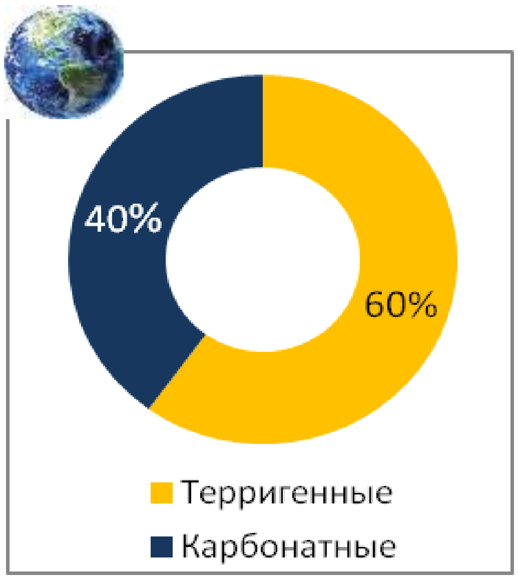
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ФЛЮИДА В КОЛЛЕКТОРАХ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРОВОГО ТИПА

Докладчик: **Бобренёва Ю.О.**

Научный руководитель: д.ф.-м.н., доцент, с.н.с. лаборатории математической химии, ИНК РАН Губайдуллин И.М.

Актуальность

Статистика основных типов коллекторов



Горные породы

Керн

Трещинный коллектор представляет собой коллектор, в котором трещиноватость способствует увеличению коэффициента проницаемости, что значительно сказывается на производительности скважины и эффективности извлечения нефти.

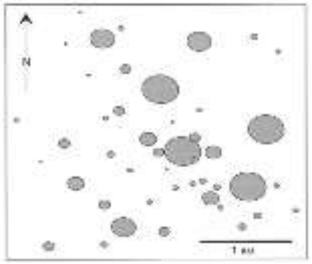
W. Narr
Naturally Fractured Reservoirs

Основные этапы анализа и моделирования трещиноватых коллекторов

- *Чтобы оценить степень влияния трещиноватости на ФЕС коллектора и построить концептуальную модель месторождения (тип коллектора) необходимо проанализировать исходную информацию о месторождении:*

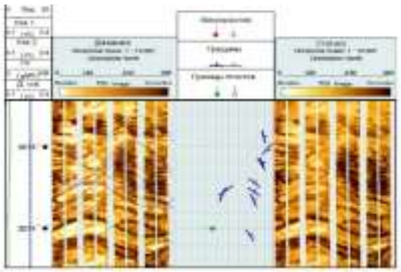
Бурение

Работа скважин

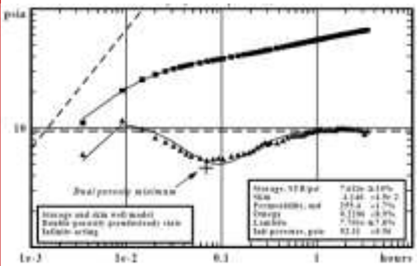


Геология

ГИС



ГДИС



Проницаемость
Пластовое давление
Гидропроводность
Подвижность
Пьезопроводность
Скин-фактор
Длина трещины ГРП

Цели и задачи

Цель:

Математическое моделирование процесса массопереноса в коллекторе трещиновато-порового типа в добывающих скважинах.

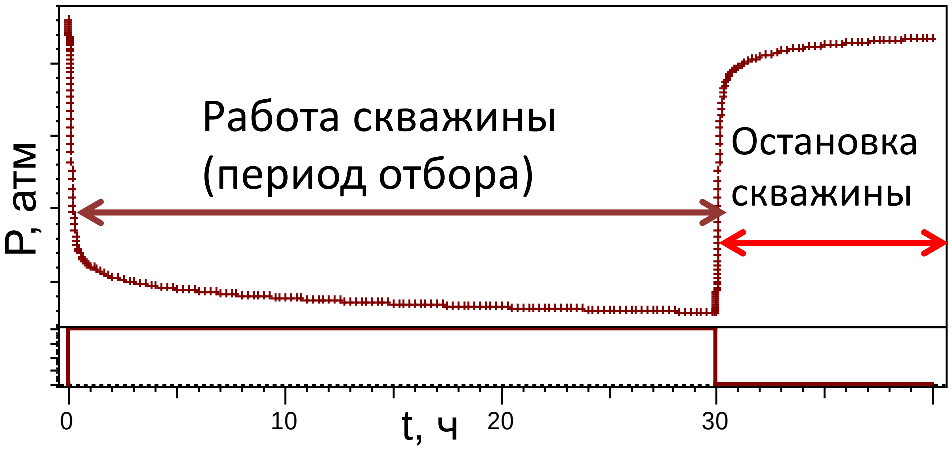
Задачи:

1. Разработка математического описания течения флюида в коллекторе в системе «сеть трещин - матрица»;
2. Разработка программного модуля;
3. Проведение анализа чувствительности давления к входным параметрам.

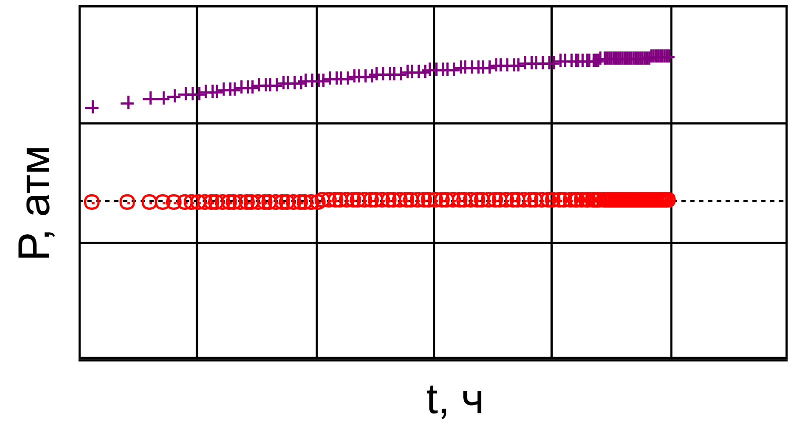
Гидродинамические исследования скважин (ГДИС) методом кривой восстановления давления (КВД)

ГДИС методом КВД

Динамика изменения забойного отделения



Диагностический график производной в билогарифмических координатах



Анализ позволяет определить **пластовое давление** и **параметры пласта** (проницаемость, продуктивность, радиус исследования, гидропроводность, подвижность и т.д.)

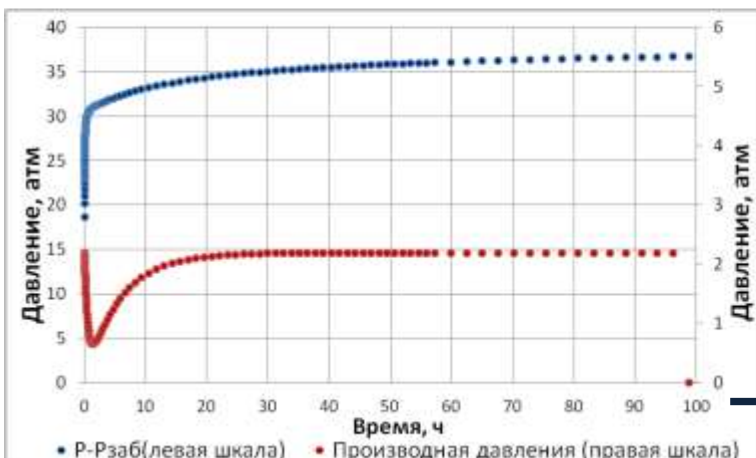


График давления и производной

$$P'(t_i) = \frac{\partial \Delta P}{\partial (\ln t)}(t_i)$$

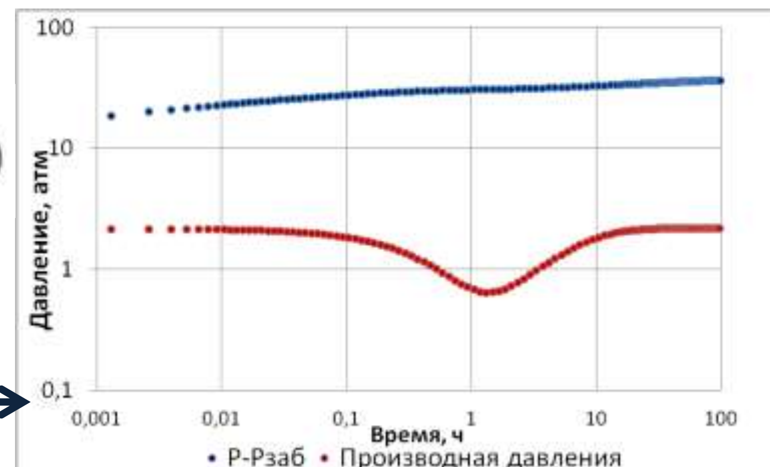
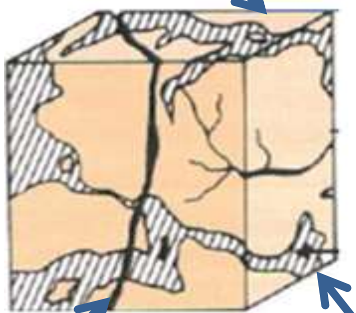


График давления и производной в билогарифмических координатах

Модель двойной пористости

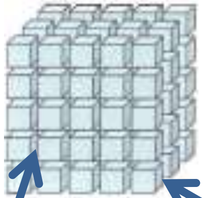


Модели двойной пористости[2,3]:

1. Каземи

2. Де Сваана

3. Уоррена-Рута



Распределение давления в системе «сеть трещин - матрица» :

$$\varphi_f c_{tf} \frac{\partial P_f}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{k_f}{\mu} r \frac{\partial P_f}{\partial r}\right) - S\frac{k_m}{\mu}\left(P_f - P_m\right)$$

$$\varphi_m c_{tm} \frac{\partial P_m}{\partial t} = S\frac{k_m}{\mu}\left(P_f - P_m\right)$$

$$S = \frac{4n(n+2)}{l_m^2} \qquad l_m = \frac{3abc}{(ab+bc+ac)}$$

Начальные и граничные условия:

$$P_f\big|_{t=0} = P_0; \qquad P_f\big|_{r=re} = P_0$$

$$P_m\big|_{t=0} = P_0 \qquad P_f\big|_{r=0} = P_0 - \Delta P$$

$$2\pi h \frac{k_f}{\mu}\left(r\frac{\partial P_f}{\partial r}\right)_{r=r_w} = q(t)$$

n – удельный коэффициент проводимости

S – геометрический коэффициент

l_m – характеристический размер блока

[2]**Голф-Рахт Т.Д.** *Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов.* [ред.] Ковалева А.Г. [перев.] Голованова П.К., Власенова В.В., Покровский В.В. Бардина Н.А. Москва : Недра, 1986. 608 стр.

[3]**Warren J.E., Root P.J.** *The behaviour of naturally fractured reservoirs*. Soc.Petrol.Eng.J., 1963 , p. 245-255.

Численная модель

- Аппроксимация задачи проводилась по неявной схеме:

$$\varphi_m c_{tm}\frac{P_{mi}^{j+1}-P_{mi}^{j}}{\tau}=S\frac{k_m}{\mu}\left(P_{mi}^{j+1}-P_{fi}^{j+1}\right)$$

$$\varphi_f c_{tf}\frac{P_{fi}^{j+1}-P_{fi}^{j}}{\tau}=\frac{1}{r}\frac{k_f}{\mu}\frac{1}{h^2}\left(r_{i+\frac{1}{2}}P_{fi+1}^{j+1}-\left(r_{i+\frac{1}{2}}-r_{i-\frac{1}{2}}\right)P_{fi}^{j+1}+r_{i-\frac{1}{2}}P_{fi-1}^{j+1}\right)+S\frac{k_m}{\mu}\left(P_{mi}^{j+1}-P_{fi}^{j+1}\right)$$

- Полученная схема сводится к системе:

$$AP_{i-1}-CP_i+BP_{i+1}=-F_i$$

- Для решения СЛАУ использовался метод матричной прогонки[4,5]. Элементами трехдиагональной матрицы являются матрицы вида :

$$A_i=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & \frac{1}{r}\frac{k_f}{\mu\varphi_f c_{tf}}\frac{1}{h^2}r_{i-\frac{1}{2}}\end{bmatrix},\qquad B_i=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & \frac{1}{r}\frac{k_f}{\mu\varphi_f c_{tf}}\frac{1}{h^2}r_{i+\frac{1}{2}}\end{bmatrix},$$

$$C_i=\begin{bmatrix}1+\frac{Sk_m\tau}{\mu\varphi_m c_{tm}} & -\frac{Sk_m\tau}{\mu\varphi_m c_{tm}}\\ -\frac{Sk_m\tau}{\mu\varphi_f c_{tf}} & 1+\frac{1}{r}\frac{k_f}{\mu\varphi_f c_{tf}}\frac{1}{h^2}\left(r_{i+\frac{1}{2}}-r_{i+\frac{1}{2}}\right)+\frac{Sk_m\tau}{\mu\varphi_f c_{tf}}\end{bmatrix},\qquad F_i=\begin{bmatrix}P_m\\ P_f\end{bmatrix}.$$

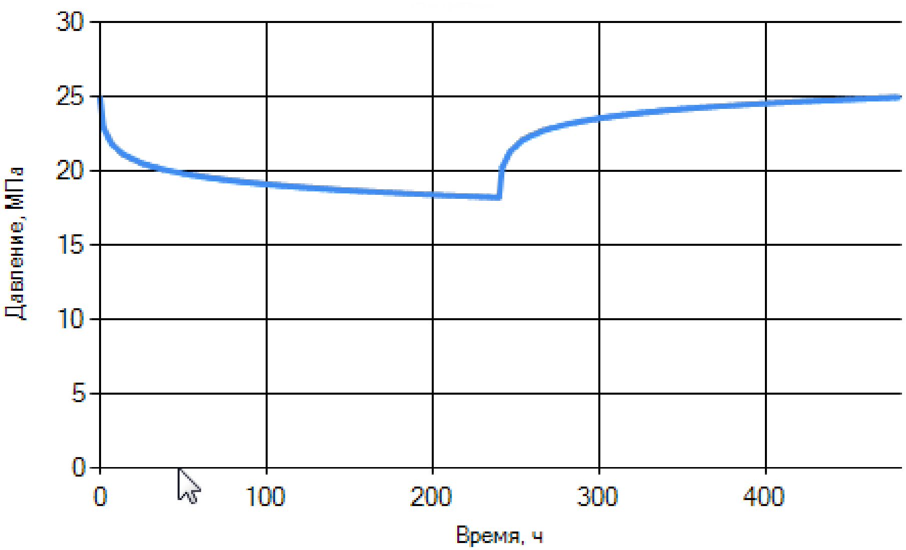
[4]**Самарский А.А., Николаев Е.С.** Методы решения сеточных уравнений. Москва : Наука, 1978 г.
[5]**Бобренёва Ю.О., Мазитов А.А., Губайдуллин И.М.** Математическое моделирование процесса массопереноса в коллекторе трещиновато-порового типа .В сборнике: Информационные технологии и нанотехнологии. Сборник трудов ИТНТ-2018. Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева.2018. С.1775-1780

Данные для расчета

Параметры для задачи

Параметры	Значения	Единицы измерения
Вязкость нефти, μ	2.216E-03	Па·с
Начальное давление в сети трещин, P_f0	250.0E-05	МПа
Начальное давление в матрице, P_m0	250.0E-05	МПа
Проницаемость сети трещин, k_f	1E-14	м^2
Проницаемость матрицы, k_m	1E-16	м^2
Сжимаемость сети трещин, c_{tf}	3.0E-09	1/Па
Сжимаемость матрицы, c_{tm}	3.0E-10	1/Па
Сжимаемость нефти, c_o	3.0E-9	1/Па
Сжимаемость воды, c_w	3.0E-9	1/Па
Пористость сети трещин, φ_f	0.01	
Пористость матрицы, φ_m	0.10	
Количество перпендикулярных групп трещин, *n*	3	
Длина блока, a	100.00	м
Ширина блока, *b*	100.00	м
Высота блока, *c*	0.60	м
Эффективная мощность пласта, h	10.00	м
Радиус скважины, r_w	0.10	м
Радиус исследования, R_e	100.00	м
Дебит жидкости, *Q*	150.00	м3/сут
Время работы/остановки, *t*	10.00	сут

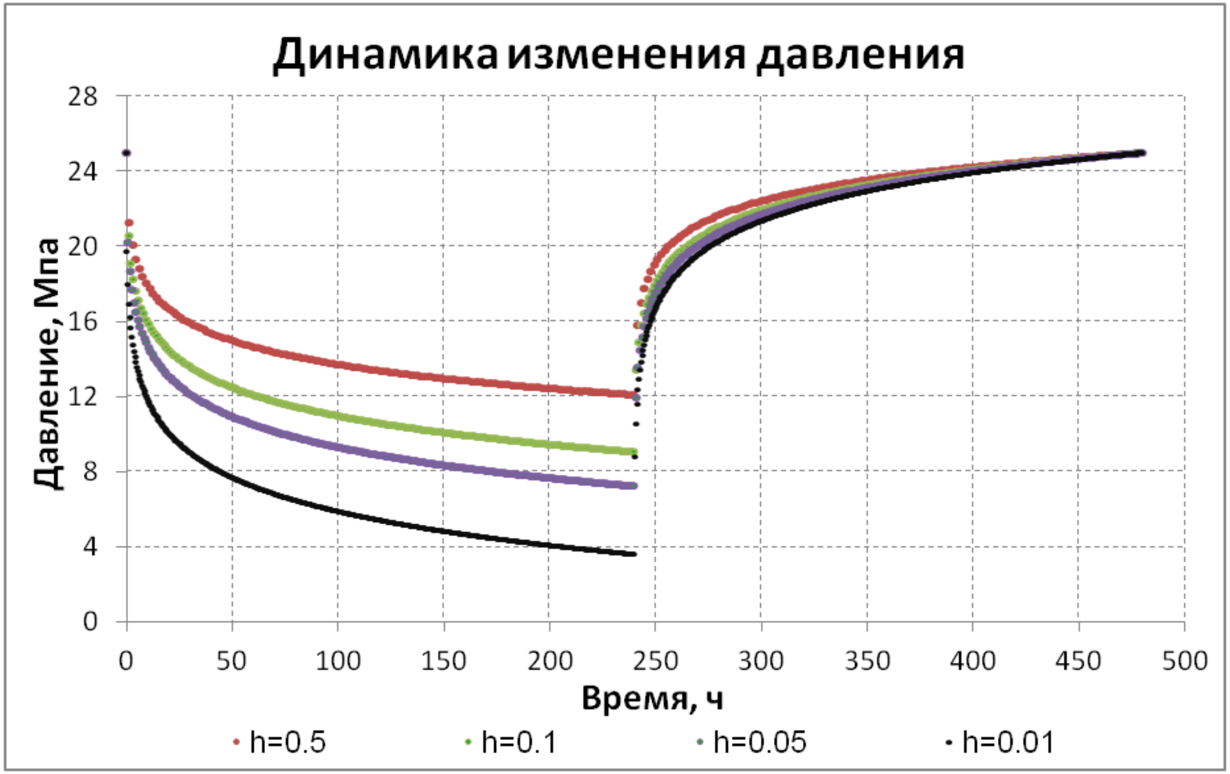
Добывающая вертикальная скважина, эксплуатирующая один пласт, запущена в работу. После отработки 10 сут, скважина закрывается на забое для гидродинамического исследования методом кривой восстановления давления на 10 суток. В момент остановки давление в пласте начинает восстанавливаться.



Шаг сетки – равномерный: $h = \dfrac{Re}{n-1}$

!Внешние факторы (влияние ствола скважины и скин-фактор) не учитывались

Результат расчета



$$h = \frac{Re}{n-1}$$

По кривым падения давления наблюдается расхождение в зависимости от шага (м).

Для дальнейшего анализа был выбран расчет с шагом h =0,05 м

Анализ чувствительности

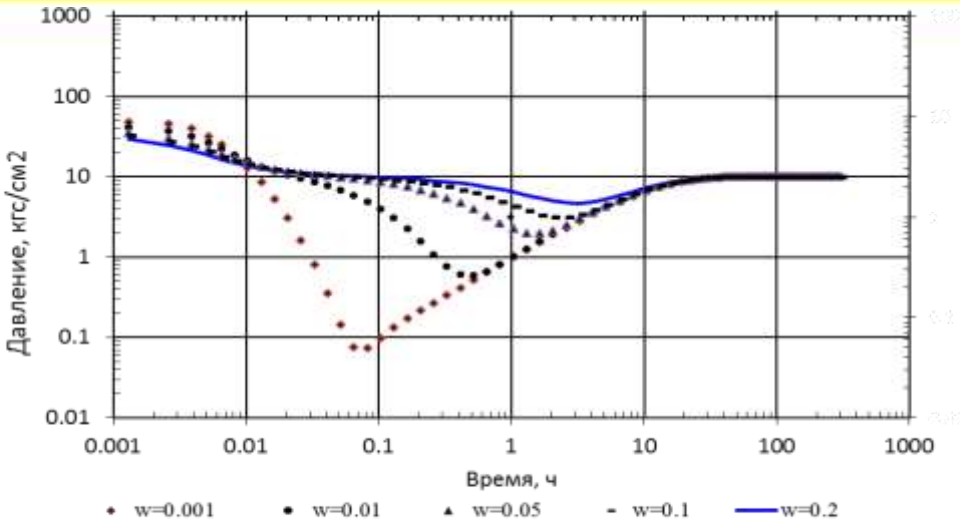


Рис.1 Билогарифмический график КВД при различных значениях параметра коэффициента доли трещинно-кавернозной емкости

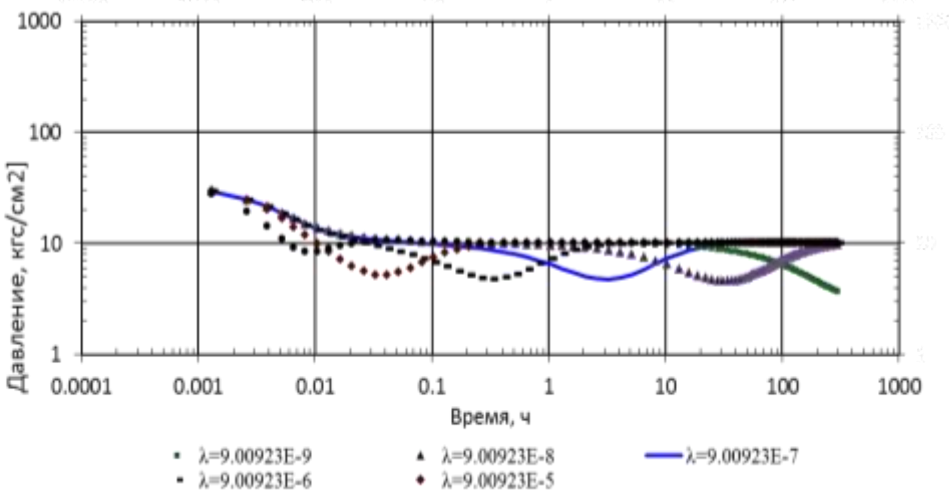


Рис.2 Билогарифмический график КВД при различных значениях параметра коэффициента удельной проводимости

Коэффициент доли трещинно-кавернозной емкости

- При уменьшении ω скачок производной становится глубже и смещается влево.
- При совсем маленьких значениях коэффициента радиальный режим течения в трещинах не виден.

$$\omega = \frac{\varphi_f c_f}{\varphi_f c_f + \varphi_m c_m}$$

Коэффициент удельной проводимости

- При увеличении λ скачок производной не изменяется в размере, но смещается влево.
- При больших значениях коэффициента радиальный режим течения в трещинах не получим, при маленьких значениях первый радиальный режим получим на более поздних временах.

$$\lambda = S\frac{k_m}{k_f}r_w^2$$

$$S = \frac{4n(n+2)}{l_m^2} \qquad l_m = \frac{3abc}{(ab+bc+ac)}$$

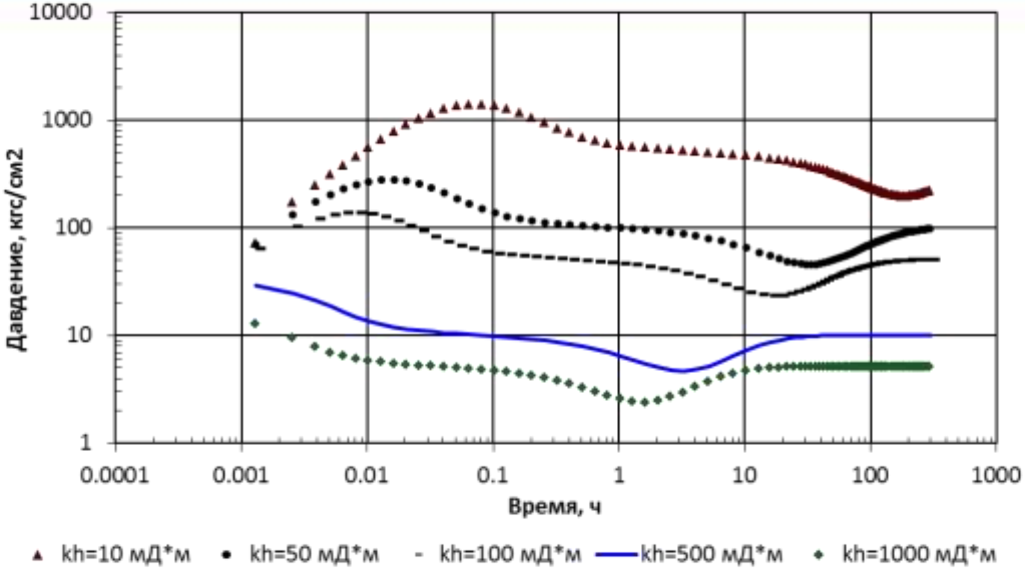


Рис.4 Билогарифмический график КВД при различных значениях проницаемости

Проницаемость

- При увеличении проницаемости скачок на производной сдвигается влево и спускается вниз.
- При низких проницаемостях выход на радиальный режим течения будет наблюдаться на более поздних временах, и разрядка матрицы в пласт будет позже.

Анализ чувствительности показал, что необходимо учитывать не только проницаемость матрицы и трещин, но и геометрию распределения проводящих трещин, а именно высоту предполагаемых блоков.

Неравномерная сетка

- Аппроксимация r может быть:

$$r_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(r_i + r_{i+1})$$ - среднее арифметическое

$$r_{i+\frac{1}{2}} = (r_i \cdot r_{i+1})^{\frac{1}{2}}$$ - среднее геометрическое

$$\boxed{r_{i+\frac{1}{2}} = (r_i \cdot r_{i+1})^{\frac{1}{2}}}$$ - среднее логарифмическое

- Разностная схема на основе неравномерного шага:

$$\varphi_f c_{tf} \frac{P_{fi} - P_{fi}}{\tau} = \frac{1}{r_i}\frac{k_f}{\mu}\frac{1}{\Delta r_i}\left(r_{i+\frac{1}{2}} \frac{(P_{f\,i+1} - P_{fi})}{\Delta r_{i+\frac{1}{2}}} + r_{i-\frac{1}{2}} \frac{(P_{fi} - P_{fi-1})}{\Delta r_{i-\frac{1}{2}}} \right) + S\frac{k_m}{\mu}(P_{mi} - P_{fi})$$

$$\varphi_m c_{tm} \frac{P_{mi+1} - P_{mi}}{\tau} = S\frac{k_m}{\mu}(P_{mi} - P_{fi})$$

[4]Азис Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных систем, 2004 г, 416 стр.

Заключение

- Рассмотрена математическая модель системы «сеть трещин-матрица»;
- Реализован численный метод для решения уравнения массопереноса в коллекторе трещиновато-порового типа для равномерного шага;
- Проведен анализ чувствительности давления к входным параметрам

Планируется:

- Провести анализ на неравномерной сетке;
- Усложнить модель за счет влияния внешних факторов

Благодарю за внимание!