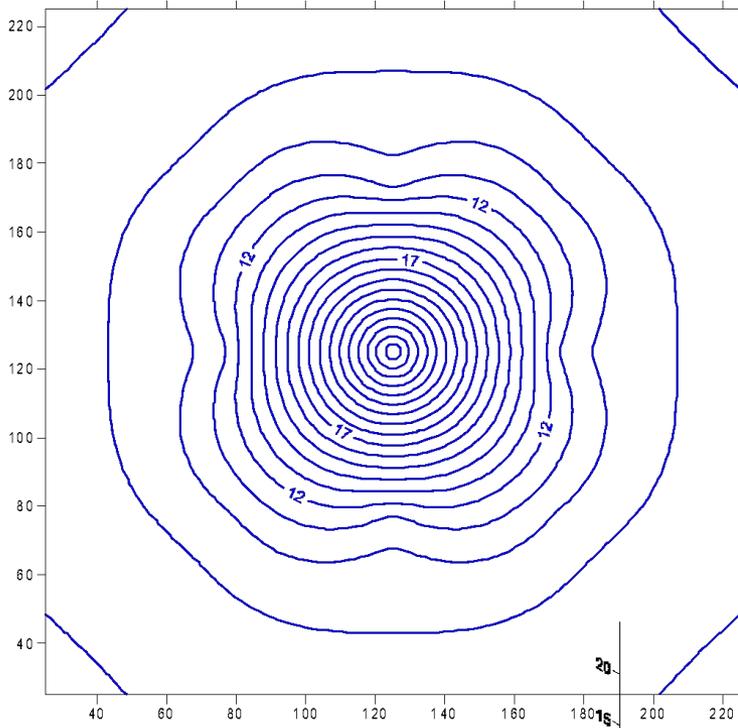


# Принцип суперпозиции

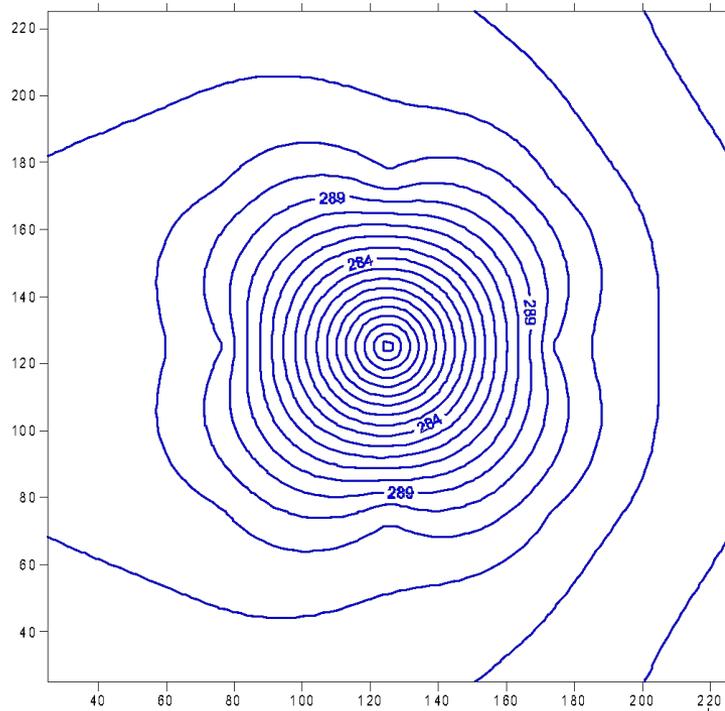
Карта гидроизогипс и объемная диаграмма  
естественного потока



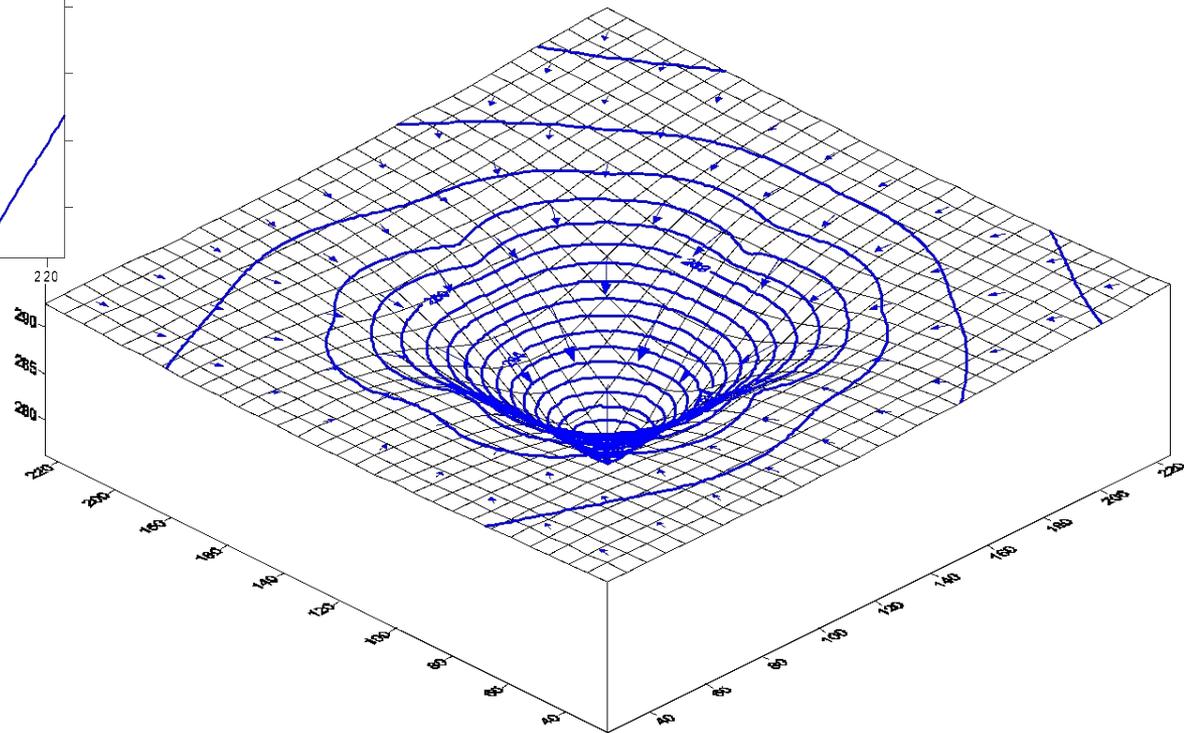
## Карта и объемная диаграмма поверхности искусственного потока (депресссионной воронки)



# Принцип суперпозиции

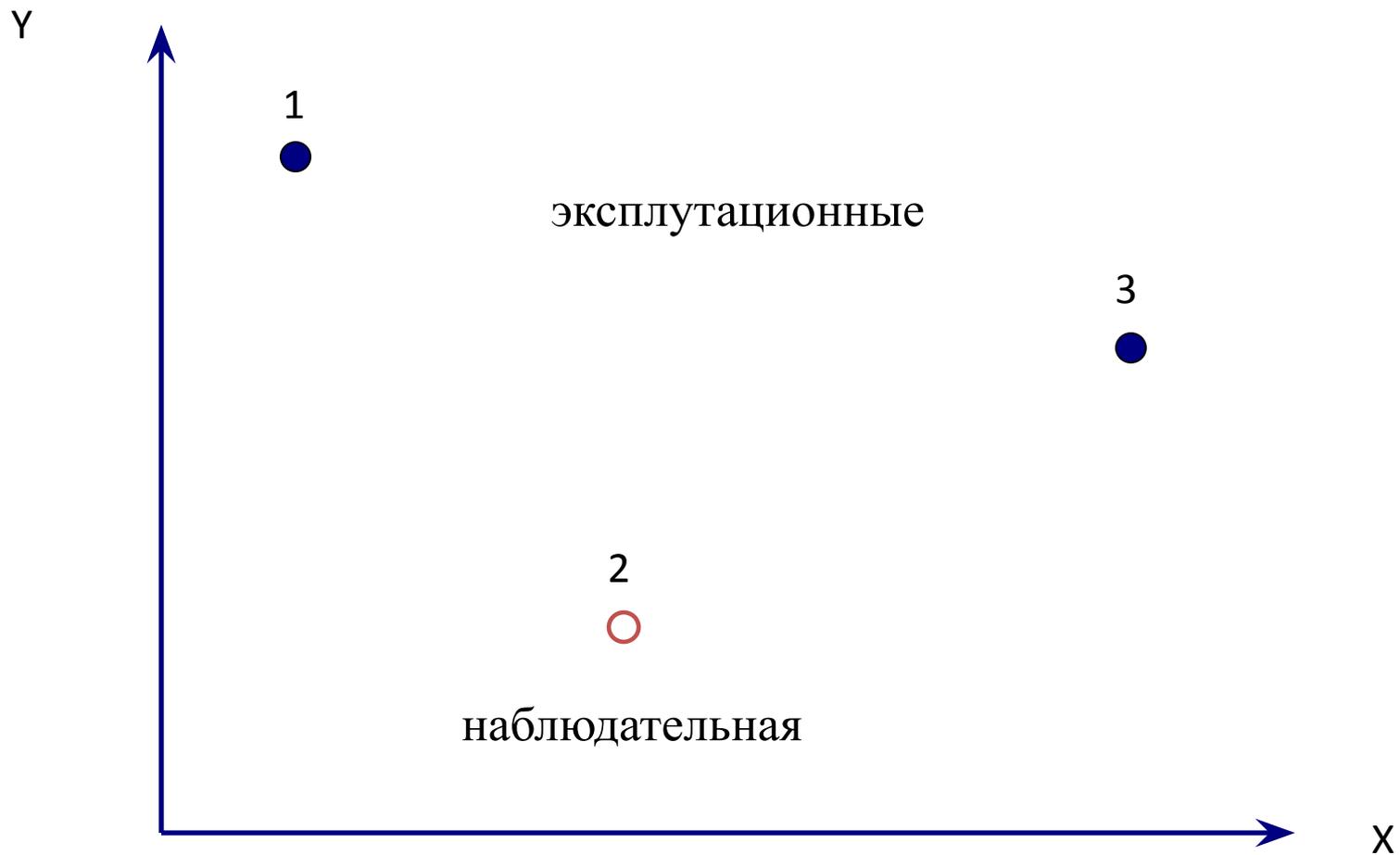


Карта и объемная диаграмма поверхности  
нарушенного потока



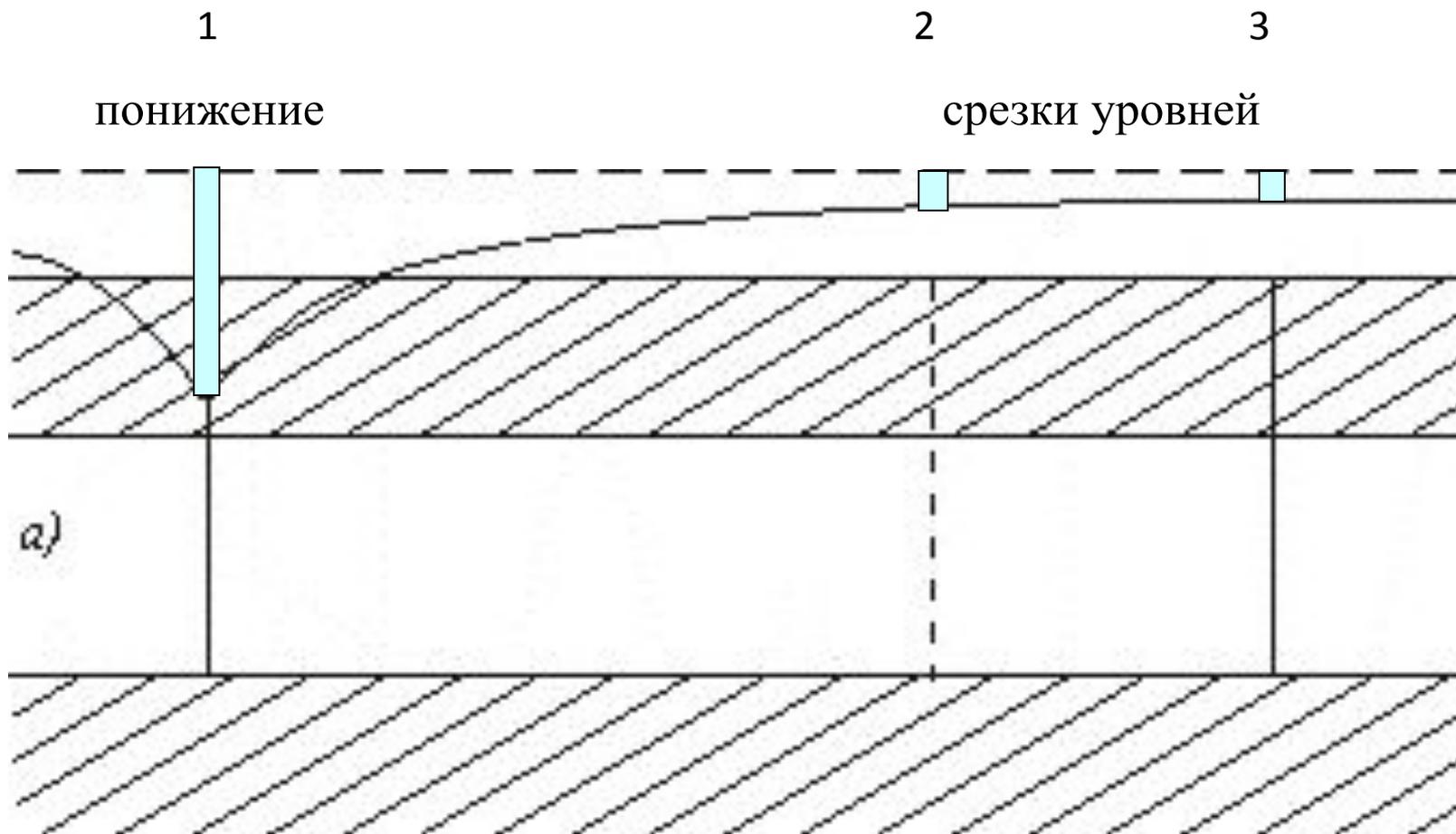
# Расчёт систем взаимодействующих скважин

Схема размещения взаимодействующих скважин

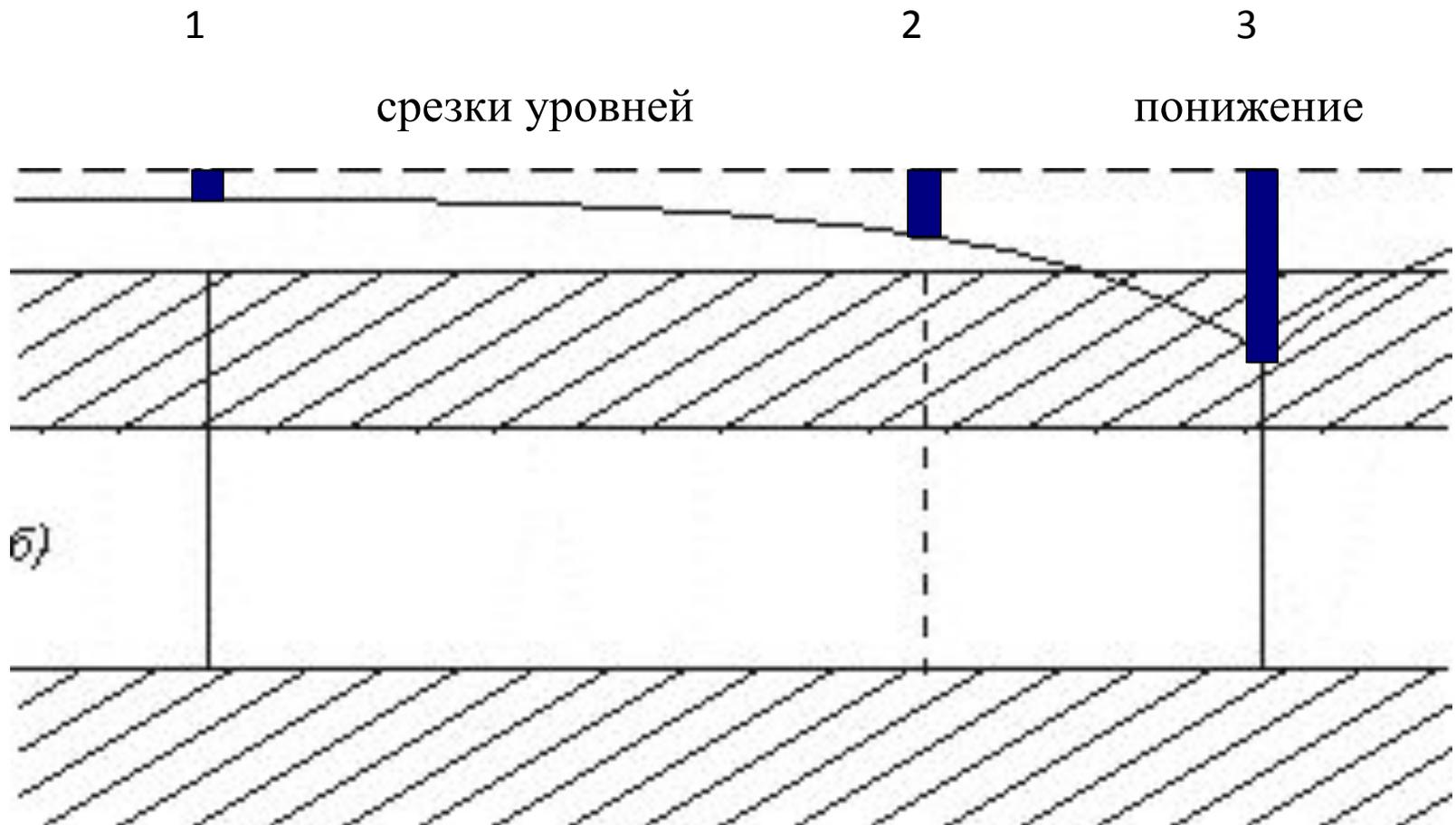


# Расчёт систем взаимодействующих скважин

Развитие депрессионной воронки скважины №1

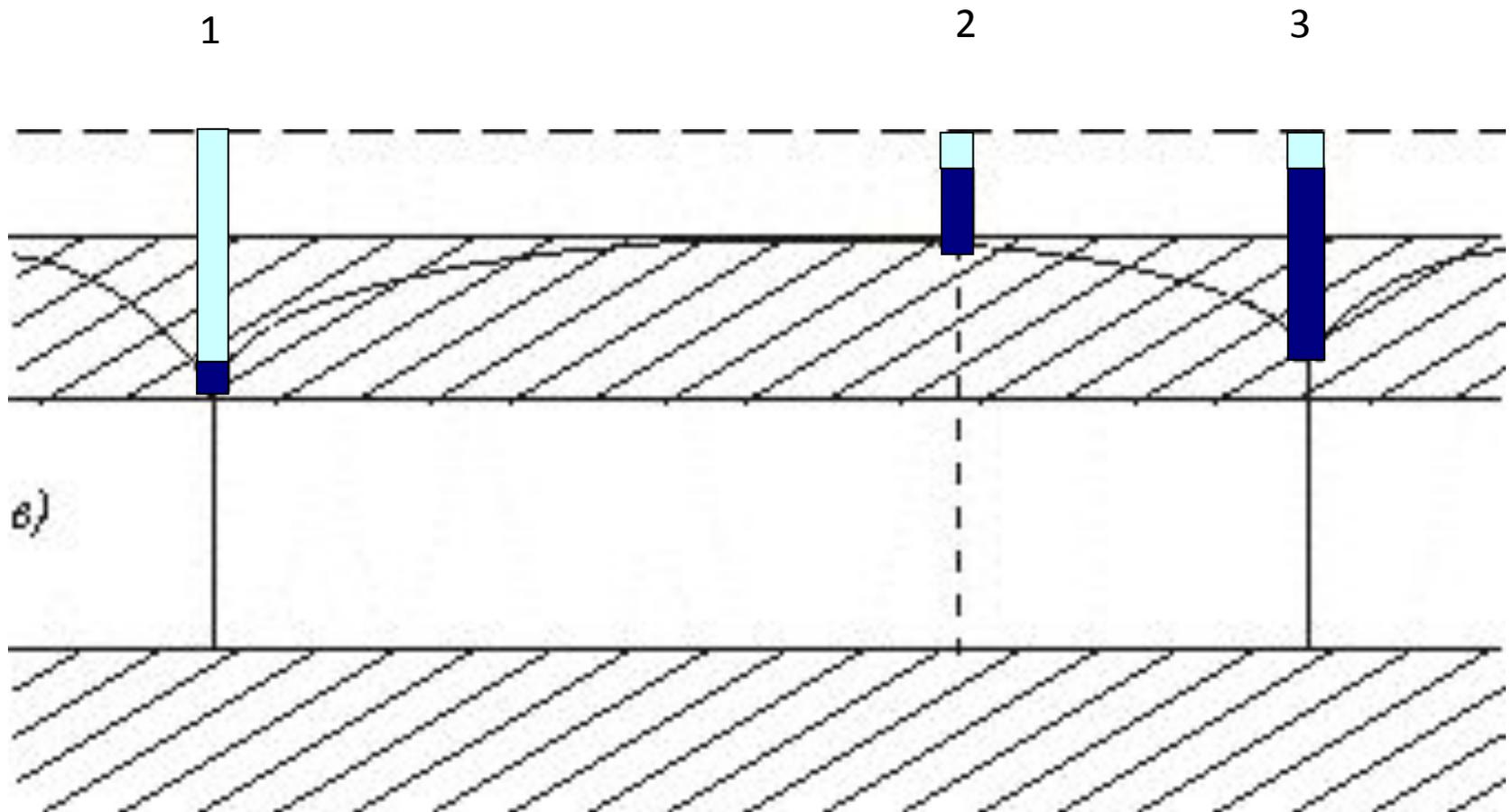


Развитие депрессионной воронки скважины №3



# Расчёт систем взаимодействующих скважин

Результат взаимодействия скважин



Расчет собственного понижения скважины №1

$$S_1^0 = \frac{Q_1}{4\pi km} \ln \frac{2.25a t_1}{r_{скв1}^2}$$

Радиус-вектор равен расстоянию  
от оси скважины №1 до стенки ее фильтра

## Система обозначения переменных, принятая при расчётах взаимодействующих скважин

$S$  – понижение уровня

$\Delta S$  – дополнительное понижение уровня, срезка уровня

$S^0$  – собственное понижение уровня в центральной скважине, т.е. на нулевом расстоянии от скважины, равном радиусу фильтра скважины

Нижний индекс – показывает номер скважины к которой относится переменная

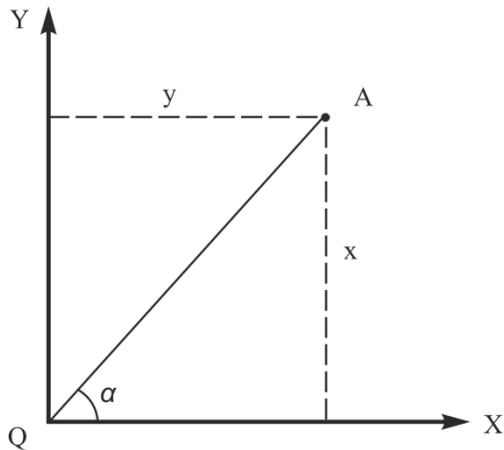
Двойной нижний индекс – первый показывает номер скважины в которой определяется срезка уровня, индекс указывает номер влияющей скважины

Расчет срезки уровня в скважине №1  
от работы соседней эксплуатационной скважины №3

$$\Delta S_{1-3} = \frac{Q_3}{4\pi km} \ln \frac{2.25 a t_3}{r_{скв1-3}^2}$$

Радиус-вектор равен расстоянию  
от оси скважины №1 до оси соседней  
эксплуатационной скважины №3

Расчет расстояний между скважинами в системе Декартовых координат.



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

$$r = \sqrt{x^2 + y^2};$$

Расстояние между точками  $O$ - $A$  рассчитывается с использованием их координат  $Ox$ ,  $Ax$  и  $Oy$  и  $Ay$   
 $x = Ax - Ox$  и  $y = Ay - Oy$ .

Общее решение для оценки взаимодействия двух эксплуатационных скважин

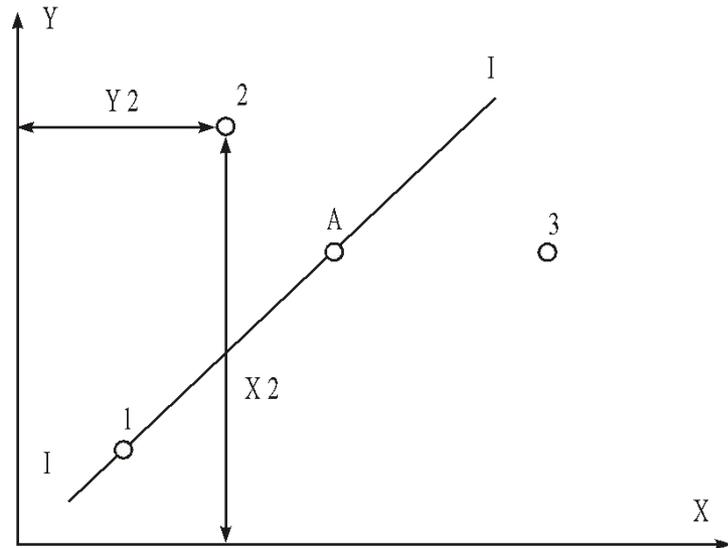
$$S_1 = S_1^0 + \Delta S_{1-3}$$

$$S_2 = \Delta S_{2-1} + \Delta S_{2-3}$$

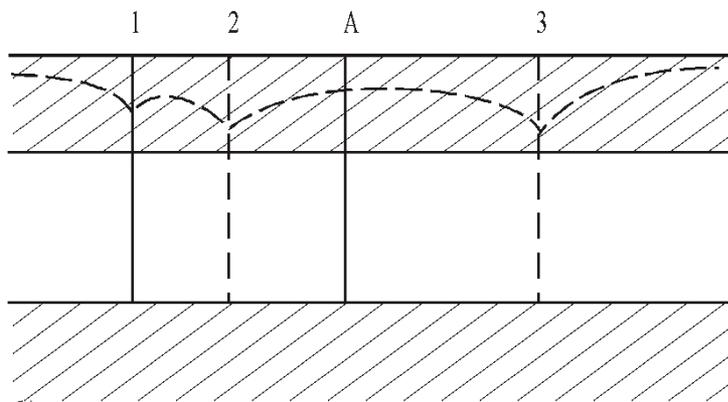
$$S_3 = S_3^0 + \Delta S_{3-1}$$

Решение можно найти для каждой эксплуатационной скважины и произвольной точки (наблюдательной скважины)

# Расчёт систем взаимодействующих скважин



а)



б)

Схема взаимодействующих скважин

$$S_1 = S_1^0 + \Delta S_{1-2} + \Delta S_{1-3};$$

$$S_2 = S_2^0 + \Delta S_{2-1} + \Delta S_{2-3};$$

$$S_3 = S_3^0 + \Delta S_{3-1} + \Delta S_{3-2};$$

$$S_A = \Delta S_{A-1} + \Delta S_{A-2} + \Delta S_{A-3};$$

а - план расположения взаимодействующих скважин;

б - гидрогеологический разрез

Расчеты одиночных и групповых водозаборов могут использоваться для подсчёта эксплуатационных запасов подземных вод и обоснования вертикального дренажа в условиях неограниченных водоносных горизонтов.

Расчёт систем взаимодействующих скважин в режиме численно-аналитических моделей позволяет решать задачи оптимизации схем и режимов эксплуатации водозаборов с использованием компьютера.

Результаты прогнозных расчётов доступны для визуализации сторонними программными средствами.

Использование автоматизации расчётов позволяет решать задачи осушения без изменения исходных уравнений для прогноза понижения методом подбора.