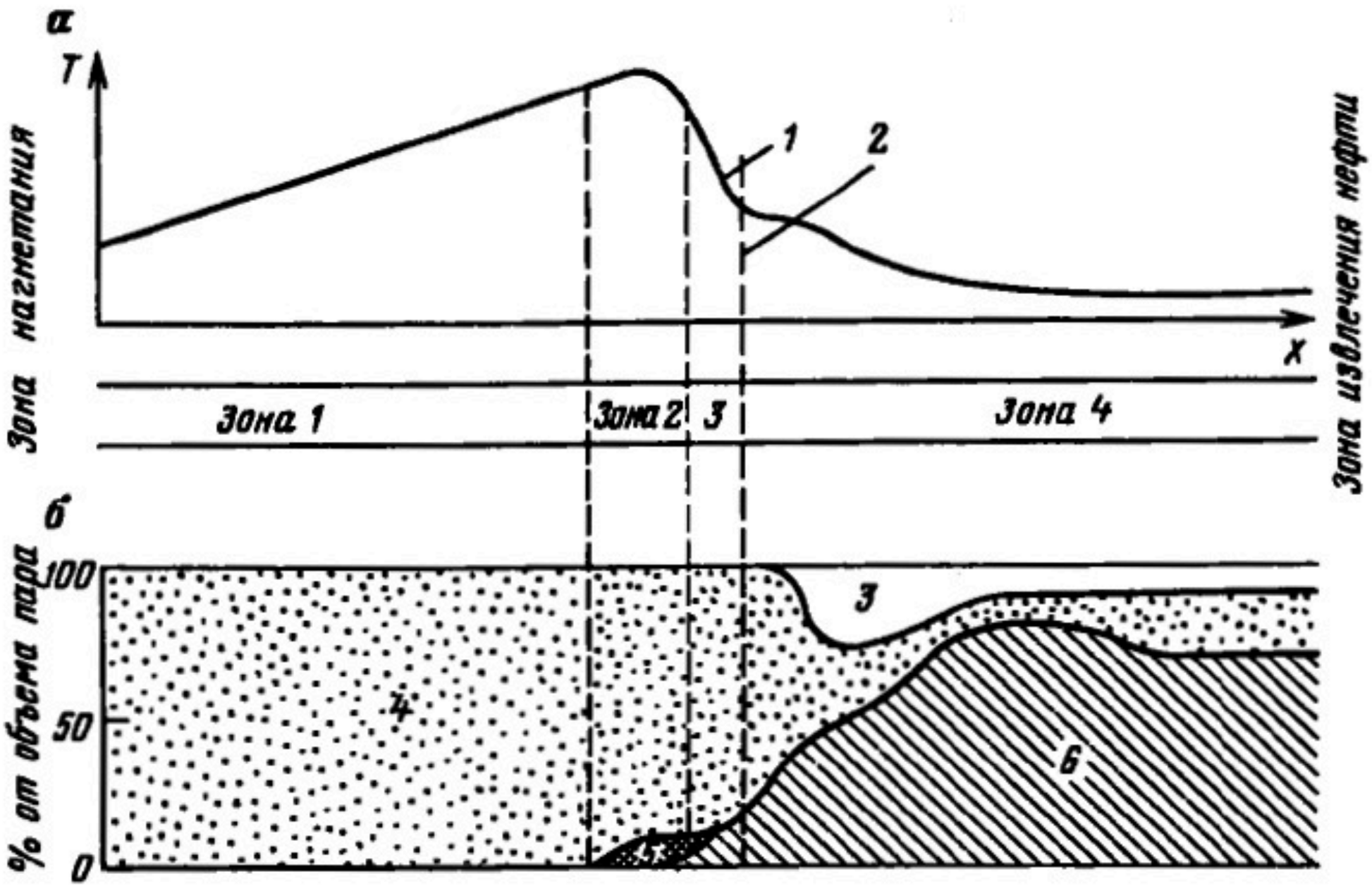
Санкт-Петербургский Политехнический Университет

Анализ влияния фильтрационных параметров нефтяного пласта на процесс термической закачки воздуха при помощи математической модели внутрипластового горения

н. р.: канд. физ.-мат. наук С.В.Лукин
выполнил Чебышев И.С.

Схема ВПГ и постановка задачи



Профили температуры (а) и насыщенности (б) при ВПГ

1 - распространение фронта, 2 - перемещение воздуха, 3 - вода, 4 - газ, 5 - кокс, 6 - нефть

Основные уравнения

Уравнения массового баланса фаз и компонентов:

Нефть $$\phi\frac{\partial\rho_1 S_1}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(\rho_1\frac{Kk_1}{\mu_1}\frac{\partial p}{\partial x})-J_1$$

Вода $$\phi\frac{\partial\rho_2 S_2}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(\rho_2\frac{Kk_2}{\mu_2}\frac{\partial p}{\partial x})-J_2$$

Газ $$\phi\frac{\partial\rho_3 S_3}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(\rho_3\frac{Kk_3}{\mu_3}\frac{\partial p}{\partial x})+J_1+J_2$$

Водяной пар в газе $$\phi\frac{\partial\rho_3 C_{31} S_3}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(\rho_3 C_{31}\frac{Kk_3}{\mu_3}\frac{\partial p}{\partial x})+\eta_{31}J_1+J_2$$

Кислород в газе $$\phi\frac{\partial\rho_3 C_{32} S_3}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(\rho_3 C_{32}\frac{Kk_3}{\mu_3}\frac{\partial p}{\partial x})-\eta_{32}J_1$$

$\rho_i, S_i, k_i, \mu_i, \eta_{3k}, C_{3k}$ - плотность, насыщенность, фазовая проницаемость, вязкость, стехиометрический (массовый) коэффициент, концентрация.

Основные уравнения

Уравнения баланса энергии(без учета тепловых потерь в окружающую среду):

$$C_* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_* \frac{\partial T}{\partial x}\right) - V_* \frac{\partial T}{\partial x} + J_1 Q_1^* - J_2 Q_2$$

Фазовые проницаемости:

$$k_1 = \left(\frac{S_1 - S_{1r}^*}{1 - S_{1r}^*}\right)^{2.8} (3.4 - 2.4 S_1), S_1 > S_{1r}^*$$

$$k_1 = 0, S_1 \le S_{1r}^*$$

$$k_2 = \left(\frac{S_2 - S_{2r}^*}{1 - S_{2r}^*}\right)^{3.5}, S_2 > S_{2r}^*$$

$$k_2 = 0, S_2 \le S_{2r}^*$$

$$k_3 = \left(\frac{S_3 - S_{3r}^*}{1 - S_{3r}^*}\right)^{3.5} (4 - 3 S_3), S_3 > S_{3r}^*$$

$$k_3 = 0, S_3 \le S_{3r}^*$$

$S_{1r}^*; S_{2r}^*; S_{3r}^*$ -остаточные нефте-, водо-, газонасыщенности.

Зависимость вязкости от температуры (используются экспериментальные данные, полученные для месторождений Сибири).

$$\mu_1 = \mu_{10} \exp\left[-b(T - T_{10})\right]$$

Скорость реакции окисления (E_A из эксперимента на Дифф. Скан. Калориметре)

$$J_1 = \phi A_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) M_1 \left(\frac{\rho_1}{M_1}\right)^n S_1^n \left(p_{O_2}\right)^m$$

Скорость испарения воды:

$$J_2 = a\left(p_s(T) - p_{31}\right)$$

Допущения

1. Жидкие фазы считаются несжимаемыми
2. Газовая фаза сжимаема и описывается уравнениями состояния совершенного газа
3. Температуры фаз одинаковы
4. Давления фаз одинаковы
5. Выполняется закон Дарси. Применяется модель неизотермической многофазной многокомпонентной фильтрации

$$q_f = \frac{k}{\eta}\frac{\Delta P}{L}F$$

где q_f — объемный расход флюида, $м^3/с$; k — проницаемость пористой среды, $м^2$; η — динамическая вязкость флюида, $Па \cdot с$; $\Delta P = P_1 - P_2$ — перепад давления, $Па$; L — длина образца пористой среды, $м$; F — площадь фильтрации, $м^2$.

6. Растворимостью газовых компонентов в нефти и воде пренебрегается. Вязкость нефти зависит только от температуры
7. Пренебрегается гравитационными и капиллярными эффектами
8. Теплообмен с окружающей средой не учитывается

Граничные и начальные условия

- На входе в пласт задаются насыщенности всех фаз и концентраций компонентов газовой фазы, а также давление и температура

$$S_i(0,t) = S_i^{in}; \quad C_{ik} = C_{ik}^{in},$$

$$p(0,t) = P^{in}; \quad T(0,t) = T^{in}$$

- На правой границе задаются давление и отсутствие потока тепла

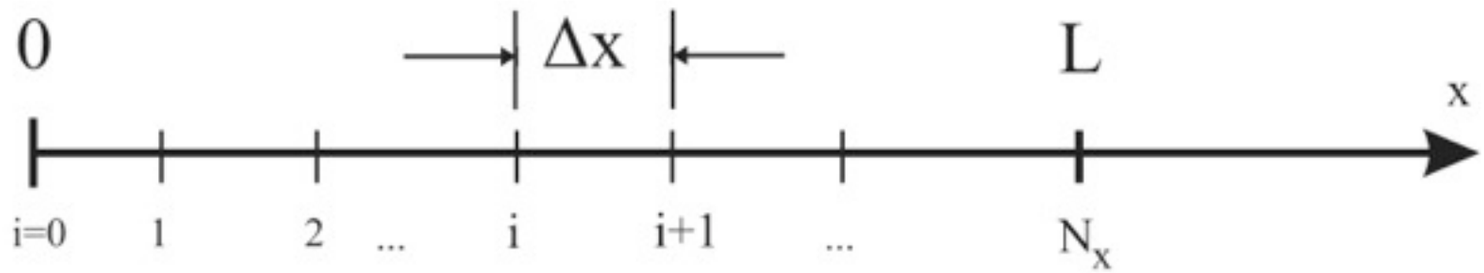
$$p(L,t) = P^{out} \qquad \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=L} = 0$$

- В начальный момент времени задаются состояния среды: температура, насыщенности, давление пласта

$$S_i(x,0) = S_{i0}; \quad C_{ik} = C_{ik0}$$

$$p(x,o) = p_0; \quad T(x,0) = T_0$$

Расчетная область



Пусть искомые параметры T_i, P_i, S_i определяются в узлах сетки.

Давление (неявная схема)

$$\frac{\phi S_{3i}^t}{R\Delta t}\left(\frac{p_i^{t+1}}{M_{gi}^{t+1}T_i^{t+1}}-\frac{p_i^t}{M_{gi}^t T_i^t}\right)=\gamma_i\frac{p_{i+1}^{t+1}-p_i^{t+1}}{\Delta x^2}-\gamma_{i-1}\frac{p_i^{t+1}-p_{i-1}^{t+1}}{\Delta x^2}+J_{3i}^t$$

Насыщенности (явная схема)

$$S_{2i}^{t+1}=S_{2i}^t+\frac{\Delta t}{\phi}\left(\psi_i\frac{p_{i+1}^t-p_i^t}{\Delta x^2}-\psi_{i-1}\frac{p_i^t-p_{i-1}^t}{\Delta x^2}-\frac{J_{2i}^t}{\rho_2}\right)$$

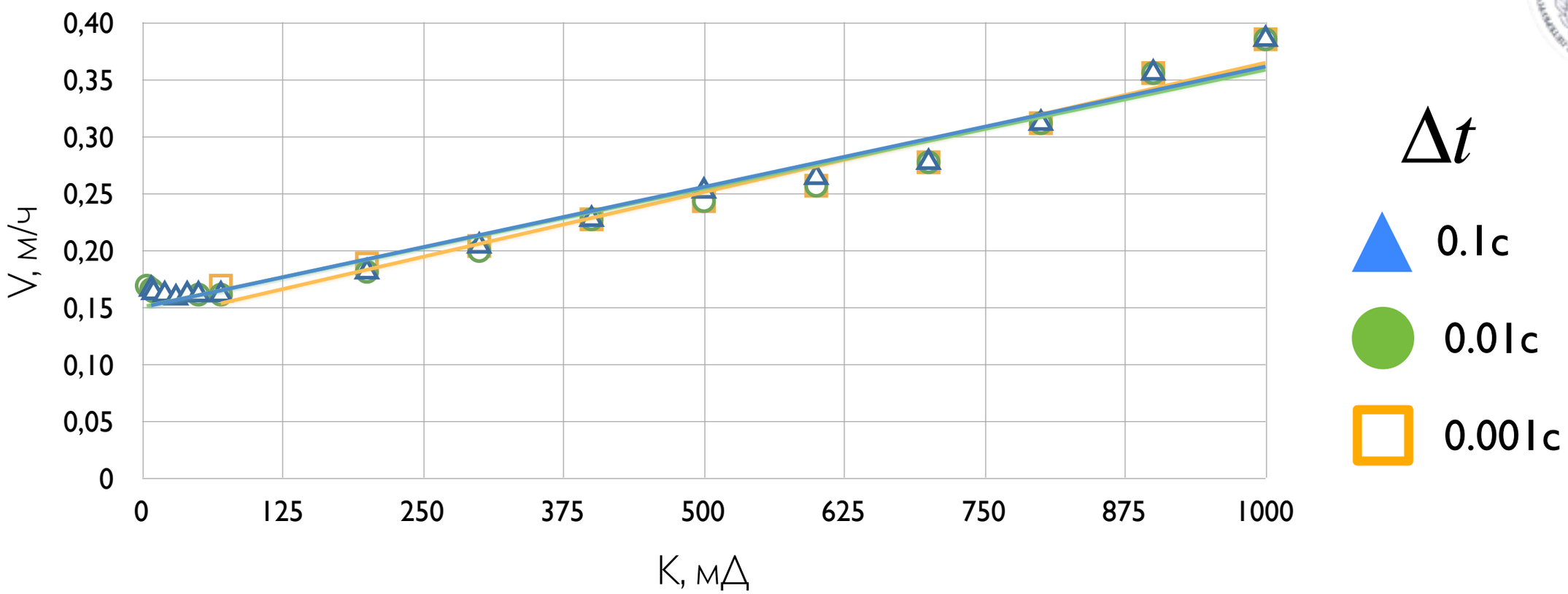
Концентрации (явная схема)

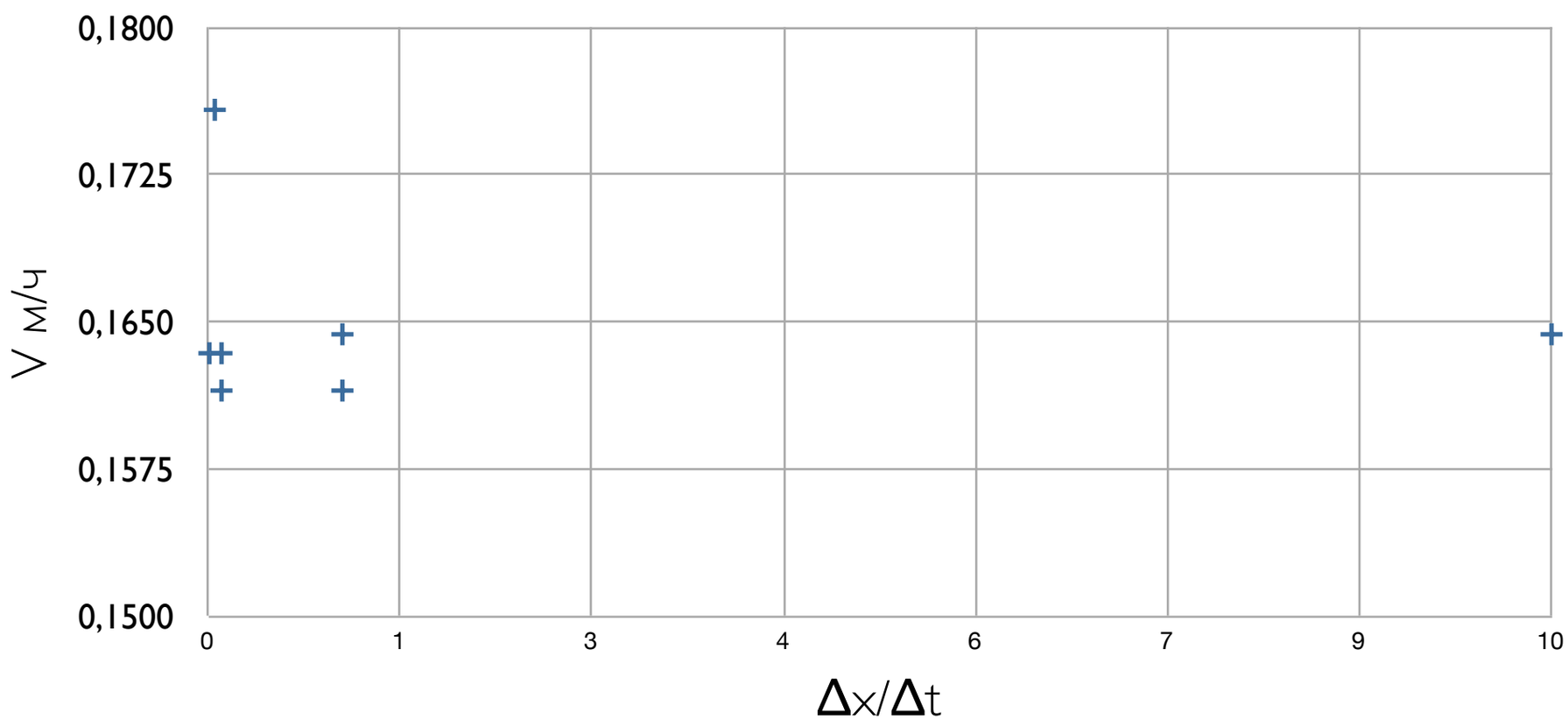
$$C_{31i}^{t+1}=C_{31i}^t+\frac{\Delta t}{\phi\rho_{3i}^t S_{3i}^t}\left(\begin{array}{l}\left(\gamma_i-C_{31i}^t\psi_i\right)\dfrac{p_{i+1}^t-p_i^t}{\Delta x^2}-\\ -\left(\gamma_{i-1}-C_{31i}^t\psi_{i-1}\right)\dfrac{p_i^t-p_{i-1}^t}{\Delta x^2}+J_{31i}^t\end{array}\right)$$

Явная схема для температуры

$$T_i^{t+1}=T_i^t+\frac{\Delta t}{C_{*i}^t}\left(\lambda_{*\,i+1/2}\frac{T_{i+1}^t-T_i^t}{\Delta x^2}-\lambda_{*\,i-1/2}\frac{T_i^t-T_{i-1}^t}{\Delta x^2}-V_{*i}\frac{T_i^t-T_{i-1}^t}{\Delta x}+J_{1i}^t\left(Q_1-\eta_{31}Q_2\right)-J_{2i}^tQ_2\right)$$

Точность численной схемы

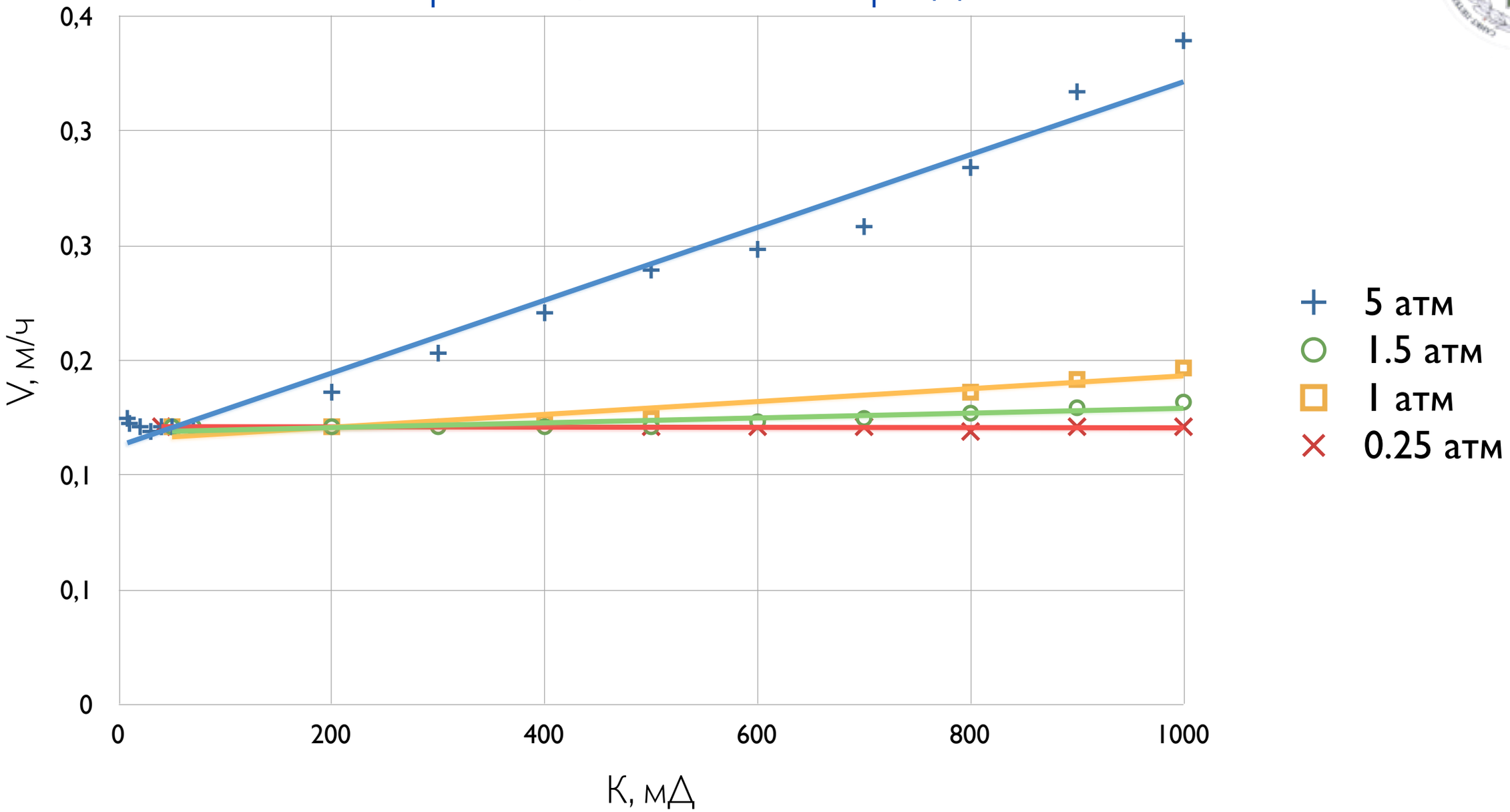




K=500 мД

ΔP=1атм

Зависимость скорости фронта горения от проницаемости породы

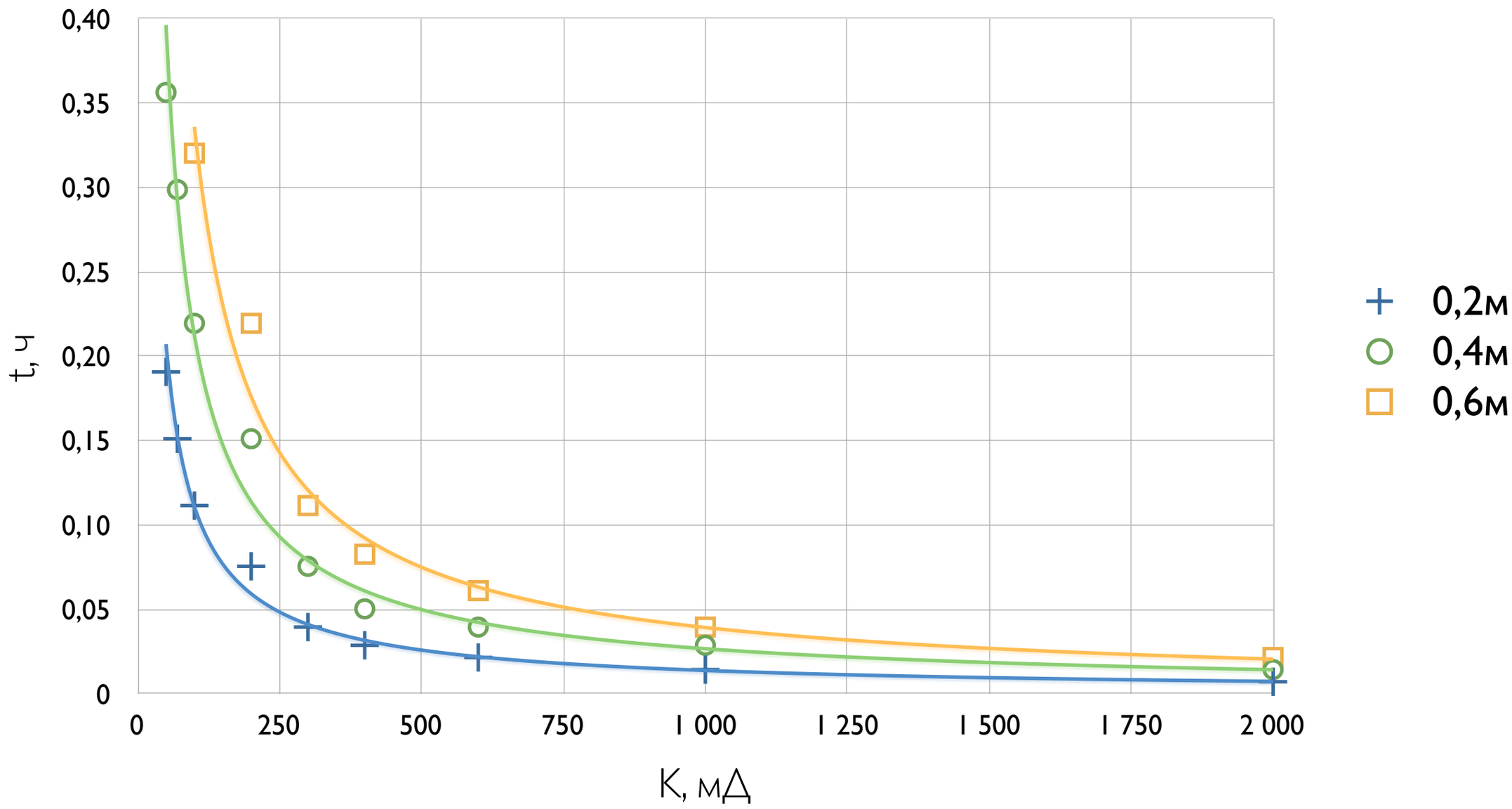


По значению проницаемости продуктивные пласты делятся на:

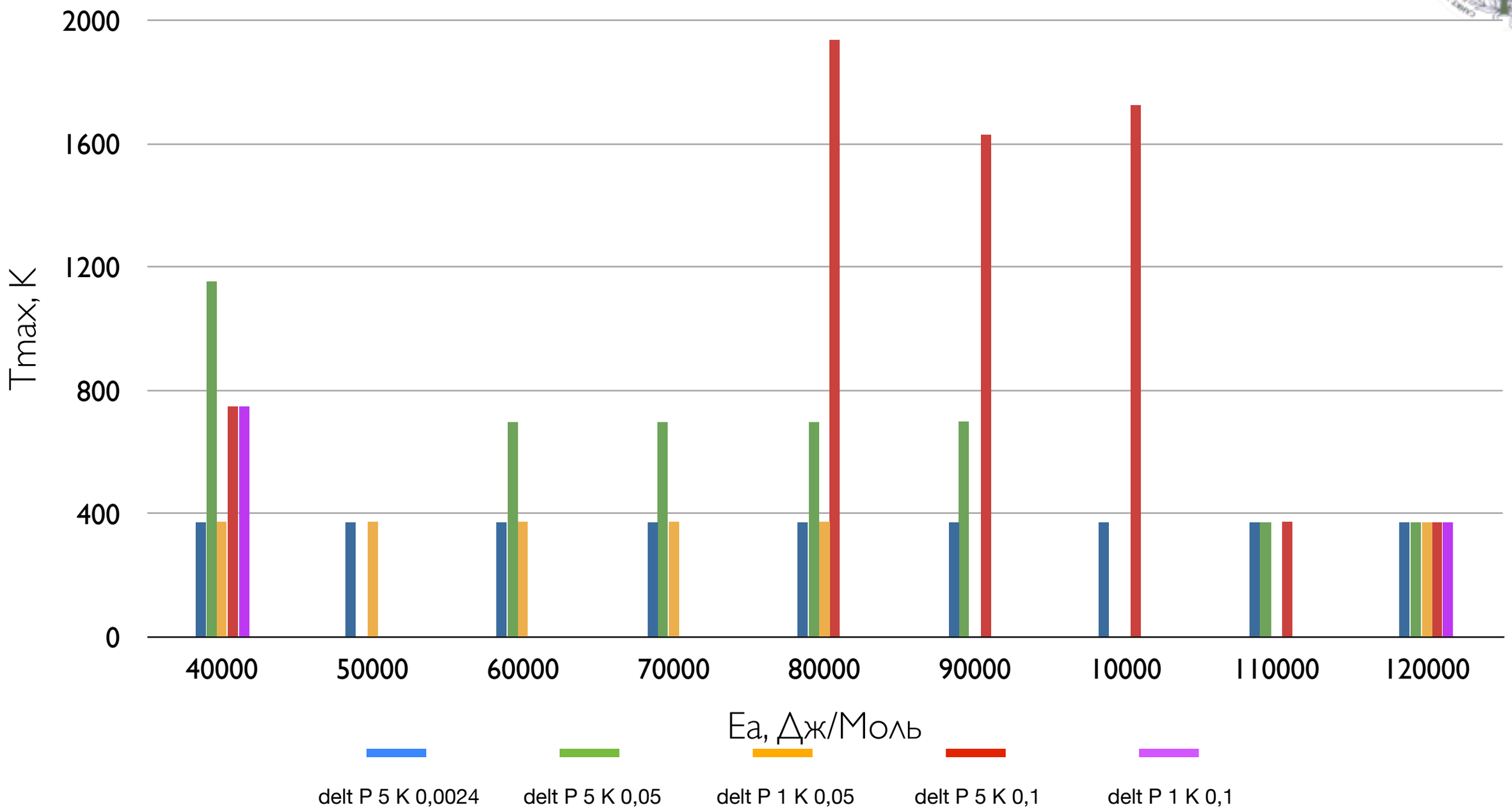
- Низкопроницаемые (от 0 до 100 мД);
- Среднепроницаемые (от 100 мД до 500 мД);
- Высокопроницаемые (более 500 мД).

Среднее расстояние между добывающей и нагнетающей скважиной 500м.

Время прохождения фронта горения отметки в 0.2м, 0.4м, 0.6м в зависимости от проницаемости



Зависимость максимальной температуры фронта горения от энергии активации



Значения превышающие отметку в 900К не являются физичными.

Сравнение с зарубежными исследованиями

Автор	K, мД	V, м/ч	Метод
Onyekonwu [1]	6000	0,16	Эксперимент
JAAFAR SADIQ F. A. OKLANY [2]	4000	0,01	Аналитика
Результаты проведенные в представленной работе	1000	0,18	Аналитика по модели БашГу

Автор	Ea	Tmax, K	Метод
Onyekonwu, [1]	-	810	Эксперимент
JAAFAR SADIQ F. A. OKLANY [2]	77000	622	Аналитика
Результаты проведенные в представленной работе	80000	696	Аналитика по модели БашГу

Результаты

1. Доказана устойчивость численной схемы

2. Найдено время перемещения

3. Найдена скорость продвижения фронта горения

4. Определены максимальные температуры фронта горения

Список литературы

[1] Experimental and Simulation Studies of Laboratory In-Situ Combustion Recovery by M.O. Onyekonwu, U. of Port Harcourt, and K. Pande, H.J. Ramey Jr., and WE. Brigham, Stanford U

[2] AN IN-SITU COMBUSTION SIMULATOR FOR ENHANCED OIL RECOVERY by JAAFAR
Ph.D. SADIQ F. A. OKLANY Salford U.