

Зависимость напряженного состояния и пластового давления от объема извлекаемых запасов в процессе разработки нефтяного месторождения

Гарагаш И.А.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Dependence of the stress state and reservoir pressure from the volume of recoverable reserves during the developmrent of oil deposit

I.A.Garagash

Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow

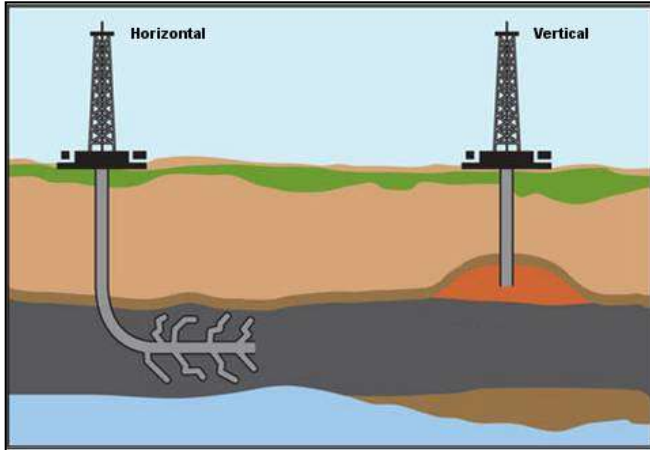
Актуальной задачей при разработке месторождений нефти и газа является оценка связи между изменениями пластового давления и величиной извлекаемых запасов. Для ее решения часто прибегают к численному анализу связанной задачи геомеханики и фильтрации.

The actual problem in the development of oil and gas fields is to assess the relationship between changes in reservoir pressure and the amount of recoverable reserves. To solve it, often used the numerical analysis coupled problem of geomechanics for porous media saturated fluid

Представляют интерес глобальные аналитические оценки зависимости пластового давления от напряженного состояния и объема извлекаемых запасов, которые, как показано ниже, можно получить с помощью решения Эшелби для включения в упругой среде.

Was studied the global analytical estimates of reservoir pressure, depending on the stress state and the volume of recoverable reserves, which, as shown below, can be accessed using Eshelby solutions for inclusion in the elastic medium.

Изменение напряженного состояния коллектора при откачивании флюида Changing of the collector stress state during the development of oil deposit



Для неконсолидированного песчаного коллектора (компания Shell, Мексиканский залив), расположенного на глубине 3700м, было получено эмпирическое соотношение

For unconsolidated sandstone reservoir (Shell Company, Gulf of Mexico), located at a depth of 3700 m was obtained empirical relation

$$\sigma_{11}^{\text{exp}} = \sigma_{11}^0 + \Delta\sigma_{11}, \quad \Delta\sigma_{11} = \Delta p / 2$$

Аналитическое решение для пористой среды
The analytical solution for the porous medium

$$\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{33}} = \lambda_1 - \frac{\beta p}{\sigma_{33}}(1 - \lambda_1), \quad \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{33}} = \lambda_2 - \frac{\beta p}{\sigma_{33}}(1 - \lambda_2)$$

$$\lambda_1 = \frac{E_2}{E_3} \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad \lambda_2 = \frac{E_1}{E_3} \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad \beta = 1 - \frac{K}{K_s}$$

$$\Delta\sigma_{11} = \beta\Delta p(1 - \lambda_1), \quad \Delta\sigma_{22} = \beta\Delta p(1 - \lambda_2)$$

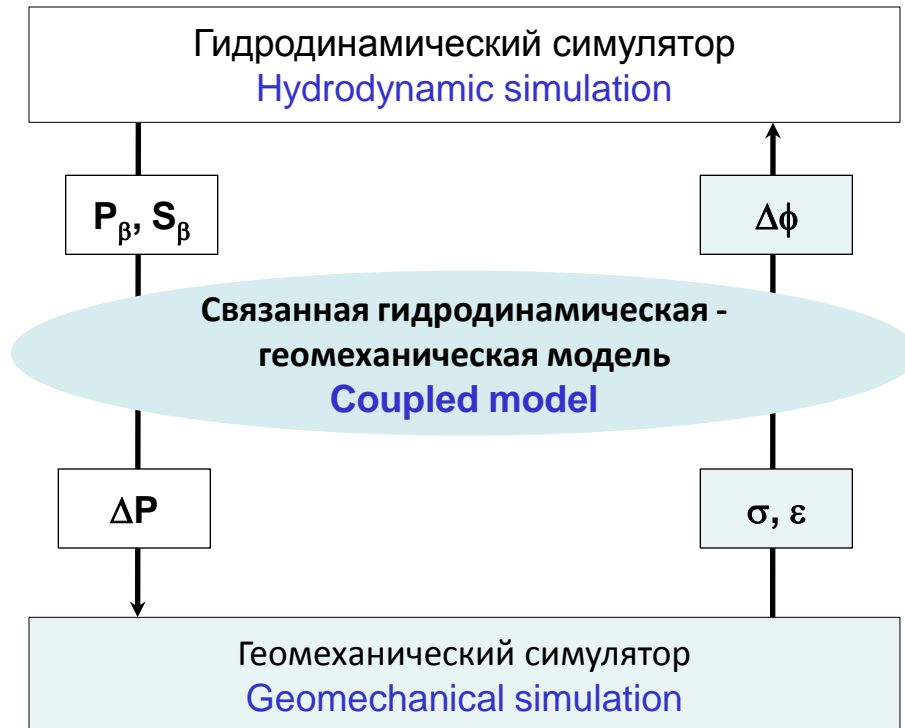
$$\Delta\sigma_{11} = \Delta\sigma_{22} = \beta\Delta p \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu}$$

$$\nu = 0.33$$

$$\frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} = 0.507$$

Схема связанного геомеханического и гидродинамического моделирования

The scheme of coupled geomechanical and hydrodynamic modeling

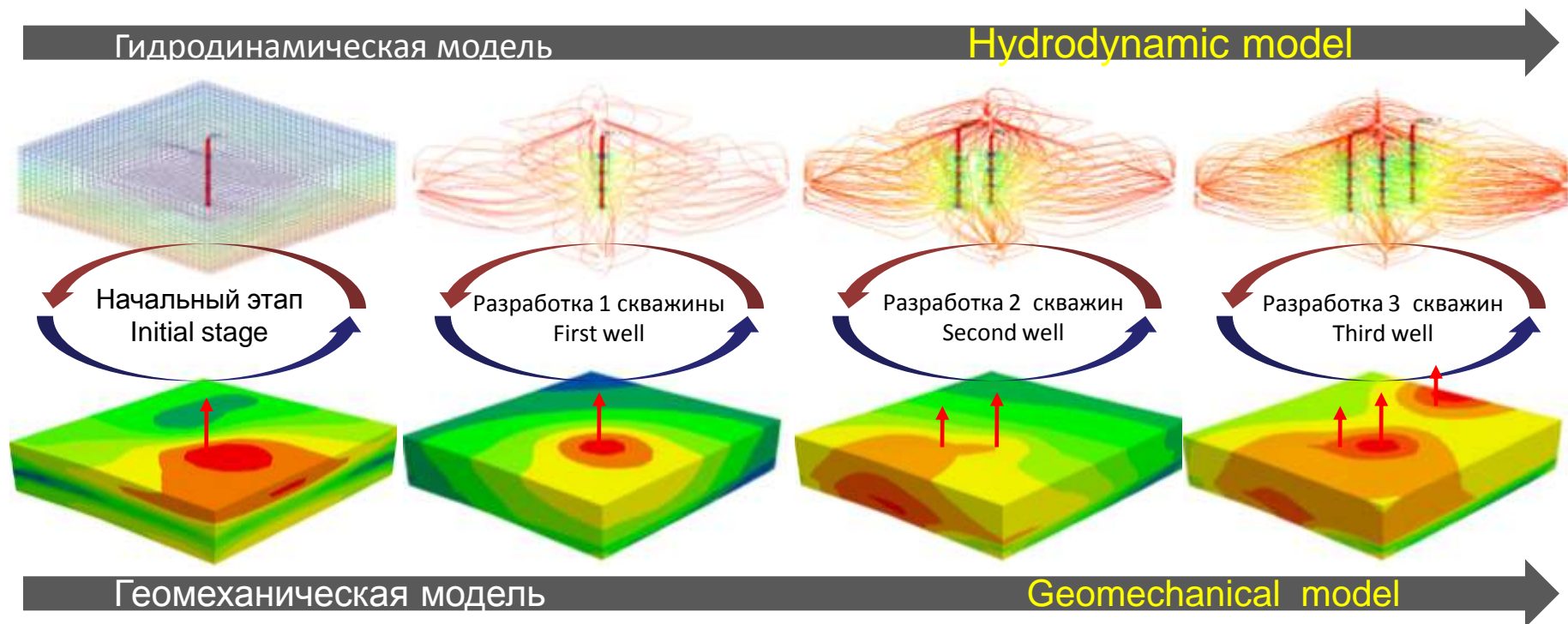


Публикации

Papers

- Lewis R. W., Ghafouri H. R//International journal for numerical and analytical methods in geomechanics. – 1997
- Minkoff S. E , Stone, C. M. et al//Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2003
- Osorio J. G., Chen H. Y., Teufel L. //SPE Reservoir Simulation -1999.

P_β - давление фазы β ; (pressure)
 S_β - насыщение фазы β ; (saturation)
 $\Delta\phi$ - пористость; (porosity)
 ΔP – давление; (pressure increment)
 σ - напряжение; (stress)
 ϵ - деформация; (strain)



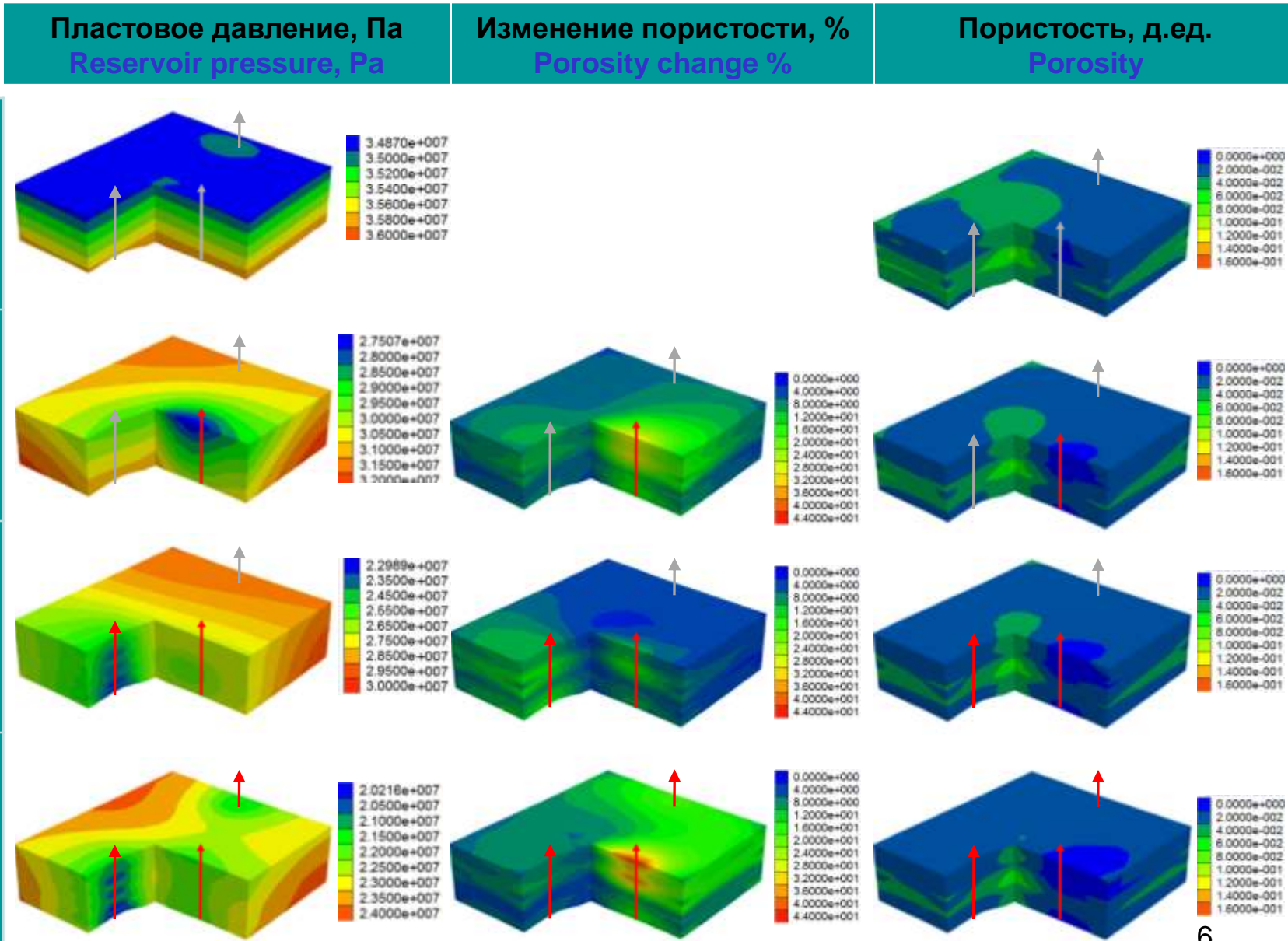
Исходные данные для построения модели:
Input data for the model:

- Инклинометрия скважин;
- Отбивки пластов;
- Геологические горизонты;
- Литологические характеристики пластов;
- Скорости V_p , плотность и пористость пород полученные по данным ГИС;
- Упругие модули рассчитанные по данным скоростей V_p .

Параметры гидродинамической модели:
The parameters of the hydrodynamic model:

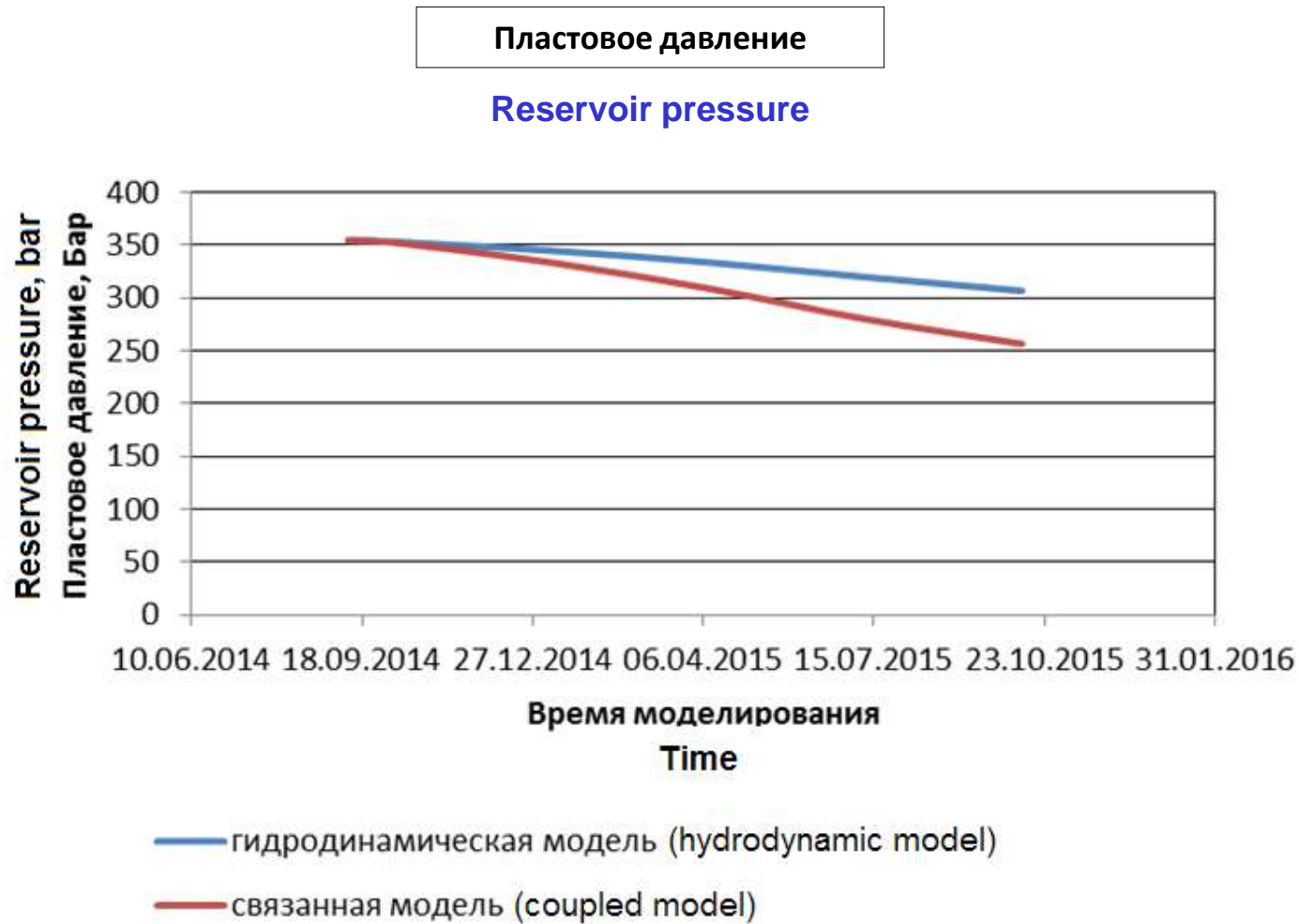
- Тип модели «Вода-нефть»;
- Тип коллектора "Одинарная пористость";
- Интервал времени моделирования разработки с 10.09.2014 по 10.10.2015
- Глубина залегания коллектора 3400м, размеры модели в плане 1600x1600м

Garagash I.A., Dubovskaya A.V., Korneva D.A., Ghasemi M.F. Coupled geomechanical and fluid flow simulation of the oil field evolution induced by reservoir production. // Proceeding of the SPE Russian Oil & Gas Exploration and production, 2014, Moscow, 10p, 2014



Влияние н.д.с. пласта-коллектора на результаты гидродинамического моделирования

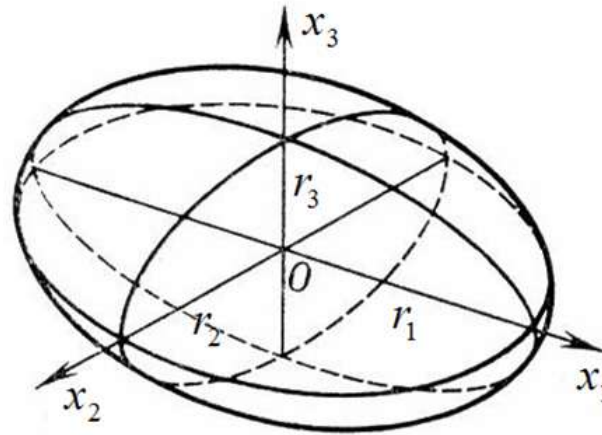
Stress state influence of collector on the result o hydrodynamic modeling



Воспользуемся решением Eshelby (1957) для задачи об эллипсоидальном включении в бесконечной упругой среде согласно которому деформированное состояние включения ε_{ij} определяется выражением

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^0 + S_{ijmn} A_{mnkl} \varepsilon_{kl}^0, \quad (1)$$

где ε_{ij}^0 - однородное деформированное состояние среды на большом удалении от включения.



Здесь компоненты матрицы S_{ijkl} определяются соотношениями

$$S_{ijij} = \frac{1}{2} Q (r_i^2 + r_j^2) I_{ij} + \frac{1}{2} R (I_i + I_j), \quad (2)$$

$$S_{ijij} = Q r_j^2 I_{ij} - R I_i, \quad (i \neq j),$$

где $Q = \frac{3}{8\pi(1-\nu)}$, $R = \frac{1-2\nu}{8\pi(1-\nu)}$; r_1, r_2, r_3 размеры эллипсоида в направлениях большой и малых осей; суммирование по повторяющимся индексам отсутствует.

Выражения для величин I_{ij} и I_r можно найти в работе Eshelby (1957), а матрица A_{ijkl} определяется в результате решения системы уравнений

$$\lambda_I(\varepsilon_{kk}^0 + \varepsilon_{kk}^c)\delta_{ij} + 2\mu_I(\varepsilon_{ij}^0 + \varepsilon_{ij}^c) = \lambda_m(\varepsilon_{kk}^0 + \varepsilon_{kk}^c - \varepsilon_{kk}^T)\delta_{ij} + 2\mu_m(\varepsilon_{ij}^0 + \varepsilon_{ij}^c - \varepsilon_{ij}^T), \quad (3)$$

где тензор ε_{ij}^c связан с тензором ε_{ij}^T соотношением

$$\varepsilon_{ij}^c = S_{ijkl}\varepsilon_{kl}^T \quad (4)$$

в виде

$$\varepsilon_{ij}^T = A_{ijkl}\varepsilon_{kl}^0, \quad (5)$$

Здесь $\lambda_I, \mu_I, \lambda_m, \mu_m$ - параметры Ламе включения и матрицы.

Воспользуемся изложенной теорией для эллипсоидальной полости, заполненной пористой средой, насыщенной флюидом под давлением p . Для флюидонасыщенной среды воспользуемся определяющими соотношениями, предложенными Био (Detournay & Cheng, 1993),

$$\sigma_{ij} = \lambda_I\varepsilon_{kk}\delta_{ij} + 2\mu_I\varepsilon_{ij} - \alpha p\delta_{ij}, \quad (6)$$

где $\alpha = 1 - \frac{K_I}{K_s}$ - параметр Био, связанный с объемным модулем $K_I = \lambda_I + \frac{2}{3}\mu_I$ в условиях дренажа и объемным модулем скелета K_s .

Изменение содержания флюида в единице объема пористой среды ζ связано с объемной деформацией ε_{kk} соотношениями

$$p = M(\zeta - \alpha\varepsilon_{kk}), \quad M = \frac{K_I K_s}{K_s \phi + (\alpha - \phi)K_{fl}} \quad (7)$$

Здесь ϕ - пористость, $\nu_i = \frac{\lambda_i}{2(\lambda_i + \mu_i)}$ - коэффициент Пуассона включения, M - модуль Био.

Решение уравнения (3), которое в рассматриваемом случае имеет вид

$$\begin{aligned} \lambda_I(\varepsilon_{kk}^0 + S_{kkmn}\varepsilon_{mn}^T)\delta_{ij} + 2\mu_I(\varepsilon_{ij}^0 + S_{ijmn}\varepsilon_{mn}^T) - \alpha M[\zeta - \alpha(\varepsilon_{kk}^0 + S_{kkmn}\varepsilon_{mn}^T)]\delta_{ij} = \\ = \lambda_m(\varepsilon_{kk}^0 + S_{kkmn}\varepsilon_{mn}^T - \varepsilon_{kk}^T)\delta_{ij} + 2\mu_m(\varepsilon_{ij}^0 + S_{ijmn}\varepsilon_{mn}^T - \varepsilon_{ij}^T) \end{aligned} \quad (8)$$

позволяет определить зависимость порового давления от объема откачиваемого флюида ζ в виде

$$p = M[\zeta - \alpha(\varepsilon_{kk}^0 + S_{kkmn}\varepsilon_{mn}^T)] \quad (9)$$

Рассмотрим включение в виде сплюсненного эллипсоида с полуосями r_1 , r_2 и r_3 .

В случае $r_1 = r_2$ компоненты матрицы S_{ijkl} (2) примут вид

$$\begin{aligned} I_1 = I_2 = \frac{2\pi\alpha^2 c}{(r_1^2 - r_3^2)^2} \left[\arccos \frac{r_3}{r_1} - \frac{r_3}{r_1} \left(1 - \frac{r_3^2}{r_1^2}\right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad I_3 = 4\pi - 2I_1 \quad (10) \\ I_{11} = \frac{\pi}{r_1^2} - \frac{3}{4(r_3^2 - r_1^2)} \left(I_1 - \frac{4\pi}{3}\right) \quad I_{13} = \frac{1}{r_3^2 - r_1^2} \left(I_1 - \frac{4\pi}{3}\right) \quad I_{12} = \frac{1}{3} I_{11} \quad I_{33} = \frac{4\pi}{3r_3^2} - \frac{8\pi}{3r_1^2} + \frac{8}{3} I_{11} \end{aligned}$$

Полагая $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22}$, найдем деформации ε_{ij}^T :

$$\varepsilon_{11}^T = \varepsilon_{22}^T = \frac{(D_3 + 2\mu_m)B_1 - B_3D_3}{2\mu_m(3D_3 + 4\mu_m)}, \quad \varepsilon_{33}^T = \frac{2(D_1 + \mu_m)B_3 - 2B_1D_1}{2\mu_m(3D_3 + 4\mu_m)}, \quad (11)$$

где

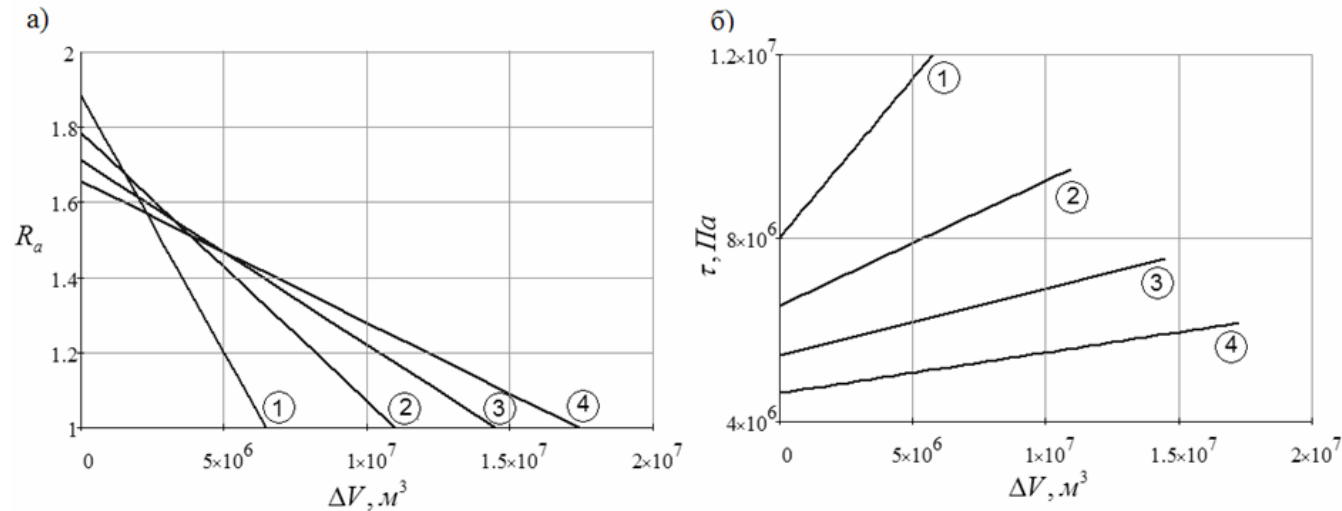
$$\begin{aligned} D_1 = [\lambda_I - \lambda_m + \alpha^2 M + 2(\mu_I - \mu_m)](S_{1111} + S_{1122} + S_{3311}) + \lambda_m, \\ D_3 = [\lambda_I - \lambda_m + \alpha^2 M + 2(\mu_I - \mu_m)](2S_{1133} + S_{3333}) + \lambda_m, \\ B_1 = [\lambda_m - \lambda_I - \alpha^2 M + 2(\mu_m - \mu_I)]\varepsilon_{11}^0 + \alpha M \zeta, \quad B_3 = [\lambda_m - \lambda_I - \alpha^2 M + 2(\mu_m - \mu_I)]\varepsilon_{33}^0 + \alpha M \zeta. \end{aligned} \quad (12)$$

Зависимость напряжений и пластового давления от объема извлекаемых запасов

The dependence of stress and pore pressure from the volume of recoverable oil

Задавая значения параметров $r_1 = 2000 \text{ м}$, $\nu_m = 0.28$, $\mu_m = 9 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $\nu_l = 0.23$, $\mu_l = 3 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $\phi = 0.2$, выполним расчет для нескольких вариантов эллипсоидального пласта-коллектора с различными отношениями характерных размеров: $r_3/r_1 = 0.0625$, $r_3/r_1 = 0.125$, $r_3/r_1 = 0.1875$, $r_3/r_1 = 0.25$.

Пусть коллектор располагается в упругом полупространстве с плотностью $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$ на глубине $h = 3000 \text{ м}$ и распределение начальных деформаций $\varepsilon_{11}^0 = \varepsilon_{22}^0$, ε_{33}^0 соответствует отношению $R = \frac{\sigma_{11}^0}{\sigma_{33}^0} = 0.81$, где напряжения σ_{11}^0 и σ_{33}^0 обозначают горизонтальное сжатие и вертикальное литостатическое давление соответственно.



Зависимость коэффициента аномальности пластового давления $R_a = p / p_h$ (а) и максимального касательного напряжения τ (б) от извлеченного объема флюида ΔV для эллипсоидального коллектора с различными отношениями характерных размеров: $r_3/r_1 = 0.0625$ (кривая 1), $r_3/r_1 = 0.125$ (кривая 2), $r_3/r_1 = 0.1875$ (кривая 3), $r_3/r_1 = 0.25$ (кривая 4)

- Решена задача о напряженном состоянии флюидонасыщенного включения в предварительно напряженной упругой среде.
The problem of the stress state in the saturated inclusion in the pre-stressed elastic medium has been solved.
- Выполнен анализ пластового давления в зависимости от напряженного состояния и объема извлекаемых запасов.
Analysis of reservoir pressure, depending on the stress state and volume of recoverable oil has been executed.
- Отношение пластового давления к гидростатическому зависит от извлеченного объема флюида.
The ratio of reservoir pressure to hydrostatic pressure depends on the extracted fluid volume.
- Скорость уменьшения давления зависит от соотношения характерных размеров пласта-коллектора.
The rate of pressure reduction depends on the ratio of characteristic dimensions of the reservoir.
- Сдвиговые напряжения в коллекторе увеличиваются в процессе разработки, что может вызвать разрушение добычных скважин.
Shear stress in the reservoir grows in the process of oil production, which can cause destruction of the wells.

Благодарю за внимание!

Thank you for attention!