

УДК 539.42

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ
АНИЗОТРОПНЫХ ПОРОД ВБЛИЗИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ**

В. И. Карев, Ю. Ф. Коваленко, К. Б. Устинов

*Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН,
E-mail: wikarev@ipmnet.ru, ustinov@ipmnet.ru,
просп. Вернадского, д. 101, корп. 1, 119526, г. Москва, Россия*

Представлены результаты моделирования механического поведения горных пород, включающие выбор моделей неупругого деформирования анизотропных пород, экспериментальное определение упруго-пластических свойств пород и расчет напряженно-деформированных состояний для реальных конструкций забоя скважины. Исследования проведены для условий Федоровского нефтяного месторождения. Рассмотрены случаи необсаженного ствола скважины и щелевой перфорации.

Горные породы, упруго-пластическое деформирование, геомеханическое моделирование, истинно трехосные испытания

ВЫБОР МОДЕЛИ

Все возрастающая сложность условий разработки месторождений требует развития и совершенствования технологий бурения скважин и добычи углеводородного сырья. При переходе к разработке месторождений наклонно-направленными и горизонтальными скважинами необходим учет анизотропии деформационных и прочностных свойств горных пород, слагающих продуктивные и вмещающие пласты. Вопросы устойчивости стволов скважин при бурении и эксплуатации, выбора оптимальных режимов технологических операций неизбежно приводят к необходимости предварительного геомеханического моделирования процессов деформирования и разрушения горных пород при том или ином технологическом воздействии.

Используемые модели деформирования и разрушения должны отражать основные особенности поведения горных пород, к которым следует отнести:

- влияние не только касательных, но и нормальных напряжений на переход к неупругому деформированию;
- анизотропию упругих и прочностных свойств;
- возможное наличие объемного неупругого деформирования и его нетривиальную связь с напряженным состоянием: как минимум отсутствие пропорциональности неупругой объемной деформации действующим объемным напряжениям.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-11-10325).

Для изучения вклада каждой из особенностей в процесс деформирования предложено большое количество моделей. Так, влияние нормальных напряжений на переход в неупругое состояние, характерное для горных пород, отражено в критериях Кулона–Мора и Друкера–Прагера [1–5]. Эти критерии сформулированы для изотропных сред. Однако большинство горных пород проявляют анизотропию, причем не только упругих свойств, но и свойств, отражающих переход в неупругую область и пластическое деформирование.

Для описания пластического деформирования анизотропных сред существует несколько вариантов теории пластичности [6–15], в русле как деформационной теории [11], так и теории пластического течения [7, 12]. В развитии теории пластичности анизотропных сред можно выделить направления разложения исходных полей по тензорным базисам [6, 8, 9] и подход, основанный на представлении поверхности текучести квадратичной формой достаточно общего вида в осях, связанных с осями изотропии материала [7]. Оба подхода получили дальнейшее развитие: первый — при построении аналитических и полуаналитических решений [9, 16], второй — при конечно-элементном моделировании. Различные варианты теории пластичности с успехом применяются для решения задач горной механики [17–19]. Среди существующих критериев перехода в неупругую область выделим те, которые учитывают одновременно анизотропию и влияние нормальных напряжений [20, 21].

Для оценки деформирования, сопровождающегося неупругим изменением объема, введено понятие дилатансии [22–25]. При этом тензор пластических деформаций разделяется на девиаторную и шаровую части: для первой из них применяются традиционные определяющие соотношения (чаще всего ассоциированный закон течения), для второй записывается дополнительное определяющее соотношение, носящее эмпирический характер. Здесь подразумевается отсутствие ассоциированного закона течения: ассоциативность сохраняется лишь для девиаторной части пластических деформаций. Введение ассоциативности для полных пластических деформаций, включая шаровую часть, приводит к нереалистичным результатам при моделировании механического поведения. В частности, согласно ассоциированному закону, при сжатии пород может наблюдаться слишком большое неупругое изменение объема, сопоставимое с интенсивностью пластических деформаций.

Указанные модели, характеризуя по отдельности основные особенности деформирования горных пород, образуют базис для решения задач геомеханики. Более того, на основе многих из них созданы программные коды, входящие в современные расчетные системы. Вместе с тем существует ряд трудностей использования этих моделей для решения задач геомеханики — каждая из моделей, учитывая одну или несколько особенностей механического поведения горных пород, не учитывает другие.

Таким образом, одна из задач настоящей работы состоит в адаптации и развитии моделей неупругого поведения сред применительно к задачам геомеханики с целью одновременного учета особенностей механического поведения горных пород.

КРИТЕРИЙ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Рассмотрим две альтернативные модели перехода материала в неупругое состояние, учитывающие анизотропию и зависимость критического состояния не только от касательных, но и от нормальных напряжений.

Согласно первой модели, в слоистой среде, содержащей поверхности ослабления, существуют два конкурирующих механизма для такого перехода — по достижении критических условий в плоскостях ослабления, обладающих более низкими прочностными характеристиками, чем среда в целом, и по достижении критических условий в плоскостях, где действуют напряжения, комбинация которых превышает предел прочности среды в целом.

Для системы плоскостей ослабления используется критерий кулоновского типа [1–4], при котором критическое сдвигающее напряжение возрастает с увеличением нормального давления. В системе координат, связанной с главными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (сжимающие напряжения считаются положительными), критерий выражается как

$$\sqrt{\sigma_1^2 n_1^2 + \sigma_2^2 n_2^2 + \sigma_3^2 n_3^2 - (\sigma_1 n_1^2 + \sigma_2 n_2^2 + \sigma_3 n_3^2)^2} = \tau_c - (\sigma_1 n_1^2 + \sigma_2 n_2^2 + \sigma_3 n_3^2) \operatorname{tg} \rho_c. \quad (1)$$

Здесь $\tau_c, \rho_c, n_1, n_2, n_3$ — коэффициент сцепления, угол внутреннего трения на плоскостях ослабления и направляющие косинусы нормали к плоскостям ослабления.

В качестве критерия, описывающего реализацию конкурирующего механизма, можно также использовать критерий Кулона–Мора, только с коэффициентом сцепления и углом внутреннего трения, характеризующими среду в целом, либо критерий Друкера–Прагера [5]:

$$\frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} - B(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - A = 0, \quad (2)$$

где A, B — параметры, аналогичные коэффициенту сцепления и углу внутреннего трения среды; первый имеет размерность напряжения, второй — безразмерный.

Согласно второй (в большей степени феноменологической) модели, критерий перехода в неупругое состояние [20] имеет вид

$$F = \sqrt{G_{(23)}^0 (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G_{(13)}^0 (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + G_{(12)}^0 (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L_{(23)}^0 \sigma_{23}^2 + 2L_{(13)}^0 \sigma_{31}^2 + 2L_{(12)}^0 \sigma_{12}^2} - (B_{(1)}^0 \sigma_{11} + B_{(2)}^0 \sigma_{22} + B_{(3)}^0 \sigma_{33}) - 1 = 0. \quad (3)$$

Здесь σ_{ij} — компоненты тензора напряжений в системе координат, связанной с осями изотропии материала (предполагаемо имеющего как минимум три взаимно перпендикулярные оси симметрии четвертого порядка); $G_{(ij)}^0, L_{(ij)}^0, B_{(ij)}^0$ — константы материала. Данные константы можно выразить через пределы прочности (в рассматриваемом случае — напряжения перехода в неупругое состояние) при сжатии и растяжении вдоль соответствующих осей σ_i^C, σ_i^T и при сдвиге σ_{ij}^S [20, 7]. Однако их удобнее определять из других опытов, например на неравнокомпонентное сжатие на образцах, вырезанных под различными углами к осям ортотропии материала.

Для трансверсально изотропной среды с плоскостью изотропии, ориентированной перпендикулярно оси координат x_3 , количество параметров в (3) сокращается до пяти за счет выполнения условий:

$$G_{(13)}^0 = G_{(23)}^0, \quad L_{(13)}^0 = L_{(23)}^0, \quad L_{(12)}^0 = G_{(13)}^0 + 2G_{(12)}^0, \quad B_{(1)}^0 = B_{(2)}^0. \quad (4)$$

При отсутствии зависимости критического напряжения от нормального давления критерий (3) переходит в критерий пластичности Хилла для ортотропных материалов [7, 26, 27]. С другой стороны, для изотропного тела, т. е. при выполнении условий

$$G_{(13)}^0 = G_{(23)}^0 = G_{(12)}^0 = G, \quad L_{(13)}^0 = L_{(23)}^0 = L_{(12)}^0 = 3G, \quad B_{(1)}^0 = B_{(2)}^0 = B_{(3)}^0 = B/3, \quad (5)$$

критерий (3) переходит в критерий Друкера–Прагера [5]. Для некоторых слоистых пород пределы прочности вдоль и по нормали к слоистости совпадают либо различаются незначительно [28], что приводит к дополнительным равенствам $G_{(13)}^0 = G_{(23)}^0 = G_{(12)}^0, L_{(13)}^0 = L_{(23)}^0, L_{(13)}^0 = 3G_{(12)}^0, B_{(1)}^0 = B_{(2)}^0 = B_{(3)}^0$.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОРОД ПО ДОСТИЖЕНИИ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Развитие теории пластического течения для учета специфических явлений, присущих горным породам, представлено в [5, 8, 9, 12–15, 25, 29–31]. Рассмотрим вариант описания деформирования горных пород с применением теории пластического течения. В рамках теории малых деформаций полную деформацию ε_{ij}^T можно разделить на упругую ε_{ij}^E и неупругую (пластическую) ε_{ij}^P составляющие:

$$\varepsilon_{ij}^T = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) = \varepsilon_{ij}^E + \varepsilon_{ij}^P, \quad (6)$$

где u_i — компоненты вектора смещения; ε_{ij}^E связана с тензором напряжений обобщенным законом Гука. В случае анизотропной среды, характеризуемой тензором упругости Λ_{ijkl} ,

$$\sigma_{ij} = \Lambda_{ijkl} \varepsilon_{lk}^E. \quad (7)$$

Приращение пластических деформаций при активном нагружении определяется законом пластического течения, т. е. пропорциональности приращений (“скоростей”) пластических деформаций производным по действующим напряжениям от некоторой функции Q , называемой пластическим потенциалом:

$$d\varepsilon_{ij}^P = d\lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}}. \quad (8)$$

В классическом варианте теории он принимается равным функции для поверхности текучести, совпадающей в момент перехода в пластичность с критерием текучести и изменяющейся в процессе активного нагружения так, что в пространстве напряжений текущее состояние всегда соответствует точке, лежащей на этой поверхности [26, 27]. Коэффициент пропорциональности $d\lambda$ находится по закону упрочнения. Закон (8) считается ассоциированным, поскольку он соотносится с функцией пластичности. Однако для горных пород применение ассоциированного закона для полного тензора пластических деформаций приводит к существенному расхождению с наблюдаемыми явлениями, ассоциативность наблюдается лишь для девиаторной части. Одним из традиционных путей разрешения данной проблемы является использование неассоциированного закона течения [25]. Для рассматриваемого анизотропного случая в качестве поверхности текучести принято обобщение критерия перехода в неупругое состояние (3):

$$F = \sqrt{G_{(23)}^0(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G_{(13)}^0(\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + G_{(12)}^0(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L_{(23)}^0\sigma_{23}^2 + 2L_{(13)}^0\sigma_{31}^2 + 2L_{(12)}^0\sigma_{12}^2} - (B_{(1)}^0\sigma_{11} + B_{(2)}^0\sigma_{22} + B_{(3)}^0\sigma_{33}) - A(k), \quad (9)$$

где введена безразмерная функция $A(k)$, характеризующая упрочнение и изменяемая в процессе неупругого деформирования, $A(0) = 1$. Форма пластического потенциала может быть выбрана аналогичной поверхности текучести (9):

$$Q = \sqrt{G_{(23)}^0(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G_{(13)}^0(\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + G_{(12)}^0(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L_{(23)}^0\sigma_{23}^2 + 2L_{(13)}^0\sigma_{31}^2 + 2L_{(12)}^0\sigma_{12}^2} - (B_{(1)}^1\sigma_{11} + B_{(2)}^1\sigma_{22} + B_{(3)}^1\sigma_{33}), \quad (10)$$

однако значения входящих констант должны обеспечить реалистичное соотношение неупругих объемных и сдвиговых деформаций. Здесь также опущена несущественная функция $A(k)$, исчезающая при взятии частных производных. В случае отсутствия неупругих объемных деформаций или, если в силу их малости ими можно пренебречь, возникает ограничение

$$B_{(1)}^1 = B_{(2)}^1 = B_{(3)}^1 = 0. \quad (11)$$

Для обеспечения “девиаторной ассоциативности” необходимо при этом положить

$$B_{(i)}^1 = B_{(i)}^0 - B_0, \quad B_0 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 B_{(j)}^0. \quad (12)$$

В качестве параметра k принимают величину работы пластической деформации

$$dk = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p. \quad (13)$$

Выражение для $d\lambda$ определяется из условия нахождения актуальной точки в пространстве напряжений на поверхности текучести при активном нагружении [26, 27]:

$$d\lambda = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} / H_p, \quad (14)$$

где

$$H_p \equiv \frac{\partial F}{\partial k} Q \quad (15)$$

— характеристика материала, полученная из эксперимента (например, на одноосное сжатие с постоянным боковым поджатием) — отношение между эквивалентным напряжением (правая часть выражения (10)) и соответствующей ему пластической деформацией [26, 27]; в первом приближении она может быть принята постоянной.

Таким образом, для заданных F , Q , H_p имеем систему дифференциальных уравнений (8), (11), (12). Вместе с уравнениями равновесия

$$\sigma_{ij,i} = 0 \quad (16)$$

и граничными условиями они составляют замкнутую систему. Рассмотренное описание является достаточно общим, не привязанным к конкретному виду пластической функции F и пластического потенциала Q , и отличается от классического закона пластического течения Прандтля–Рейса [26, 27] лишь видом функций F и Q . Очевидно, что оно справедливо и для упруго-изотропных пород.

Если при построении расчетной схемы предположить, что пластическая функция F изменяется в соответствии с пластическим потенциалом Q и не зависит (или слабо зависит) от объемных напряжений, закон течения станет ассоциативным. Однако при этом будут введены две функции пластичности: одна — для первого перехода в пластическое состояние, другая — для описания развивающейся пластичности. Введения дополнительных параметров модели не требуется, поскольку из условия нахождения точки в пространстве напряжений при первичном переходе в пластичность на обеих поверхностях следует связь констант:

$$G_{(ij)}^{(2)} = \frac{G_{(ij)}^0}{(1 + B_0 \sigma_0)^2}, \quad L_{(ij)}^{(2)} = \frac{L_{(ij)}^0}{(1 + B_0 \sigma_0)^2}, \quad B_{(i)}^{(2)} = \frac{B_{(i)}^0 - B_0}{1 + B_0 \sigma_0}. \quad (17)$$

Здесь постоянные с верхним индексом 2 относятся к модифицированным функциям F и Q . Остальные формулы остаются неизменными. К таким модифицированным соотношениям [32] приводит учет влияния на предел текучести гидростатического напряжения как параметра. Рассмотрение первого инварианта как параметра в выражении для потенциала предлагалось еще в работах [10, 12]. Отличие состоит в том, какое гидростатическое давление вводить в выражения для F и Q : текущее либо соответствующее моменту перехода в пластичность. Второй способ представляется более предпочтительным с точки зрения численной реализации для изменения напряженного состояния, близкого к пропорциональному виду относительной простоты, однако едва ли будет адекватным для сложных программ нагружения, содержащих участки разгрузки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ ПОРОД

Опыты проводились на испытательной системе трехосного независимого нагружения, созданной в Институте проблем механики РАН, позволяющей испытывать образцы кубической формы по истинно трехосным независимым программам нагружения. Примененная в конструкции нагружающего узла оригинальная кинематическая схема дает возможность задавать произвольные программы нагружения независимо по каждой из трех осей как в усилиях, так и в смещениях [33]. Использовались образцы породы кубической формы с ребром 40 мм, испытанные по двум типам программ нагружения [34].

Для первой программы образцы вырезались из керна таким образом, что их горизонтальные грани совпадали с плоскостью напластования. Испытания каждого образца включали три цикла. В начале каждого цикла образцы равномерно обжимались по всем граням до напряжений, составляющих соответственно 2, 10, 20 МПа. Во втором цикле напряжения на боковых гранях поддерживались на достигнутом уровне, а на горизонтальных гранях постепенно увеличивались вплоть до появления признаков разрушения образца. Затем проводилась разгрузка образца до исходного значения равномерного обжатия и осуществлялся переход к следующему циклу путем увеличения всестороннего обжима образца до более высокого значения. Описанная программа представлена на рис. 1а. В процессе испытаний выполнялись измерение и запись напряжений и деформаций по трем осям.

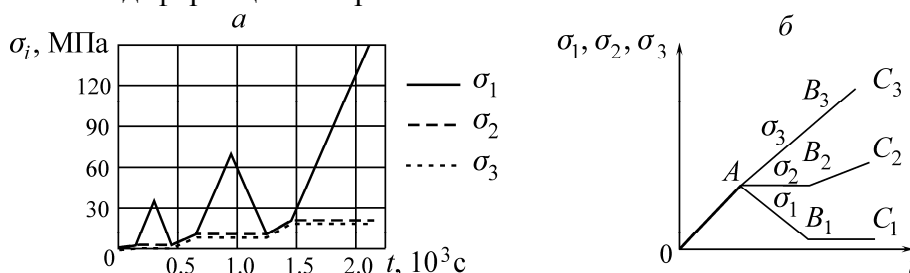


Рис. 1. Программы нагружения: а — одноосное сжатие при разных уровнях бокового обжатия; б — неравнокомпонентное нагружение

Вторая программа нагружения образцов (рис. 1б) соответствовала изменению напряжений на контуре горизонтальной скважины, пробуренной в продуктивном пласте Федоровского нефтяного месторождения (Ханты-Мансийский автономный округ), при понижении давления на ее забое [31]. На участках $B_i C_i$ программы одно из главных напряжений σ_1 оставалось постоянным на уровне $\sigma_1 = 1$ МПа, а два других росли с сохранением равенства $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$.

Для создания различных комбинаций напряжений на плоскостях ослабления образцы вырезались под разными углами к напластованию (рис. 2). Под углом φ подразумевается угол, который ось x_3 образца образует с плоскостью напластования. Тогда

$$n_1 = \cos \varphi, \quad n_2 = 0, \quad n_3 = \sin \varphi. \quad (18)$$

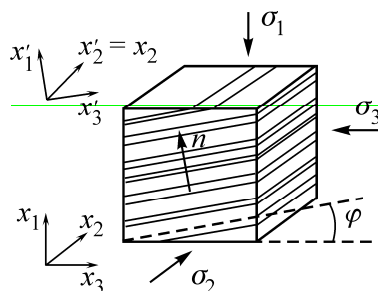


Рис. 2. Схематическое изображение напряжений, действующих на контуре горизонтальной скважины в слоистой горной породе

Зависимость разрушающего напряжения от величины бокового обжатия для первого типа нагружения представлена на рис. 3а. Здесь точки — эксперимент, линия — расчет, совпадающий по обеим моделям. Зависимости разрушающего напряжения σ_3 от угла наклона образца к напластованию φ при испытаниях по программе второго типа приведены на рис. 3б. Здесь 1 — эксперимент, 2 — расчет по модели Друкера–Прагера, 3 — разрушение по площадкам ослабления, 4 — расчет по комбинированному критерию, 5 — расчет по модифицированному критерию Хилла.

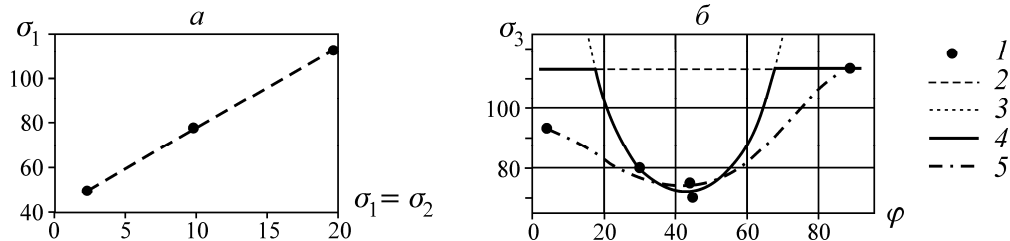


Рис. 3. Зависимости разрушающих напряжений: а — σ_1 от различных уровней бокового обжатия; б — σ_3 от угла наклона образца к напластованию φ при испытаниях по программе второго типа

Параметры критерия (3) определялись следующим образом. Для каждого испытания полученные напряжения перехода в пластичность, подставленные в условие (3), преобразуют его в уравнение относительно неизвестных параметров $G_{(ij)}$, $L_{(ij)}$, $B_{(i)}$. Следовательно, для определения всех параметров минимальное число опытов должно равняться числу искомых параметров, т. е. пяти, учитывая ограничения (4), накладываемые трансверсальной изотропией. С учетом неизбежных погрешностей увеличение числа опытов в совокупности с методом наименьших квадратов дает более надежный результат. Так, значения параметров $G_{(13)} = 1.08 \cdot 10^{-3}$ МПа⁻², $G_{(12)} = 1.68 \cdot 10^{-3}$ МПа⁻², $L_{(23)} = 4.25 \cdot 10^{-3}$ МПа⁻², $B_{(1)} = 2.04 \cdot 10^{-2}$ МПа⁻¹, $B_{(3)} = 2.23 \cdot 10^{-2}$ МПа⁻¹ получены с помощью метода наименьших квадратов по всей совокупности экспериментов по обеим программам нагружения (рис. 3). Напряжения, входящие в (3) и соответствующие системе координат, связанной с напластованием (штрихованной на рис. 2), рассчитывались через главные напряжения (напряжения в системе координат, связанной с осями пресса σ_1 , σ_2 , σ_3 — нештрихованной на рис. 2) по стандартным формулам тензорной алгебры.

Параметры пластического потенциала, отличающиеся от аналогичных параметров функции пластичности, отвечающие за влияние нормальных напряжений $B_{(1)}^1 = -6.6 \cdot 10^{-4}$, $B_{(3)}^1 = 1.3 \cdot 10^{-3}$, определялись из условия “девиаторной ассоциативности” и отсутствия вклада шаровой части тензора напряжений в изменение объемных пластических деформаций (12). Модуль Юнга, модуль пластичности и коэффициент Пуассона рассчитывались по программе первого типа. Их значения $E = 7.8 \cdot 10^9$ Па, $E_p = 7.6 \cdot 10^8$ Па, $\nu = 0.2$.

Для комбинированного критерия перехода в пластичность (1), (2) значения параметров подбирались аналогичным образом. Однако здесь явно учитывались области применимости каждого из условий. Так, параметры, характеризующие прочность площадок ослабления, $\tau_c = 33$ МПа, $\text{tg} \rho_c = 0.08$ подбирались минимизацией среднеквадратичного отклонения измеренных и рассчитанных, согласно (1), (18), напряжений σ_3 для образцов, вырезанных под углом к напластованию (три средние точки на рис 3б). Параметры, характеризующие прочность породы в целом, $B = 0.199$, $A = 17.6$ МПа подбирались минимизацией суммы квадратов разностей, измеренных и вычисленных по формуле (2) напряжений: σ_1 — для опытов по первой программе нагружения (рис. 3а) и σ_3 — по второй программе (для образцов, вырезанных параллельно напластованию, две крайние точки на рис. 3б).

РАСЧЕТ ЗОНЫ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Рассмотрим варианты забоя скважины: необсаженный ствол и наличие в нем вертикальных щелей. Первый вариант соответствует достаточно простой геометрии и, хотя является несколько упрощенным, позволяет получать решения, пригодные для сопоставления с аналитическими. Второй вариант соответствует более сложной ситуации.

В вычислениях использовалась стандартная итерационная схема расчета упруго-пластических деформаций согласно модифицированной анизотропной теории пластического течения Хилла с пластическим потенциалом (10) и дополнительным условием (11). Переход в пластическое состояние определялся условием пластичности (9). Расчеты проводились для полученных значений параметров нормальных напряжений на внешней границе 50 МПа и на контуре скважины 0 МПа. Изолинии интенсивности напряжения и интенсивности пластических деформаций для рассмотренных конфигураций представлены на рис. 4.

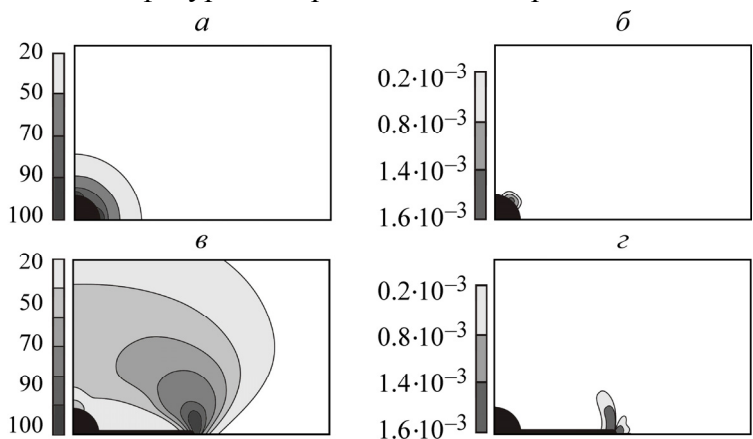


Рис. 4. Изолинии интенсивности напряжений (а) и пластических деформаций (б) для условий открытого ствола скважины и изолинии интенсивности напряжений (в) и пластических деформаций (г) для условий ствола скважины с перфорационной щелью

Прослеживается увеличение интенсивности напряжения, вызываемое наличием перфорационной щели. Для необсаженной скважины, представляющей собой цилиндрическое отверстие, влияние анизотропии пластических свойств выражается в отклонении изолиний интенсивностей напряжений и деформаций от концентрических колец. Отклонения изолиний интенсивности напряжений и пластических деформаций направлены в противоположные стороны от концентрических колец, соответствующих изотропному случаю.

На рис. 5 показаны границы областей, внутри которых выполняются критерии (1), (2) и (3), рассчитанные в рамках упругой задачи для тех же условий. Конфигурации данной области, построенные согласно обоим критериям, а также с помощью метода конечных элементов, весьма схожи.

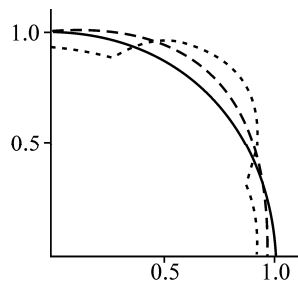


Рис. 5. Границы областей выполнения комбинированного критерия (1), (2) (пунктирная линия) и модифицированного критерия Хилла (3) (штриховая) в упругой постановке. Сплошная линия — контур скважины

ВЫВОДЫ

Описан геомеханический подход к моделированию деформационных процессов в горных породах с учетом анизотропии упруго-пластических свойств и зависимости критического состояния от касательных и нормальных напряжений. Рассмотрены три этапа моделирования: выбор модели, экспериментальное определение параметров модели и расчет напряженно-деформированного состояния для конкретных условий месторождения.

Показано развитие модели неупругого поведения горных пород исходя из основных особенностей их механического поведения при наличии прочностной анизотропии, влиянии гидростатического сжатия на процесс неупругого деформирования, отсутствии пропорциональности неупругой объемной деформации действующим объемным напряжениям.

Для пород Федоровского нефтяного месторождения получены результаты экспериментального определения механических свойств, необходимых для выполнения численного моделирования согласно представленной модели. Эксперименты проводились на установке истинного трехосного нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Coulomb C. A.** Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs, à l'architecture, Mem. Acad. Roy. Div. Sav. 1776, Vol. 7. — P. 343–387.
2. **Goodman R. E.** Introduction to rocks mechanics, New York, John Wiley and Sons, 1980. — 478 p.
3. **Barton N.** A model study of behavior of steep excavated rock slopes, PhD thesis, University of London, 1971. — 376 p.
4. **Barton N.** From empiricism, through theory, to problem solving in rock mechanics. Harmonizing rock engineering and the environment, Proceedings of the 12-th ISRM Int. Congr. on rock mechanics, Qihai Qian, Yingxin Zhou. Eds., Beijing, China, 2011. — P. 3–17.
5. **Drucker D. C., Prager W.** Soil mechanics and plastic analysis for limit design, Quart. of Appl. Math., 1952, Vol. 10, No. 2. — P. 157–165.
6. **Новожилов В. В.** О формах связи между напряжениями и деформациями в первоначально изотропных неупругих телах (геометрическая сторона вопроса) // ПММ. — 1963. — Т. 27 — № 5. — С. 794–812.
7. **Hill R.** A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, Proc. Roy. Soc., London A., 1948, 193. — P. 281–297.
8. **Чанышев А. И.** О пластичности анизотропных сред // ПМТФ. — 1984. — № 2. — С. 149–151.
9. **Чанышев А. И.** К решению задач о предельных нагрузках для жесткопластического анизотропного тела // ПМТФ. — 1984. — № 5. — С. 151–154.
10. **Ломакин Е. В.** Нелинейная деформация материалов, сопротивление которых зависит от вида напряженного состояния // Изв. АН СССР. МТТ. — 1980. — № 4. — С. 92–99.
11. **Ломакин Е. В.** Определяющие соотношения деформационной теории для дилатирующих сред // Изв. АН СССР. МТТ. — 1991. — № 6. — С. 66–75.
12. **Ломакин Е. В.** Пластическое течение дилатирующей среды в условиях плоской деформации // Изв. АН СССР. МТТ. — 2000. — № 6. — С. 58–68.
13. **Мясников В. П., Олейников А. И.** Уравнения теории упругости и условие текучести для сыпучих линейно дилатирующих сред // ФТПРПИ. — 1984. — № 6. — С. 14–19.
14. **Аннин Б. Д.** Анизотропия упругопластических свойств материалов // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. — 2011. — № 4. — С. 1353–1354.
15. **Аннин Б. Д.** Новый класс определяющих соотношений линейной анизотропной наследственной теории упругости // Композиты и наноструктуры. — 2016. — Т. 8. — № 1. — С. 1–6.

16. **Имамутдинов Д. И., Чанышев А. И.** Решение упругопластической задачи о протяженной цилиндрической выработке // ФТПРПИ. — 1988. — № 3. — С. 24–32.
17. **Курленя М. В., Миренков В. Е., Шутов В. А.** Особенности деформирования пород в окрестности выработки на больших глубинах // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 4–10.
18. **Салганик Р. Л., Мищенко А. А., Федотов А. А.** Напряженное состояние в окрестности выработки, пройденной в глубокозалегающем горизонтальном пласте // ФТПРПИ. — 2015. — № 2. — С. 24–33.
19. **Протосеня А. Г., Карасев М. А., Беляков Н. А.** Упруго-пластическая задача для выработок различных форм поперечных сечений при условии предельного равновесия Кулона // ФТПРПИ. — 2016. — № 1. — С. 71–81.
20. **Caddel R. M., Raghava E. S., Atkins A. G.** A yield criterion for anisotropic and pressure dependent solids such as oriented polymers, *J. of Materials Science*, 1973, Vol. 8. — P. 1641–1646.
21. **Deshpande V. S., Fleck N. A., Ashby M. F.** Effective properties of the octet-truss lattice material, *J. of the Mechanics and Physics of Solids*, 2001, Vol. 49. — P. 1747–1769.
22. **Reynolds O.** On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact, with experimental illustrations, *Philosophical Magazine*, 1885, Series 5, Vol. 20, No. 127. — P. 469–481.
23. **Mead W. J.** The geologic rôle of dilatancy, *Journal of Geology*, 1925, Vol. 33, No. 5. — P. 685–698.
24. **Николаевский В. Н.** О связи объемных и сдвиговых деформаций и об ударных волнах в мягких грунтах // ДАН СССР. — 1967. — Т. 177. — С. 542–543.
25. **Николаевский В. Н.** Геомеханика и флюидодинамика. — М.: Недра, 1996. — 448 с.
26. **Hill R.** The mathematical theory of plasticity, New York, Oxford University Press, 1983. — 355 p.
27. **Малинин Н. Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1975. — 400 с.
28. **Карев В. И., Климов Д. М., Коваленко Ю. Ф., Устинов К. Б.** О разрушении осадочных горных пород в условиях сложного трехосного напряженного состояния // Изв. РАН. МТТ. — 2016. — № 5. — С. 15–21.
29. **Morita N., Grary K. E.** A constitutive equation for nonlinear stress-strain curves in rock and its application to stress analysis around a borehole during drilling, In Society of Petroleum Engineers of AIME (Paper) SPE, Dallas, Tex. Soc. of Pet. Eng. of AIME, No. 9328.
30. **Стефанов Ю. П.** Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физ. мезомеханика. — 2005. — Т. 8. — № 3. — С. 129–142.
31. **Карев В. И., Коваленко Ю. Ф., Журавлев А. Б., Устинов К. Б.** Модель фильтрации в скважину с учетом зависимости проницаемости от напряжений // Процессы в геосредах. — 2015. — № 4(4). — С. 35–44.
32. **Устинов К. Б.** О применении моделей пластического течения для описания неупругого деформирования анизотропных горных пород // Процессы в геосредах. — 2016. — № 3(7). — С. 278–287.
33. **Karev V. I., Kovalenko Yu. F.** Triaxial loading system as a tool for solving geotechnical problems of oil and gas production, *True Triaxial Testing of Rocks*, Leiden, CRC Press. Balkema. — 2013. — P. 301–310.
34. **Карев В. И., Климов Д. М., Коваленко Ю. Ф., Устинов К. Б.** Модель разрушения анизотропных горных пород при сложном нагружении // Физ. мезомеханика. — 2016. — Т. 19. — № 6. — С. 34–40.

Поступила в редакцию 28/II 2017