

Геомеханическое моделирование для определения давления смыкания трещины автоГРП с учетом изменения поля пластового давления



Давлетова А. Р.
Федоров А. И.



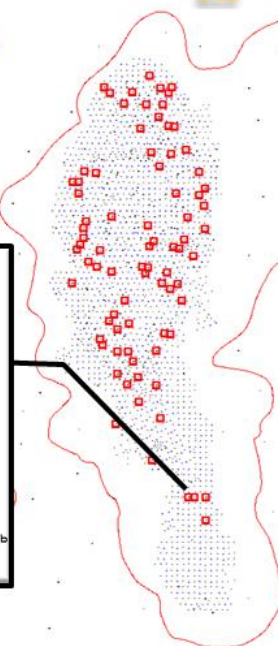
- 1. Математическая модель для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) пласта.**
- 2. Методика определения давления смыкания трещины автоГРП.**
- 3. Результаты моделирования: опробование на промысловых данных.**



Эффект автоГРП – самопроизвольный рост техногенных трещин от нагнетательных скважин

Неконтролируемый рост трещин автоГРП – риск прорывов нагнетаемой жидкости в добывающие скважины

Месторождение X

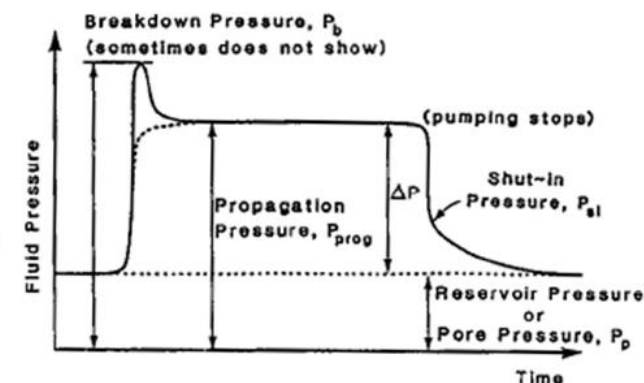


- **Давление смыкания трещины**

$P_{см} = \Sigma_0$, Σ_0 – сжимающее усилие, действующее на поверхность трещины, при котором трещина в целом смыкается.

- **Давление раскрытия и роста трещины**

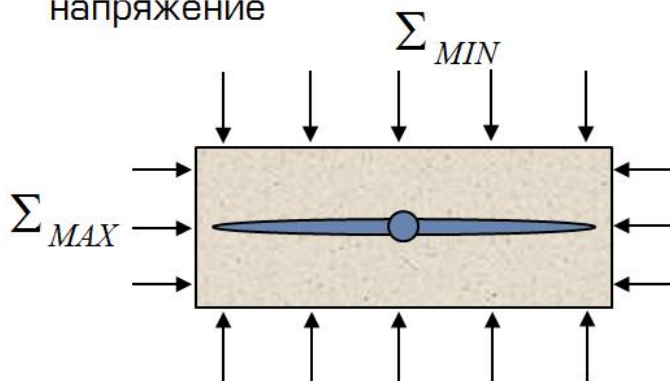
$$P_{автоГРП} \geq \Sigma_0 + \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi L_f}}, \quad K_{IC} - \text{трещиностойкость}; \quad L_f - \text{полудлина трещины.}$$





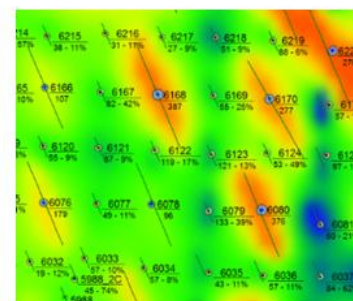
Факторы, оказывающие влияние на величину $P_{см}$:

- минимальное горизонтальное напряжение



- градиент пластового давления

$$f = -\alpha \nabla P$$



Модифицированный
геомеханический симулятор
определения НДС пласта
с учетом измененного поля
пластового давления

Уравнения равновесия пористой среды:

$$\Delta U + \frac{1}{1-2\nu} \nabla \operatorname{div} U + \frac{1}{\mu} f = 0,$$

$f = -\alpha \nabla P$ – объемная сила (градиент пластового давления)

μ – модуль сдвига,

ν – коэффициент Пуассона,

α – коэффициент порозластичности.

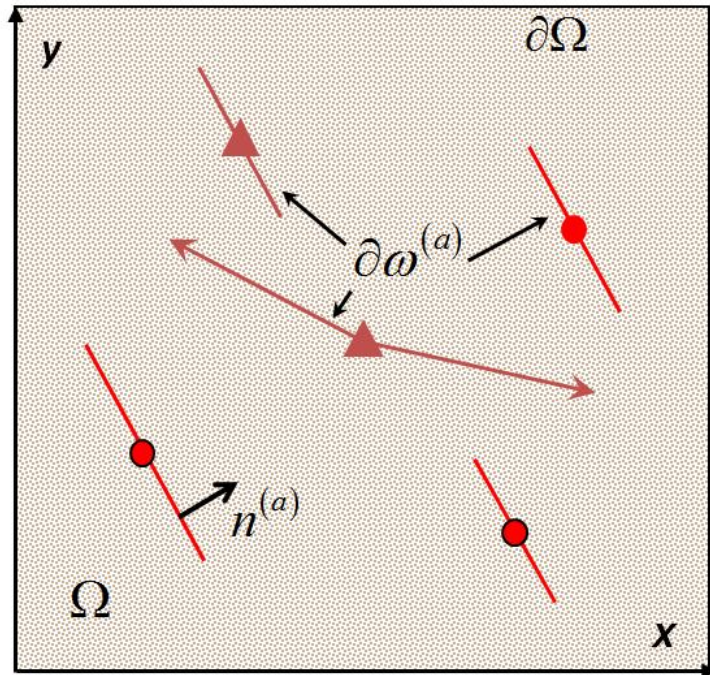
Граничные условия на трещине:

$\sigma_{ik} n_k = -P n_i$ – задано забойное давление P ,

$u^+ - u^- = W$ – задано раскрытие трещины W .



Область решения



Поле пластовых давлений
рассчитывается отдельным
симулятором

Уравнение равновесия в пористой среде
с учетом фильтрации:

$$\Delta \mathbf{u} + \frac{1}{1-2\nu} \nabla \operatorname{div} \mathbf{u} + \frac{1}{\mu} \mathbf{f} = 0,$$

$\mathbf{f} = -\alpha \nabla p$ - объемная сила – градиент давления

Уравнение состояния для тензора напряжений:

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{ll} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} - \alpha p \delta_{ij},$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

$$\lambda = \frac{\gamma K}{\gamma + K} - \frac{2}{3} \mu \quad \text{- коэффициент Ламе,}$$

ν - коэффициент Пуассона,

α - коэффициент порозеластичности.



Внешние граничные условия:

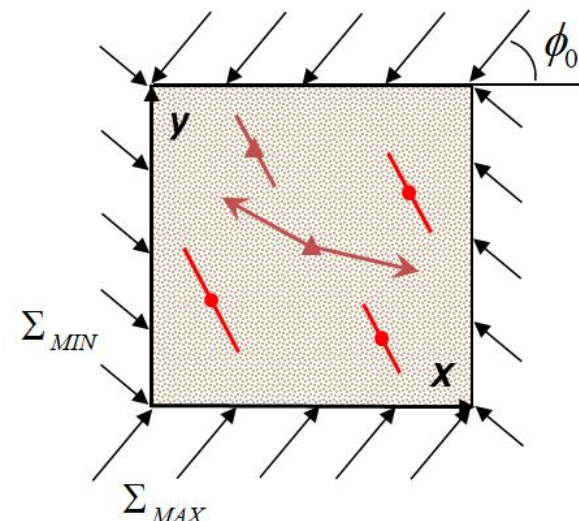
Тензор напряжений для двухосного напряженного состояния имеет вид:

$$\hat{\Sigma} = T^{-1}(\phi_0) \begin{pmatrix} \Sigma_{Max} & 0 \\ 0 & \Sigma_{Min} \end{pmatrix} T(\phi_0),$$

T - матрица поворота,

ϕ_0 - азимут анизотропии,

$\Sigma_{Max}, \Sigma_{Min}$ - максимальное и минимальное горизонтальные напряжения.



Граничные условия на трещине:

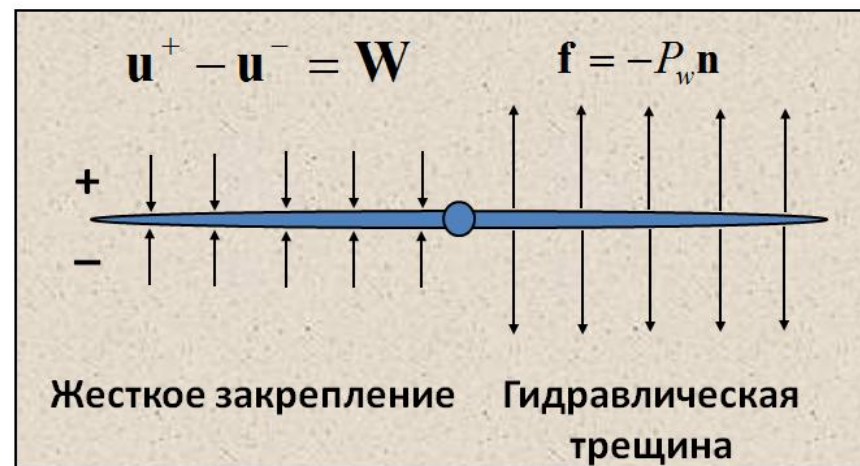
$$1. \sigma_{ik} n_k^{(a)} = -P_w^{(a)} n_i^{(a)},$$

$$2. [\mathbf{u}^{(a)}(s)] = \mathbf{w}^a(s).$$

P_w - забойное давление,

$\mathbf{w}^{(a)}$ - раскрытие трещины,

$\mathbf{n}^{(a)}$ - нормаль к поверхности трещины.





1. Расчет компонентов тензора эффективных напряжений вдоль трещины.

Полный тензор напряжений в пороупругой насыщенной среде имеет вид:

$$\sigma_{ik} = \sigma_{ik}^{eff} - \alpha P_0 \delta_{ik}, \quad \sigma_{ik}^{eff} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} \end{pmatrix} - \text{тензор эффективных напряжений.}$$

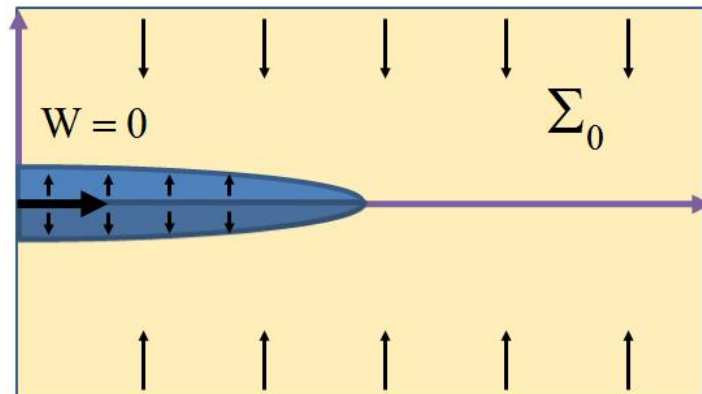
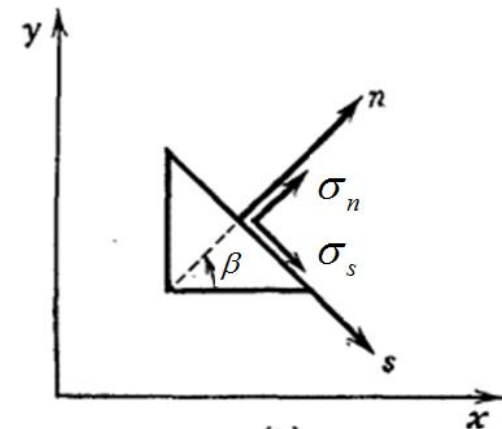
2. Расчет нормального напряжения – сжимающего усилия, действующего на поверхность трещины.

$$\sigma_s = (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \sin \beta \cos \beta - \sigma_{12} (\cos^2 \beta - \sin^2 \beta),$$

$$\sigma_n = \sigma_{11} \cos^2 \beta + 2\sigma_{12} \sin \beta \cos \beta + \sigma_{22} \sin^2 \beta,$$

σ_n, σ_s - нормальное и касательное усилия,

β - направление трещины (граничного элемента).



3. Определение давления смыкания трещины:

$$P_{CL} = \Sigma_n + \alpha P_0,$$

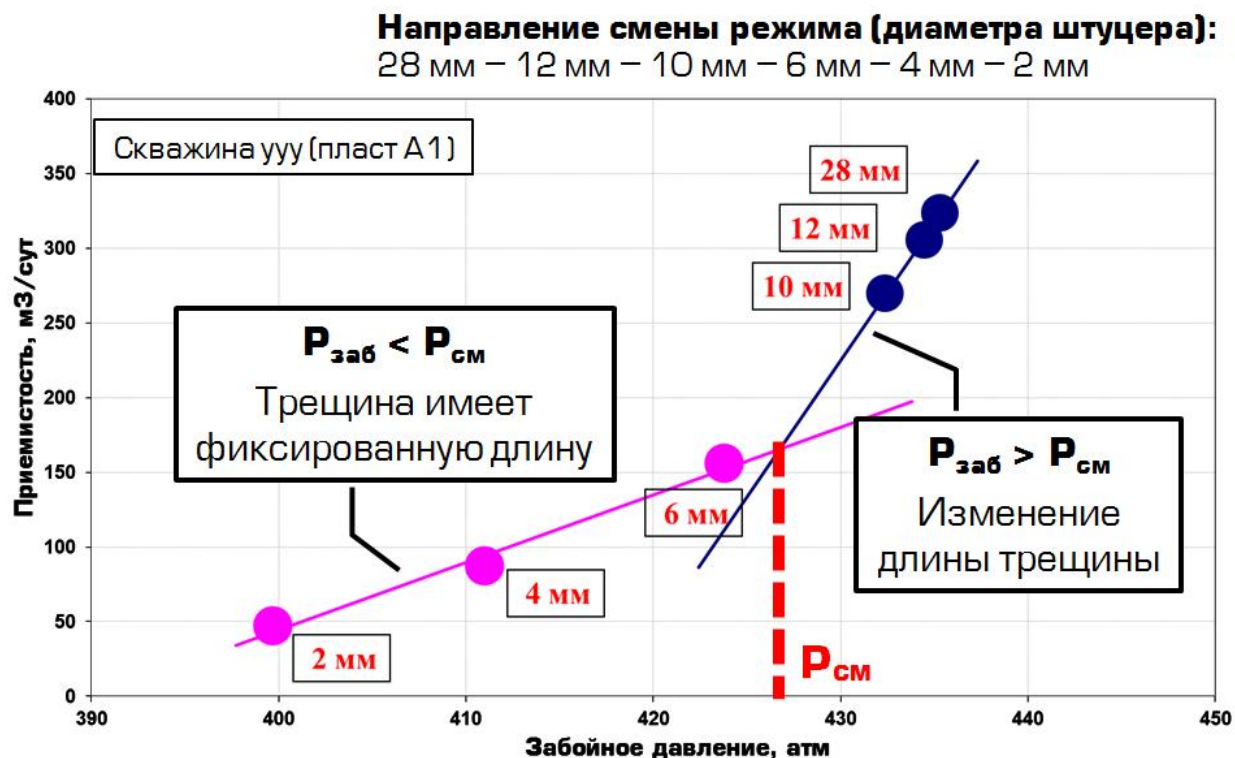
$$\Sigma_n = -\sigma_n,$$

α - к-т порозластичности.

Граничное условие на целевой трещине – нулевое раскрытие.



Индикаторная диаграмма (ИД) – зависимость расхода нагнетаемой жидкости в скважине от забойного давления



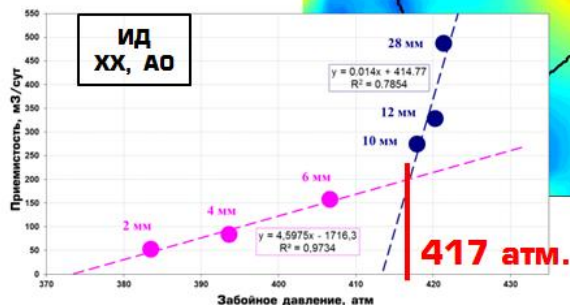
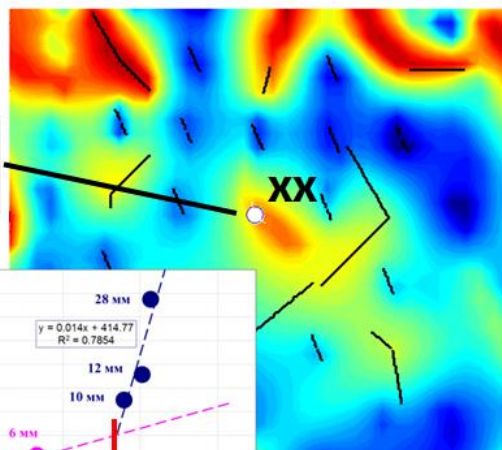
ГДИС (метод установившихся закачек) – основной источник информации о давлении смыкания трещины АвтоГРП

Примеры расчетов давления смыкания трещины автоГРП



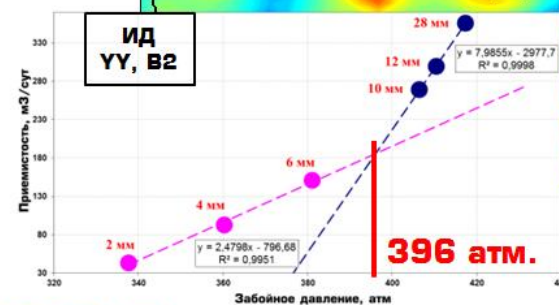
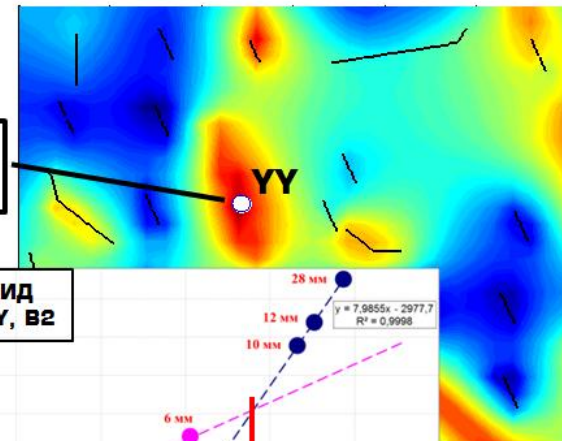
Скважина XX, А0

Расчет:
 $P_{см} = 418$ атм.



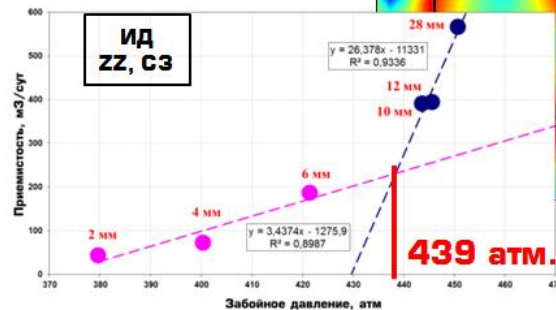
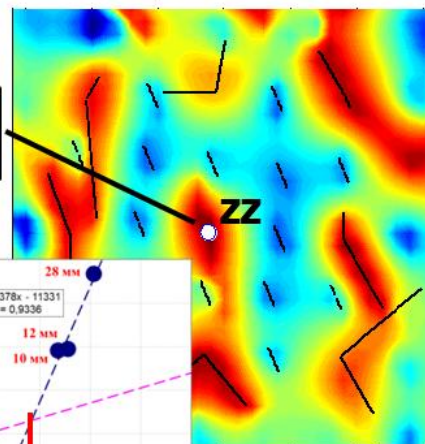
Скважина YY, В2

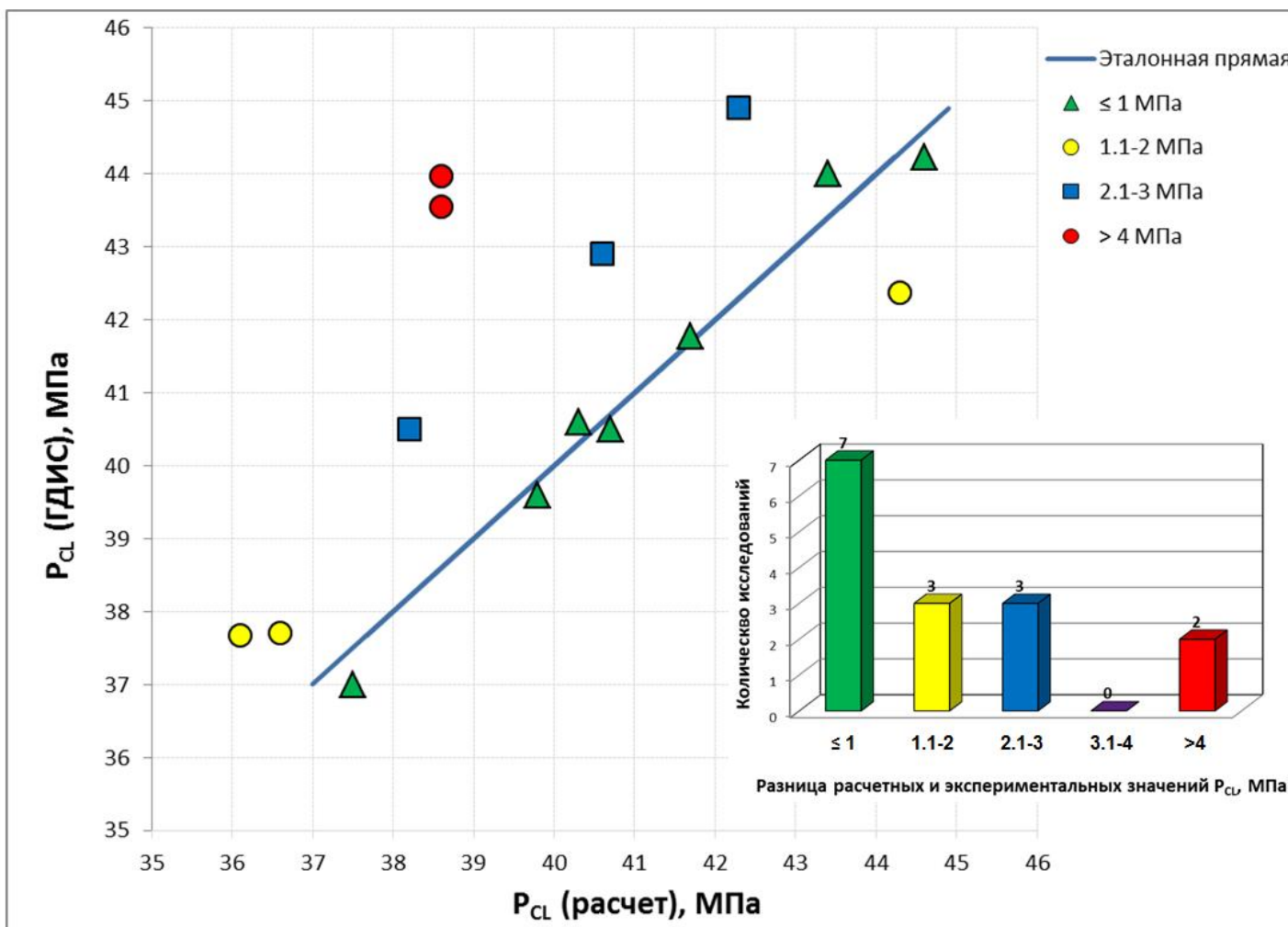
Расчет:
 $P_{см} = 398$ атм.



Скважина ZZ, С3

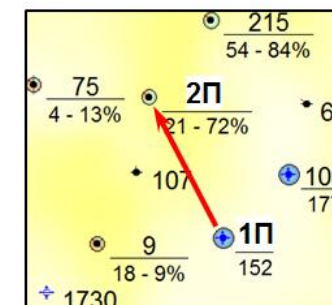
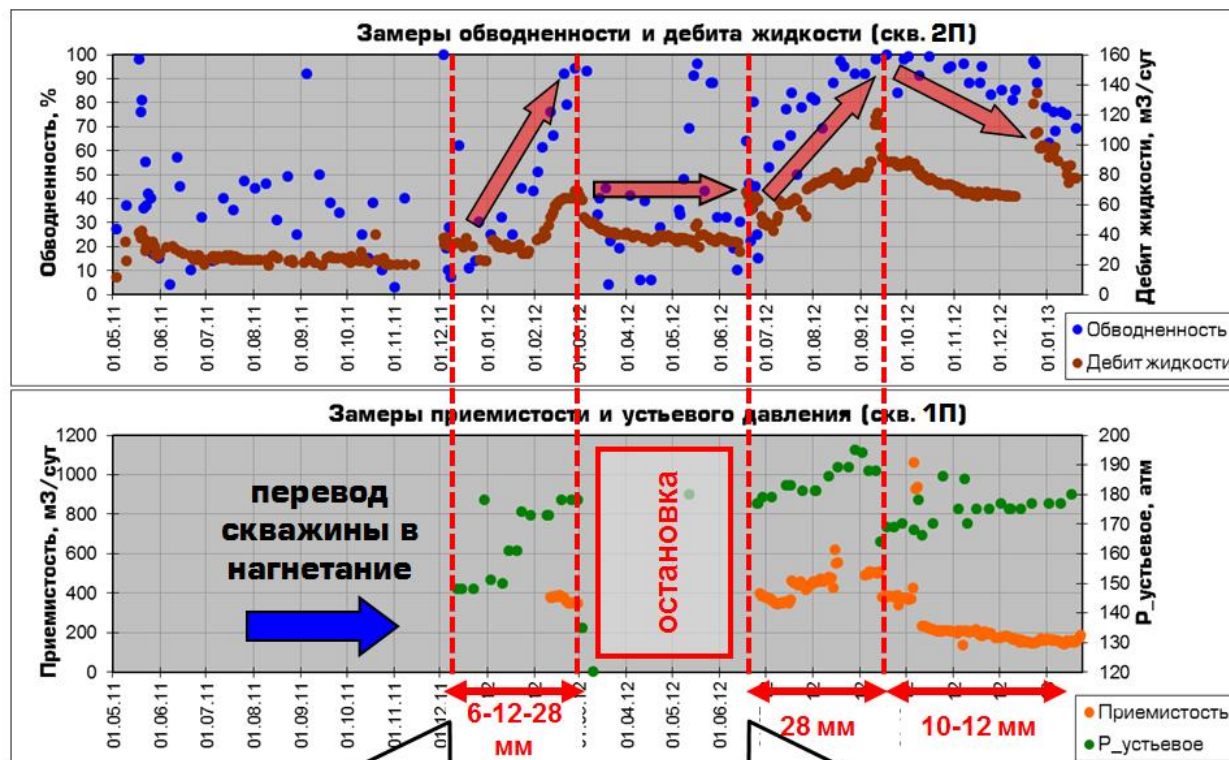
Расчет:
 $P_{см} = 434$ атм.







Исследование гидродинамической связи между парой скважин 1П – 2П



Скв. 1П – нагнетательная скважина с автоГРП;

Скв. 2П – добывающая скважина.

Прокси-модель (ПК «РН-КИН»):

- геометрия трещин;
- карты пластового давления.

Сравнение результатов

Перевод в нагнетание
(12.12.2011)

$P_{заб} = 378$ атм.

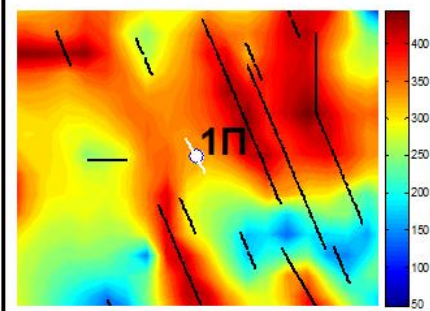
$P_{см} = 374$ атм.

Запуск после остановки
(27.06.2012)

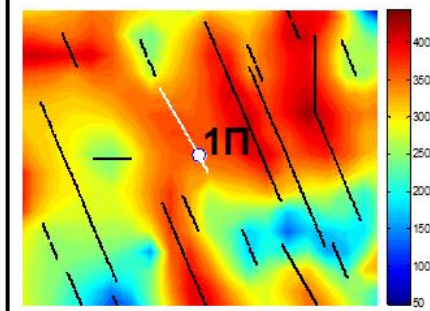
$P_{заб} = 402$ атм.

$P_{см} = 403$ атм.

Расчет: $P_{см} = 374$ атм.



Расчет: $P_{см} = 403$ атм.





Выводы:

- Разработана методика определения давления смыкания трещины автоГРП с учетом измененного в процессе эксплуатации поля пластового давления.
- Реализован пилотный модуль в среде Matlab.
- Результаты опробования: в сравнении с результатами ГДИС расчетные значения в основном занижены. Результаты моделирования – минимальная оценка величины давления смыкания трещины автоГРП.



Спасибо за внимание!