

УДК 539.375.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОРОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ИСКУССТВЕННОГО МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ПРОВЕДЕНИЯ ГРП

© 2022 г. В. А. Начев^{1*}, Е. М. Гребенщикова²¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия*E-mail: nachev@phystech.edu

В данной работе проводится подготовка и верификация численной модели пороупругопластического поведения искусственного материала, используемого для лабораторного моделирования гидроразрыва пласта. Разработанная численная модель согласуется с результатами лабораторных экспериментов по ГРП, проведенных ранее в ИДГ РАН. Численное моделирование выполняется для определения раскрытия и формы трещины ГРП в пороупругопластических искусственных материалах. Для этого в работе учитываются фильтрационно-емкостные и упругопластические свойства исследуемой среды. Описана математическая модель, состоящая из системы определяющих уравнений и критерия разрушения, начальных и граничных условий, представлены результаты численного моделирования с использованием метода конечных элементов. Трехмерная численная пороупругопластическая модель горной породы была построена на основании геометрии образца. В результате проведенного численного моделирования были получены распределения эквивалентных пластических деформаций, поля изменения порового давления и напряжений, и определены раскрытие, форма и скорости распространения трещин ГРП в процессе их роста для пороупругой и пороупругопластической моделей.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта, раскрытие трещины, поровое давление, рост трещины, пластичность.

Для цитирования: Начев В.А., Гребенщикова Е.М. Численное моделирование поведения пороупругопластического искусственного материала в процессе проведения ГРП // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14, № 2. С. 62–74. http://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_62

Введение

Эксперименты по проведению гидравлического разрыва пласта (ГРП), в том числе в лабораторных условиях, необходимы для построения и верификации математических моделей этого процесса, однако их проведение отличается значительной сложностью [Зенченко и др., 2019]. Для увеличения эффективности проведения лабораторных работ на первом этапе необходимо проводить численное моделирование с последующим анализом полученного результата. Увеличение количества численных экспериментов позволяет получить в короткие сроки большое количество разных вариантов возможного развития лабораторного эксперимента. На их основе можно выбрать наиболее представительные и информативные схемы экспериментов для повышения результативности лабораторных испытаний.

При исследовании разрушения геологических материалов, в частности при проведении ГРП, используется численное моделирование. Существует множество работ по физическому и математическому моделированию гидроразрыва пласта. Например, в [Sun et al., 2020] проводится моделирование ГРП на месторождении в Иране, в [Wangen, 2013] сравниваются геометрии трещины для однородной и неоднородной сред. В работах [Li et al., 2016; Gu et al., 2012; Azarov et al., 2021] представлено изучение распространения трещин в средах с естественными трещинами.

В работе [Zielonka et al., 2014] в многоцелевом конечно-элементном комплексе Abaqus FEA (Dassault

Systèmes, Франция) проводилось численное двух- и трехмерное моделирование распространения вертикальной плоской трещины, вызванной закачкой флюида, с постоянной высотой и вертикальной равномерной шириной в резервуаре призматической формы (модель Христиановича–Гиртсма–де Клерка (KGD) [Charlez, 1997; Geertsma and Klerk, 1969; Yew, 1997]) и распространение горизонтальной кругообразной плоской трещины, вызванной закачкой флюида, в цилиндрическом резервуаре (модель Penny–Shaped [Clearly, 1980; Charlez, 1997; Yew, 1997]). Полученное численное решение сравнивалось с асимптотическими аналитическими решениями для моделей KGD и Penny – Shaped. Было установлено, что численные решения, проведенные в комплексе Abaqus FEA (Dassault Systèmes, Франция), точно воспроизводят аналитические решения.

Ранее в работе [Начев, Гребенщикова, 2021] были представлены предварительные результаты, полученные при согласовании численных и лабораторных экспериментов, для этого проводилась подготовка и верификация численной модели с использованием результатов проведенных ранее лабораторных экспериментов в ИДГ РАН по исследованию распространения трещин в ходе ГРП на искусственных образцах [Зенченко и др., 2019]. Данная работа является следующим этапом по подготовке численных моделей, учитывающих закачивание флюида в образец. На текущем этапе исследуется рост трещины ГРП, ее раскрытие, форма и скорость с учетом фильтрационных утечек флюида в образец и расхода жидкости ГРП.

Методы

Математическая модель

В работе исследуется механическое поведение пороупругопластического искусственного материала при росте трещины ГРП, ее раскрытие, форма и скорость. Для этого решается задача механики сплошной среды методом конечных элементов в многоцелевом конечно-элементном комплексе Abaqus FEA (Dassault Systèmes, Франция), где искомыми величинами являются перемещения узлов конечно-элементной сетки. После расчета движения узла элемента вычисляются деформации и определяются напряжения в элементе.

При решении пороупругой задачи пористую среду можно смоделировать как изотропный, пороупругий материал, который подвергается квазистатической деформации [Zielonka et al., 2014]. Уравнение равновесия для случая, когда объемными силами пренебрегают, применяемое в комплексе Abaqus FEA (Dassault Systèmes, Франция), представлено:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, $i, j = 1, 2, 3$ для трехмерного случая, растягивающие напряжения, считаются положительными. Пороупругое соотношение, определяющее приращения малых деформаций, задается формулами (2–4):

$$\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0 = 2G\varepsilon_{ij} + \left(K - \frac{2}{3}G\right)\varepsilon_{kk} - \alpha(p - p_0)\delta_{ij} \quad (2)$$

$$2G = \frac{E}{1 + \mu} \quad (3)$$

$$3K = \frac{E}{1 - 2\mu}, \quad (4)$$

где $\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0$ – приращения компонент тензора напряжений, ε_{ij} – компоненты тензора малых деформаций,

α – коэффициент Био, G – модуль сдвига, K – объемный модуль упругости, E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона, p_0 – начальное поровое давление, p – поровое давление после приращения деформаций, δ_{ij} – символ Кронекера. Указанные соотношения рассматриваются в программном комплексе Abaqus FEA (Dassault Systèmes, Франция) в терминах эффективных напряжений Терцаги σ'_{ij} , определенных для полностью насыщенных сред [Abaqus, 2014; Charlez, 1997]:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + p\delta_{ij} \quad (5)$$

Преобразуем (2):

$$\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^0 = 2G\varepsilon_{ij} + (K - \frac{2}{3}G)\varepsilon_{kk}\delta_{ij} - (\alpha - 1)(p - p_0)\delta_{ij} \quad (6)$$

Определим эффективную деформацию ε'_{ij} как:

$$\varepsilon'_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{\alpha - 1}{3K}(p - p_0)\delta_{ij} \quad (7)$$

Определяющее соотношение упрощается до следующего:

$$\sigma'_{ij} - \sigma_{ij}^{0'} = 2G\varepsilon'_{ij} + (K - \frac{2}{3}G)\varepsilon'_{kk}\delta_{ij} \quad (8)$$

Соотношение (8) идентично определяющему соотношению для линейных упругих материалов, но выражается в терминах эффективных напряжений Терцаги σ'_{ij} и эффективных деформаций ε'_{ij} . При расчетах в комплексе Abaqus FEA (Dassault Systèmes, Франция) переводят общие напряжения и деформации в эффективные напряжения и деформации Терцаги, чтобы использовать эту эквивалентность [Abaqus, 2014].

Уравнение неразрывности для порового флюида, при условии малых объемных деформаций, задается формулой:

$$\frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial t} + \frac{\partial v_k}{\partial x_k} = 0 \quad (9)$$

где v_k – k -ая компонента вектора скорости фильтрации порового флюида, M – модуль Био, α – коэффициент Био. M и α определяются как (10) и (11) соответственно:

$$\frac{1}{M} = \frac{v_0}{K_f} + \frac{\alpha - v_0}{K_s} \quad (10)$$

$$\frac{1}{K_s} = \frac{1 - \alpha}{K}, \quad (11)$$

где K_f – объемный модуль упругости порового флюида, K_s – объемный модуль упругости скелета пористой среды, v_0 – начальная пористость. Предполагается, что поровый флюид протекает через связанную сеть пор по закону Дарси:

$$v_k = -\frac{k}{\mu_t} \frac{\partial p}{\partial x_k} = -\frac{\bar{k}}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial x_k}, \quad (12)$$

где k – проницаемость пористой среды, μ_t – вязкость жидкости, $\bar{k}$ – гидравлическая проводимость, γ – удельный вес порового флюида.

В сочетании с уравнением неразрывности получается уравнение диффузии порового флюида:

$$\frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\bar{k}}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial x_k} \right) \quad (13)$$

Соответствующим образом определяются уравнения для поропругопластического моделирования [Abaqus, 2014; Coussy, 2004].

Для описания пластических деформаций используется критерий пластичности Друкера–Прагера [Drucker, Prager, 1952]:

$$\sqrt{J_2} = A + BJ_1 \quad (14)$$

где J_2 – это второй инвариант девиаторной части тензора напряжений, J_1 – первый инвариант тензора напряжений, A и B – константы, определяемые по экспериментальным данным.

Критерий (3) может быть записан в терминах главных напряжений следующим образом:

$$\sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = A + B(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (15)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Поскольку поверхность текучести Друкера–Прагера в значительной степени соответствует аналогичной поверхности деформации по критерию прочности Кулона–Мора [Coulomb, 1776] (рис. 1), этот критерий может быть выражен в терминах когезии и угла внутреннего трения как:

$$\sqrt{J_2} = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)} + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sin \varphi}{(3 + \sin \varphi)} J_1, \quad (16)$$

где c – когезия, φ – угол внутреннего трения.

В условиях пластического поведения элемента объема эквивалентные пластические деформации $\bar{\varepsilon}^{pl}$ (PEEQ) рассчитывались согласно соотношению:

$$\bar{\varepsilon}^{pl} = \bar{\varepsilon}^{pl} |_0 + \int_0^t \dot{\bar{\varepsilon}}^{pl} dt, \quad (17)$$

где $\bar{\varepsilon}^{pl} |_0$ – начальные пластические деформации, $\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$ – скорости эквивалентных пластических деформаций.

Модель изотропного упрочнения используется для описания процессов, связанных с большими пластическими деформациями при монотонном нагружении. В качестве критерия образования трещин f используется критерий максимального главного напряжения:

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{\max} \rangle}{\sigma_{\max}^0} \right\}, \quad (18)$$

где $\sigma_{\max}^0$ – максимально допустимое главное напряжение, $\sigma_{\max}$ – текущее значение главного напряжения, $\langle \rangle$ – скобки Маколея означают, что состояние чисто сжимающего

напряжения не приводит к разрушению ($\langle \sigma_{\max} \rangle = 0$, если $\sigma_{\max} < 0$, и $\langle \sigma_{\max} \rangle = \sigma_{\max}$, если $\sigma_{\max} \geq 0$). Разрушение начинается, когда f равно единице.

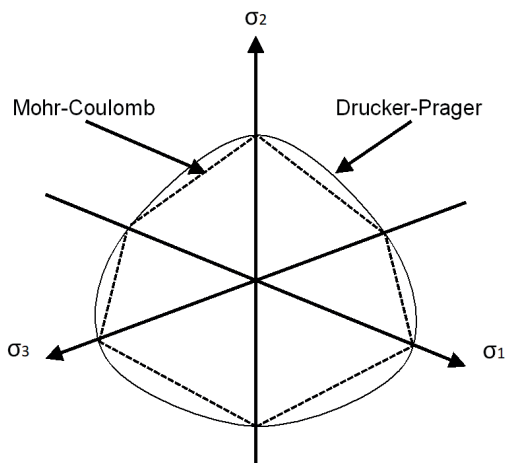


Рис. 1. Сравнение поверхностей текучести критерия Друкера–Прагера и критерия Кулона–Мора в девиаторной плоскости. Поверхность текучести Друкера–Прагера включает в себя поверхность текучести Кулона–Мора [Abaqus, 2014]

При распространении трещины поддерживается непрерывность потока жидкости, которая учитывает как тангенциальный, так и нормальный поток внутри и поперек поверхностей треснувших элементов, а также скорость относительного движения поверхностей треснувших элементов. Давление текущей среды на поверхности элементов с трещинами способствует поведению сцепляющихся сегментов в обогащенных элементах, что позволяет моделировать гидроразрыв [Abaqus, 2014; Zielonka et al., 2014] (рис. 2).

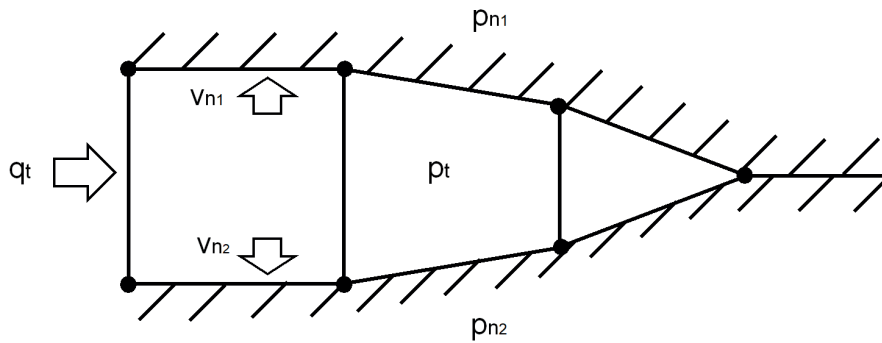


Рис. 2. Схема течения поровой жидкости в растрескавшихся элементах

Поток жидкости внутри трещины определяется теорией смазки Рейнольдса – это уравнение, определяющее распределение давления тонких пленок вязкой жидкости:

$$\dot{\omega} + \frac{\partial q_t}{\partial x} + v_{n1} + v_{n2} = 0 \quad (19)$$

Поток поровой жидкости можно представить как поток несжимаемой ньютоновской жидкости через узкие параллельные пластины (течение Пуазейля):

$$q_t = -\frac{d^3}{12\mu_t} \frac{\partial p_t}{\partial x}, \quad (20)$$

где w – ширина трещины, $q_t = v_t \cdot w$ – расход жидкости поперек трещины на единицу ширины (тангенциальный поток), v_{n1} и v_{n2} – нормальные скорости потока жидкости, протекающей через верхнюю и нижнюю границу трещины в пористую среду, μ_t – вязкость, p_t – давление жидкости гидроразрыва вдоль оси трещины. Abaqus FEA (Dassault Systèmes, Франция) вычисляет значения нормальных скоростей как:

$$v_{n1} = c_{n1} (p_t - p_{n1}) \quad (21.1)$$

$$v_{n2} = c_{n2} (p_t - p_{n2}), \quad (21.2)$$

где p_{n1} и p_{n2} – поровые давления на верхней и нижней границе пористой среды, c_{n1} и c_{n2} – коэффициенты утечки. Такая модель утечки моделирует слой фильтрата, который может накапливаться и снижать эффективную проницаемость поверхностей трещины.

Подставляя (20–21) в (20) получаем уравнение движения жидкости гидроразрыва при распространении трещины:

$$\dot{\omega} + c_{n1}(p_t - p_{n1}) + c_{n2}(p_t - p_{n2}) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{d^3}{12\mu_t} \frac{\partial p_t}{\partial x} \right) \quad (22)$$

Конечные элементы

Моделирование дискретностей (разрывов), таких как трещина, с помощью обычного метода конечных элементов требует, чтобы сетка соответствовала геометрическим разрывам. Создание соответствующей сетки может быть довольно непростым. Моделирование растущей трещины является еще более сложным, поскольку сетка должна на каждом расчетном шаге перестраиваться, чтобы соответствовать геометрии разрыва по мере развития трещины.

Расширенный метод конечных элементов (XFEM) устраняет необходимость в создании соответствующей сетки. XFEM реализован в комплексе Abaqus FEA (Dassault Systèmes, Франция) с использованием так называемого подхода «фантомного узла» [Abaqus, 2014; Remmers et al., 2008; Song et al., 2006; Sukumar, Prevost, 2003].

В XFEM вводятся дополнительные фантомные узлы со степенями свободы порового давления на краях каждого обогащенного элемента для моделирования потока жидкости внутри поверхностей треснувшего элемента в сочетании с фантомными узлами, которые накладываются на исходные реальные узлы для представления разрывов смещения и давления жидкости в треснувшем элементе. Фантомный узел на каждом краю элемента не активируется до тех пор, пока край не будет пересечен трещиной.

Постановка задачи численного моделирования

Численная модель была построена на основе лабораторного эксперимента по моделированию гидравлического разрыва пласта [Зенченко и др., 2019]. Была подготовлена упрощенная численная модель образца с механическими параметрами, соответствующими экспериментальному материалу, и приближенной к условиям эксперимента геометрией. Модель образца представляет собой полукруг с радиусом 215 мм и толщиной в один конечный элемент 3 мм (рис. 3). В модели отсутствует нагнетательная скважина, закачивание потока жидкости задано в центре образца.

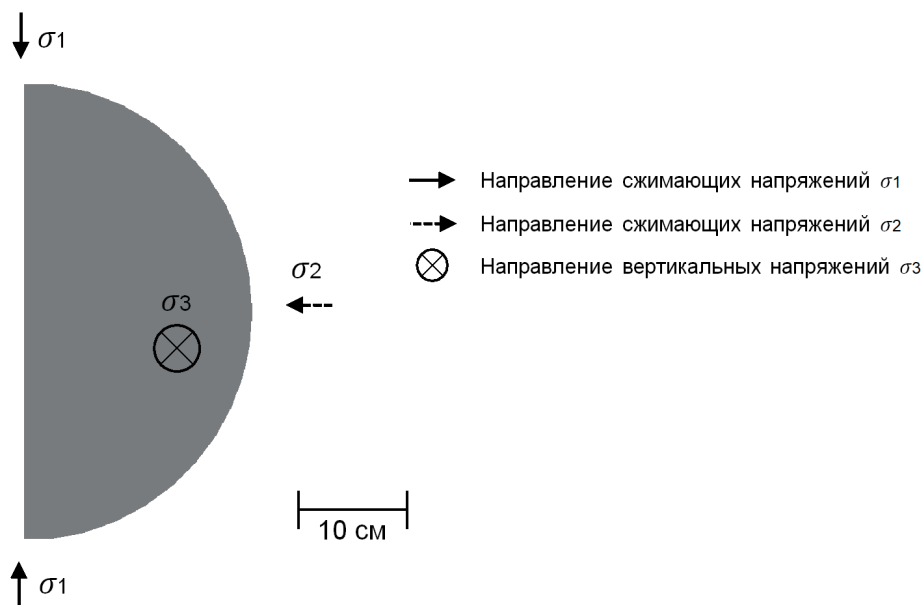


Рис. 3. Геометрия модели образца и направления приложенных сжимающих напряжений

Моделирование включает задание набора механических свойств. В Таблице 1 приведены параметры моделирования, где E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона, ϕ – угол внутреннего трения, λ – угол дилатансии, $\sigma_{\max^0}$ – критерий разрушения по напряжению, v – пористость, k – проницаемость, q_i – скорость закачки жидкости, μ_i – вязкость жидкости, $c_{n1,2}$ – коэффициенты утечек.

Таблица 1.

E , ГПа	μ	ϕ , град	λ , град	$\sigma_{\max}^0$, кПа	ν	k (10^{-15} м ²)	q_p , см ³ /с	μ_p , сП	$c_{n1,2}$, м/(с·кПа)
3	0.25	27	0.1	100	0.4	2	0.085	112	$16 \cdot 10^{-10}$

Граничные условия

В работе были заданы граничные условия, соответствующие случаю трехосного сжатия образца. Моделирование выполнялось при постоянных сжимающих напряжениях: $\sigma_1 = 0.55$ МПа, $\sigma_2 = 1$ МПа и $\sigma_3 = 6.6$ МПа (рис. 3). Начальное поровое давление в модели и на границе расчетной области образца было задано 550 кПа.

Результаты

На рис. 4, 6 и 7 представлены результаты численного моделирования распределения эквивалентных пластических деформаций, изменения порового давления и полей напряжений в пороупругопластической модели в процессе роста трещины до 5.3, 10.0, 15.3 и 20.5 мм. На рис. 5 для сравнения представлены результаты численного моделирования изменения порового давления в процессе роста трещины в пороупругой модели для тех же длин трещины.

В процессе роста трещины пластические деформации локализуются вдоль направления роста трещины и перед ее кончиком (рис. 4).

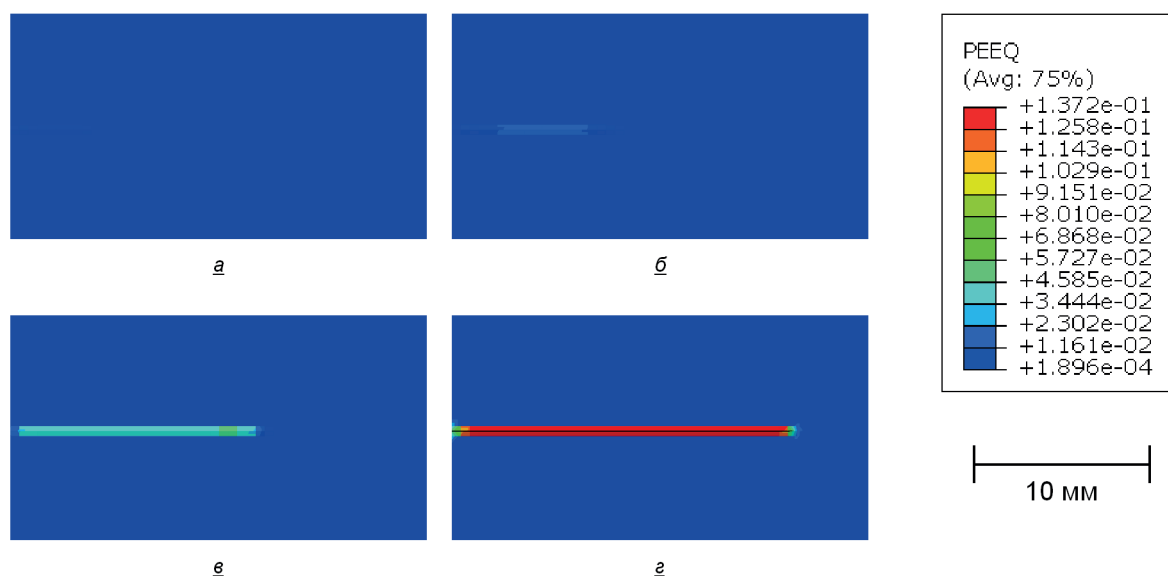


Рис. 4. Результаты численного моделирования распределения эквивалентных пластических деформаций (PEEQ) в процессе распространения трещины в пороупругой модели на разных этапах ее роста, [мм]: а – 5.3, б – 10.0, в – 15.3, г – 20.5, где PEEQ – эквивалентные пластические деформации

На рис. 5 и 6 результаты моделирования изменения порового давления представлены в одинаковом масштабе. По результатам расчетов видно, что поровое давление в процессе роста трещины в пороупругой модели выше, чем в пороупругопластической модели.

На рис. 7 представлены распределения эквивалентных напряжений по Мизесу на разных этапах формирования трещины. Можно заметить симметричные области локализации повышенных напряжений, согласующиеся с существующими теоретическими представлениями о локализации напряжений в окрестности трещины разрыва [Charlez, 1997].

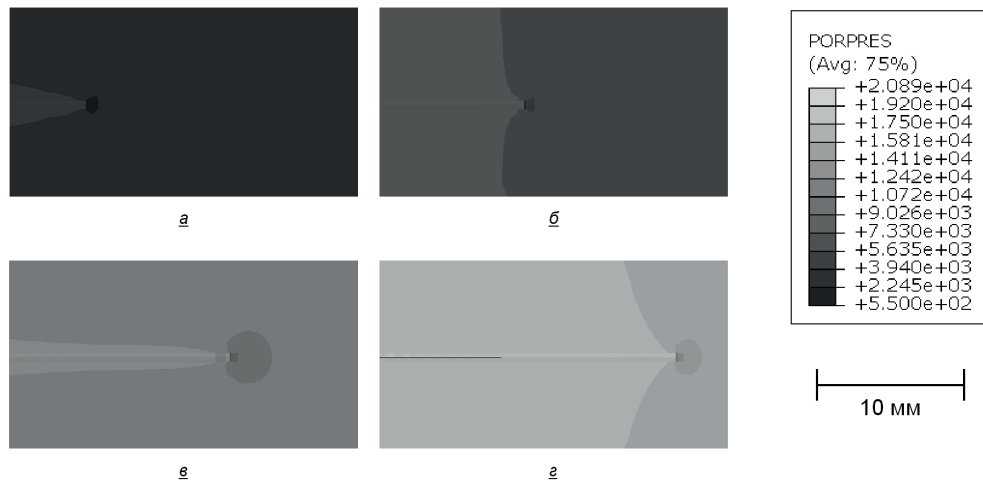


Рис. 5. Результаты численного моделирования изменения порового давления в процессе распространения трещины в пороупругой модели на разных этапах ее роста, [мм]: а – 5.3, б – 10.0, в – 15.3, г – 20.5, где PorPres – поровое давление, кПа

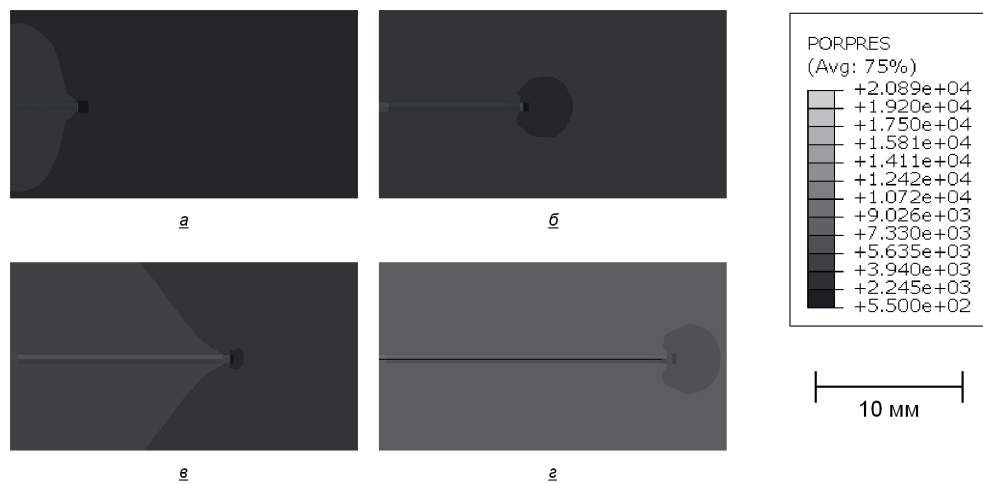


Рис. 6. Результаты численного моделирования изменения порового давления в процессе распространения трещины в пороупругопластической модели на разных этапах ее роста, [мм]: а – 5.3, б – 10.0, в – 15.3, г – 20.5, где PorPres – поровое давление, кПа

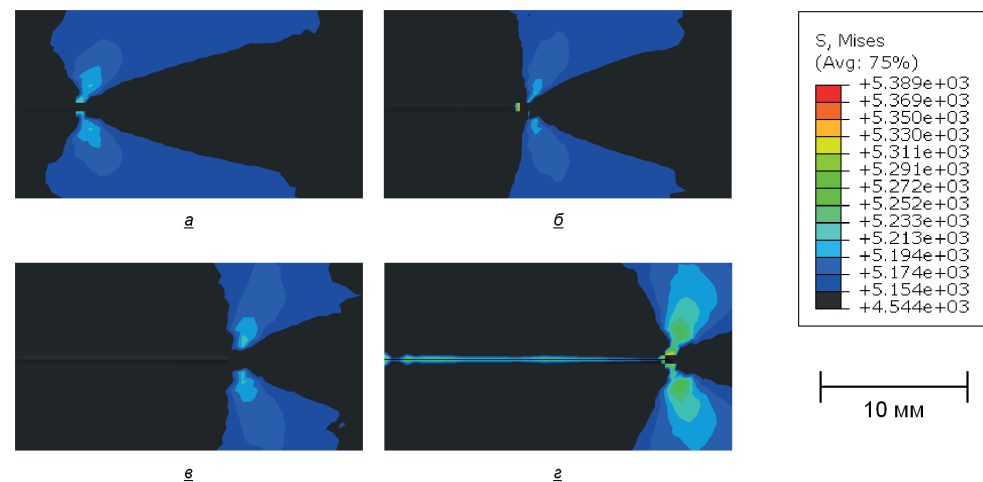


Рис. 7. Результаты численного моделирования изменения поля напряжений в процессе распространения трещины в пороупругопластической модели на разных этапах ее роста, [мм]: а – 5.3, б – 10.0, в – 15.3, г – 20.5, где S, Mises – второй инвариант тензора напряжений, кПа

На рис. 8–10 представлены результаты изменения раскрытия и формы трещины для пороупругой и пороупругопластической моделей в процессе роста трещины для разных моментов длин трещин: 2.1, 5.3, 10.0, 15.3, 20.5 мм.

По результатам расчетов видно, что на начальном этапе роста трещины раскрытие больше в пороупругопластической модели приблизительно до момента достижения ею длины 10 мм, затем раскрытие в пороупругой модели становится больше, чем в пороупругопластической.

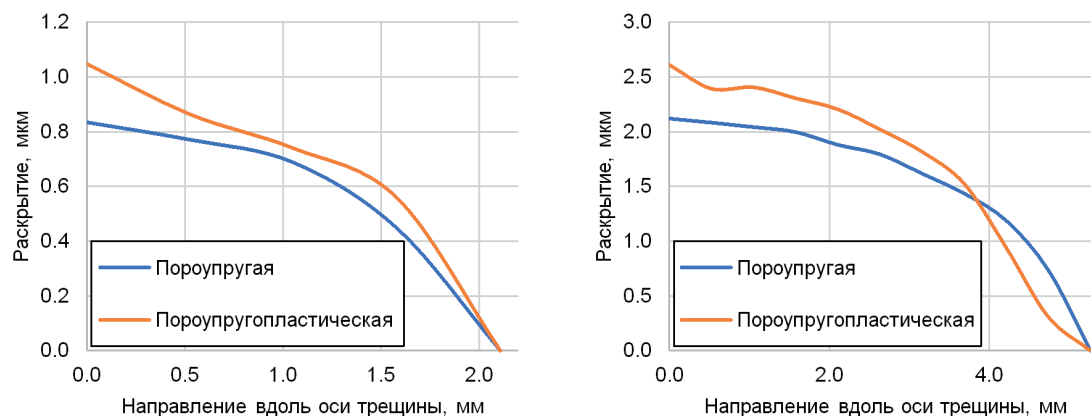


Рис. 8. Изменение раскрытия и формы трещины для пороупругой и пороупругопластической моделей на разных этапах роста трещины, [мм]: слева – 2.1, справа – 5.3

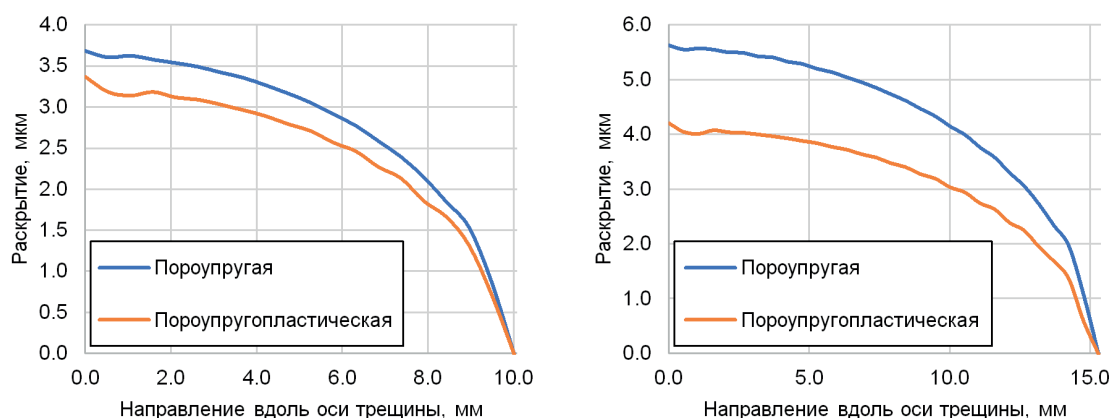


Рис. 9. Изменение раскрытия и формы трещины для пороупругой и пороупругопластической моделей на разных этапах роста трещины, [мм]: слева – 10.0, справа – 15.3

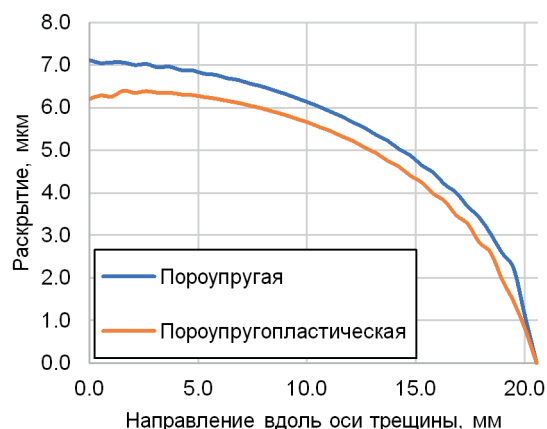


Рис. 10. Изменение раскрытия и формы трещины для пороупругой и пороупругопластической моделей для одного этапа роста трещины 20.5 мм

На рис. 11 для наглядности представлено изменение профиля трещины для поропругопластической модели на разных этапах ее роста. Увеличение раскрытия и длины происходит согласованно, с сохранением определенной степени самоподобия. Следует отметить, что результаты моделирования подтверждают наличие негладкого конца трещины (производная раскрытия по координате вдоль траектории роста трещины конечна), что согласуется с ключевыми положениями модели гидроразрыва (KGD) [Charlez, 1997; Geertsma and Klerk, 1969; Yew, 1997].

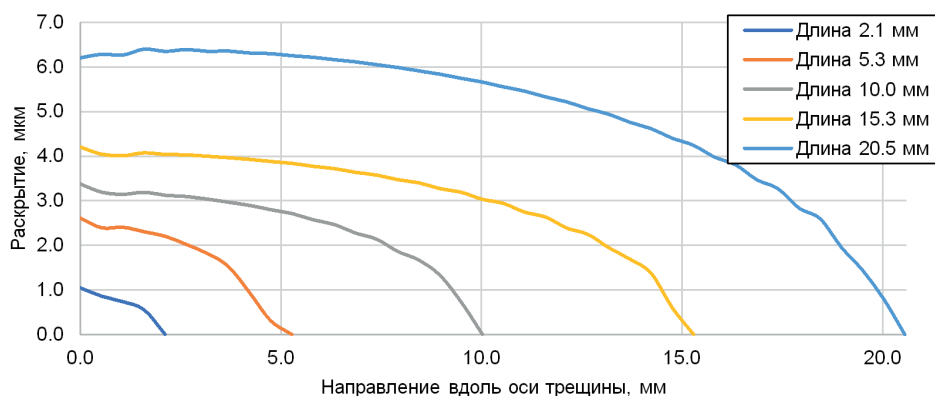


Рис. 11. Изменение раскрытия и формы трещины для поропругопластической модели на разных этапах роста трещины

В Таблице 2 приведены результаты времени роста трещины для поропругой и поропругопластической моделей. Сравнивались времена достижений моделями одинаковых длин. В результате получено, что скорость роста трещины в поропругой модели больше, чем в поропругопластической модели: для поропругой модели скорость роста составила 106 мм/мин, для поропругопластической – 49 мм/мин.

Таблица 2.

Длина трещины, мм	2.1	5.3	10.0	15.3	20.6
Время роста трещины в поропругой модели, с	1.5	3.3	5.8	8.8	11.6
Время роста трещины в поропругопластической модели, с	1.6	3.6	7.0	13.5	25.3

Заключение

В результате проведенного численного моделирования с использованием программного пакета Abaqus FEA (Dassault Systèmes, Франция) были получены распределения эквивалентных пластических деформаций, поля изменения порового давления и напряжений, раскрытие, форма и скорости роста трещин ГРП для поропругой и поропругопластической моделей. Также по результатам расчетов было обнаружено, что:

- распределение пластических деформаций возникает вдоль направления роста трещины и перед ее кончиком;
- поровое давление в процессе роста трещины в поропругой модели выше, чем в поропругопластической модели;
- на начальном этапе роста трещины раскрытие больше в поропругопластической модели приблизительно до момента достижения ею длины 10 мм, затем раскрытие в поропругой модели становится больше, чем в поропругопластической;

- скорость роста трещины в пороупругой модели выше, чем в пороупругопластической модели: для пороупругой модели скорость роста составила 106 мм/мин, для пороупругопластической – 49 мм/мин.

На следующем этапе планируется проведение численного моделирования полноразмерной пороупругопластической модели, описывающей лабораторный эксперимент с учетом этапов по нагнетанию жидкости ГРП, распространению трещины с достижением лабораторных длин и закрытием трещины. Это позволит приблизить текущую численную модель к лабораторным экспериментам, и по результатам расчетов выбрать наиболее представительные и информативные варианты развития с точки зрения лабораторного эксперимента, и, следовательно, проводить существенно меньшее количество лабораторных экспериментов без потери информативности.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122032900167-1).

Список литературы

- Зенченко, Е.В., Тримонова, М.А., Турунтаев, С.Б. Лабораторное моделирование гидроразрыва пласта и сопутствующих процессов // Нефтяное хозяйство. 2019. (10). С. 68–71.
- Начев В.А., Гребенищикова Е.М. Построение численной модели пороупругопластического искусственного материала в процессе проведения ГРП // Динамические процессы в геосферах, вып. 13: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М. : Графитекс. 2021. С. 63–73.
- Abaqus V. Documentation. Dassault Systemes Simulia Corporation. 2014. 6.14. 651: 6.2.
- Azarov A., Patutin A. and Serdyukov S. Hydraulic fracture propagation near the cavity in a poroelastic media // Applied Sciences (Switzerland). 2021. 11(22).
<https://doi.org/10.3390/app112211004>
- Charlez P.A. Rock Mechanics. (1997). Vol. 2, Petroleum Applications. Editions Technip, Paris.
- Clearly M.P. (1980). Comprehensive Design Formulae for Hydraulic Fracturing. Society of Petroleum Engineers SPE-9259-MS.
<https://doi.org/10.2118/9259-MS>
- Coussy O. (2004). Poromechanics. John Wiley & Sons.
<https://doi.org/10.1002/0470092718>
- Coulomb C.A. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture // Mem. Acad. Roy. Div. Sav. 1776. Vol. 7. P. 343–387.
- Drucker D.C., Prager W. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design // Quarterly of Applied Mathematics. 1952. 10 (2): 157–165.
- Geertsma J., de Klerk F. (1969). A Rapid Method Of Predicting Width and Extent of Hydraulically Induced Fractures. Society of Petroleum Engineers SPE 2458.
<https://doi.org/10.2118/2458-PA>
- Gu H., Weng X., Lund J., MacK M., Ganguly U., Suarez-Rivera R. (2012). Hydraulic fracture crossing natural fracture at nonorthogonal angles: A criterion and its validation. SPE Production and Operations. Vol. 27(1), P. 20–26.
<https://doi.org/10.2118/139984-PA>
- Li S., Zhang D., Li X. (2016). A new approach to the modeling of hydraulic fracturing treatments in naturally fractured reservoirs. Society of Petroleum Engineers – SPE Asia Pacific Hydraulic Fracturing Conference.
<https://doi.org/10.2118/181828-PA>
- Remmers J.J. C., de Borst R., Needleman A. The Simulation of Dynamic Crack Propagation using the Cohesive Segments Method // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2008. Vol. 56. P. 70–92.
<https://doi.org/10.1016/j.jmps.2007.08.003>

Song J.H., Areias P.M.A., Belytschko T.A. A Method for Dynamic Crack and Shear Band Propagation with Phantom Nodes // *Int J. Numer. Methods Eng.* 2006. Vol. 67. P. 868–893.

<https://doi.org/10.1002/nme.1652>

Sukumar N., Prevost J.H. Modeling Quasi-Static Crack Growth with the Extended Finite Element Method Part I: Computer Implementation // *International Journal for Solids and Structures*. 2003. Vol. 40. P. 7513–7537.

<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2003.08.002>

Sun S., Zhou M., Lu W., Davarpanah A. Application of symmetry law in numerical modeling of hydraulic fracturing by finite element method // *Symmetry*. 2020. Vol. 12(7). P. 18–20.

<https://doi.org/10.3390/sym12071122>

Wangen M. Finite element modeling of hydraulic fracturing in 3D. *Computational Geosciences*. 2013. 17(4). P. 647–659.

<https://doi.org/10.1007/s10596-013-9346-2>

Yew C.H. (1997). *Mechanics of Hydraulic Fracturing*. Gulf Publishing Company, Houston, TX.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-88415-474-7.X5011-8>

Zielonka M.G., Searles K.H., Ning J. and Buechler S.R. (2014). Development and Validation of Fully-Coupled Hydraulic Fracturing Simulation Capabilities. *SIMULIA Community Conference*.

<https://doi.org/10.2118/179121-MS>

NUMERICAL MODELING OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF PORO-ELASTIC-PLASTIC ARTIFICIAL MATERIALS IN THE PROCESS OF HYDRAULIC FRACTURING

V. A. Nachev^{1*}, E. M. Grebenshchikova²

¹ *Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia*

**E-mail: nachev@phystech.edu*

This paper presents the preparation and verification of a numerical model of the porous-elastic-plastic behavior of artificial material which is used for carrying out the laboratory modeling of hydraulic fracturing (HF). The developed numerical model is consistent with the results of laboratory experiments on hydraulic fracturing conducted earlier at Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences. The numerical modeling is performed to determine the opening and shape of HF fractures in porous-elastic-plastic artificial materials. For this purpose, the filtration-capacitive and elastic-plastic properties of the studied medium are taken into account in the work. A mathematical model consisting of a system of defining equations and a failure criterion, initial and boundary conditions are described, and the results of numerical modeling using the finite element method are presented. A three-dimensional numerical porous-elastic-plastic model of the rock was constructed based on the geometry of the sample. As a result of numerical modeling, distributions of equivalent plastic deformations, fields of pore pressure and stress changes were obtained, and the opening, shape and propagation velocities of HF fractures during their growth were determined for porous-elastic and porous-elastic-plastic models.

Keywords: hydraulic fracturing, fracture opening, pore pressure, fracture propagation, plasticity.