

УДК 551.21.3

МЕТОДЫ ГЕОМЕХАНИКИ И ТЕКТОНОФИЗИКИ ПРИ РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ УСТОЙЧИВОСТИ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ

© 2018 г. А. Гараванд¹, Ю.Л. Ребецкий²

¹ *Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва, Россия*

² *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

Рассматривается классическая проблема устойчивости стенок скважин в упругой постановке. Анализируются причины, приводящие к тому, что стандартный подход к определению величины давления бурового раствора для глубинных слоев не обеспечивает устойчивости стенок. Показано, что наличие в массивах пород трещиноватости разного генезиса может привести к локальному вывалу в скважину.

Предложено при построении алгоритма расчета использовать модель среды, допускающую наличие разноориентированных трещин и дефектов прочности различного генезиса. Приведены примеры расчета устойчивости стенок скважины. На основе данных о виде тензора напряжений предложены критерии выделения не только участков стенок с трещинами сдвига, но и зон отрывных нарушений.

Ключевые слова: устойчивость скважин, прочность скалывания, кулоновы напряжения.

Введение

Проблема устойчивости стенок скважин [Алимжанов, 2008; Schmitt, Currie, Zhang, 2012] является приоритетной в технологии нефтяной добычи. Для ее решения требуется объединение геофизических технологий определения начального напряженного состояния среды (до бурения скважины) и геомеханических методов оценки влияния на формирование нового напряженного состояния цилиндрической полости (скважины), находящейся под внутренним давлением (давление бурового раствора). В данной статье речь будет идти именно о методах геомеханики, направленных на определение напряжений в окрестности скважины и установку такого уровня давления бурового раствора в ней, при котором стенки скважины остаются устойчивыми и не разрушаются. При этом авторы считают, что задача достоверного определения природного напряженного состояния по важности решения является не менее важной.

Поскольку чаще всего начальное напряженное состояние горного массива в горизонтальном направлении не является изотропным, а давление бурового раствора, создаваемое в скважине в процессе бурения, одинаково во всех направлениях, сохранить начальное напряженное состояние вокруг скважины технологически невозможно. Разница между начальным и новым напряженными состояниями может быть столь существенной, что вблизи скважины в породе возможно развитие систем хрупких макротрещин. В геомеханике считается, что такое состояние возникает при достижении предельного соотношения Кулона–Мора [Поль, 1975; Al-Ajmi, Zimmerman, 2006], после чего порода способна к формированию необратимых трещинных деформаций.

В геофизических компаниях, обеспечивающих выбор технологических параметров при проведении буровых работ на конкретном геологическом объекте, принято считать, что уровень давления бурового раствора должен обеспечивать сохранение упругого состояния повсеместно на стенках скважины (рис. 1). Поскольку стенки

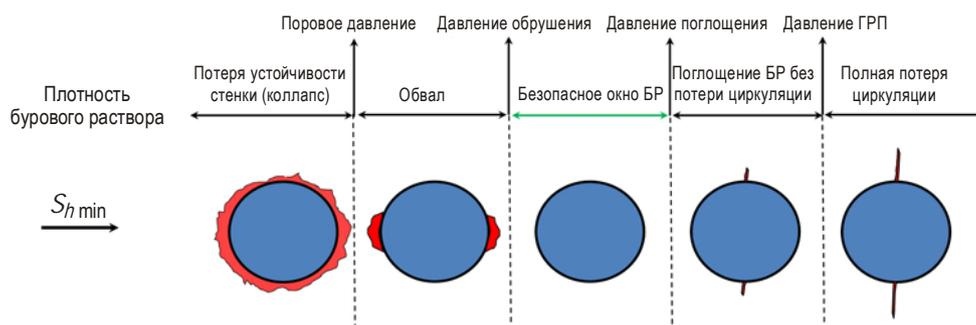


Рис. 1. Схемы структур разрушения для вертикальной скважины. $S_{h \min}$ – минимальное горизонтальное сжатие (стрелка показывает направление сжатия). Красным цветом обозначены возникающие вывалы, черными отрезками линий – трещины отрыва. Использованные сокращения: БР – буровой раствор; ГРП – гидроразрыв пласта

скважины являются первыми участками, с которых начинается развитие трещин в массиве (при условии, что начальное состояние везде упругое), то в этом случае и внутри массива всюду сохраняется чисто упругое состояние.

Эти простые и, на первый взгляд, абсолютно правильные подходы на практике не всегда дают хороший результат. Часто подобранный уровень давления бурового раствора все-таки не обеспечивает устойчивости скважины на определенной глубине [Zoback, 2007]. При этом самым опасным обрушением стенок становится приводящий к заклиниванию бура обвал по всему периметру скважины. Локальный обвал в узком диапазоне углов считается не таким опасным, но он также происходит, хотя созданное давление на стенки согласно расчетам не должно к нему приводить. Считается, что к локальному обвалу приводят неточности в оценке природных напряжений.

Авторами обсуждаются возможные причины подобных ошибок расчетов. При этом используется опыт геодинамических и тектонофизических исследований, накопленный при создании методов оценки природных напряжений [Ребецкий, 2003а], а также полученные по результатам тектонофизических реконструкции данные о природном напряженном состоянии разномасштабных геологических объектов.

Геодинамическая основа работ по обеспечению устойчивости скважин

Чтобы использовать упругие решения задачи о массиве с цилиндрической выемкой, какой является скважина, необходимо знать напряженное состояние природного массива до её создания. В горном деле существует целый ряд in-situ методов, позволяющих в рамках определенных гипотез оценить напряжения – это, в частности, методы гидроразрыва скважины, анализа деформированной формы скважины, каротажа скважины [Турчанинов, 1982].

Точность in-situ методов различна; наиболее устойчивым параметром, который определяется с их помощью, является геодинамический тип напряженного состояния. Этот параметр очень важен при построении предельных соотношений хрупкого разрушения, для чего необходимо знание направлений, в которых действуют напряжения максимального и минимального сжатия.

Существует три главных типа геодинамического режима, при которых одна из осей главных напряжений строго вертикальна: режим горизонтального растяжения (рис. 2, а), режим горизонтального сдвига (рис. 2, б) и режим горизонтального сжатия (рис. 2, в). Этим режимам напряженных состояний отвечают сколовые трещины и разрывы соответственно следующих кинематических типов – сбросы, сдвиги по простиранию, взбросы (надвиги).

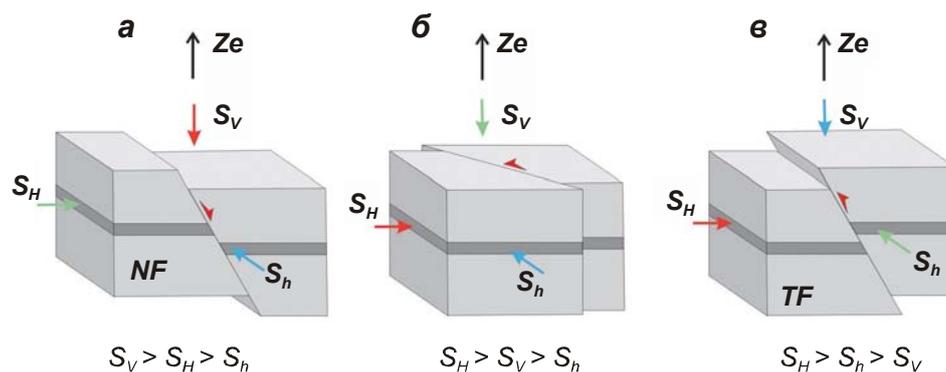


Рис. 2. Главные геодинамические режимы, при которых одна из осей главных напряжений строго вертикальна, и соответствующие им кинематические типы сколовых трещин и разрывов: *а* – режим горизонтального растяжения (*сбросы NF*); *б* – режим горизонтального сдвига (*сдвиги*); *в* – режим горизонтального сжатия (*взбросы TF*)

S_V – главное напряжение, действующее по вертикали; S_H и S_h – главные напряжения максимального и минимального сжатия в горизонтальном направлении; Ze – вектор на зенит. Цветными стрелками показано направление напряжений сжатия разной интенсивности от минимальной (синие стрелки) к промежуточной (зеленые) и максимальной (красные)

При отклонении осей главных напряжений от вертикали имеет место сочетание названных геодинамических типов напряженного состояния – горизонтальный сдвиг с растяжением, горизонтальное сжатие с растяжением и т.д. [Anderson, 1951; Ребецкий, 2007а].

Заметим, что часто используемые при наименовании геодинамического типа напряженного состояния термины “взбросовый” (вместо горизонтального сжатия) и “сбросовый” (вместо горизонтального растяжения) не являются корректными. Наличие большого числа трещин и разрывов, возникших на предыдущих этапах развития напряженного состояния, приводит к тому, что в области действия режима горизонтального сжатия или растяжения могут проявиться сдвиги по простиранию или взрезы (вертикальные сдвиги).

В настоящее время работами горных геологов и тектонофизиков установлено, что региональные морфологические особенности рельефа во многом определяют режим напряженного состояния верхних горизонтов земной коры. Существует большое число данных о напряжениях, действующих в приповерхностных слоях коры (до глубин порядка 3 км), полученных при *in-situ* измерениях (см., например, [Hast, 1969; Bjorn, 1970; Марков, 1977; Brady, Brown, 2004] и др.). Эти данные свидетельствуют, что вертикальные напряжения в среднем близки весу вышележащего столба горных пород. Горизонтальные напряжения при этом варьируют в достаточно широких пределах (рис. 3), и эти вариации тем больше, чем меньше глубина. На глубинах, превышающих 3 км, отношение среднего горизонтального напряжения к вертикальному меняется от 0.8 до 1.0. Использование подобных данных приближает проводимые теоретические исследования устойчивости скважин к реальному состоянию земных недр.

Анализ всей совокупности данных о напряжениях, полученных при *in-situ* измерениях, позволил выявить взаимосвязь геодинамического типа напряженного состояния с морфологией рельефа и характером вертикальных движений. В работах [Марков, 1977, 1980] показано, что в областях поднятий главные оси напряжений минимального сжатия (девиаторного растяжения) ориентированы преимущественно субвертикально. В областях чехла платформ и плит ось максимального сжатия ориентирована преимущественно субгоризонтально.

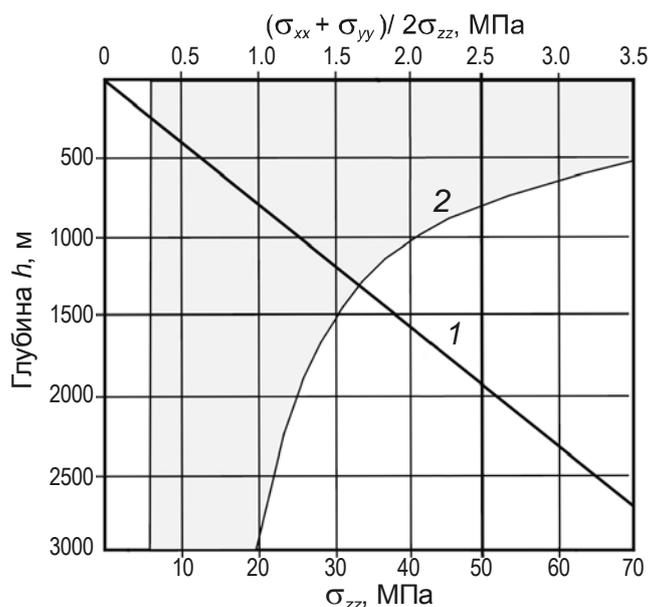


Рис. 3. Распределение по глубине значений вертикальных напряжений σ_{zz} (график 1, нижняя шкала) и отношения нормированной на вертикальное напряжение полусуммы горизонтальных напряжений σ_{xx} и σ_{yy} (график 2, верхняя шкала). По [Brady, Brown, 2004] с изменениями

Сделанный вывод был подтвержден исследованиями современного поля напряжений в коре внутриконтинентальных орогенов. В работе [Ребецкий, 2015] показано, что в коре активно развивающихся в настоящее время горных поднятий в виде хребтов наблюдаются два геодинамических типа напряженных состояний – горизонтальное сжатие, горизонтальный сдвиг (и их сочетание), которым отвечает субгоризонтальное положение оси максимального сжатия. Для коры впадин, активно развивающихся рядом с горным поднятием, также отмечаются два преимущественных геодинамических типа напряженного состояния – горизонтальное растяжение, горизонтальный сдвиг (и их сочетание). Обоим этим напряженным состояниям отвечает субгоризонтальное положение оси главного напряжения минимального сжатия.

Таким образом, для определения геодинамического типа напряженного состояния массива, в котором бурится скважина, возможно проведение “экспресс оценки”. Если бурение осуществляется в осадочном бассейне, остающемся областью, куда сносятся осадки (сюда могут быть отнесены и морские шельфы), то с большой вероятностью можно сказать, что здесь имеет место режим горизонтального растяжения. В случае, если бурение ведется у подножья или на склонах горных поднятий, имеющих вид хребтов, то в этой области велика вероятность существования горизонтального сжатия. Заметим, что согласно работе [Ребецкий, 2015] в обоих случаях возможен и горизонтальный сдвиг. При бурении на платформах и на поднятиях, имеющих вид нагорий или плато (плоская форма поднятого рельефа), равновероятны горизонтальный сдвиг и горизонтальное растяжение.

Конечно же, подобные предварительные оценки геодинамического типа напряженного состояния должны контролироваться геофизическими методами, позволяющими определять реальные параметры напряжений на разных глубинах в скважинах.

Геомеханическая основа работ по обеспечению устойчивости скважин

Для обеспечения устойчивости скважин и предупреждения возникновения хрупкого разрушения используют упругое решение, определяя тот уровень давления буровой жидкости P_w , при котором ни в одной точке на стенках скважин не будет достигнут предел текучести, например, критерий Кулона–Мора нигде не выполняется в виде равенства

$$\tau_{Cu} \leq \tau_f \text{ при } \tau_{Cu} = \tau_n + k_f(\sigma_m - P_p). \quad (1)$$

Здесь τ_{Cu} – кулоновы напряжения; τ_f – предел хрупкой прочности пород, полученный для идеально целых образцов; τ_n и σ_m – касательное и нормальное напряжения на плоскости скалывания пород; P_p – давление флюида в трещинно-поровом пространстве пород. Плоскость скалывания параллельна оси промежуточного главного напряжения и отличается от плоскости максимальных касательных напряжений на угол, равный половине угла внутреннего трения $0.5\varphi_f$ при $\operatorname{tg}\varphi_f = k_f$.

Использование критерия Кулона–Мора для прочностных параметров, полученных на целых бездефектных образцах, предопределяет необходимость рассмотрения породного массива, в котором бурится скважина, также изначально сплошным, без трещин и разрывов. Однако на практике это не так – анализ кернов Кольской сверхглубокой [Кременецкий и др., 1989] и менее глубоких скважин свидетельствует о существовании в породе множества дефектов прочности в виде трещин, некоторые из которых могут быть частично залечены.

Результаты большого числа экспериментов по разрушению кристаллических пород как на целых образцах, так и на образцах с дефектами прочности и надрезами (см., например, [Brace, 1978; Byerlee, 1978; Mogi, 1971] и др.) показывают, что отображаемые в виде точек на диаграмме Мора данные о нормальных и касательных напряжениях на плоскости трещины, разрушившей образец, формируют вытянутое по диагонали облако (рис. 4). Проведение медианной ломаной линии для полученного облака точек (линия I на рис. 4) было предложено Дж. Байерли в качестве формализации анализируемых данных [Byerlee, 1978]. Предельные соотношения типа (1) с конкретными значениями τ_f^B и k_f^B стали именоваться законом Байерли, определяющим достижение предела хрупкой прочности трещиноватых пород, – соприкосновение большого круга Мора и предельной линии закона Байерли фиксирует разрушение пород в глубине коры.

При использовании выражения (1) следует помнить, что в облаке экспериментальных точек, по которому проводилось обобщение в виде закона Байерли, присутствовали не только изначально целые (без видимых нарушений) образцы, но и образцы, в которых предварительным нагружением создавались дефекты прочности, а также образцы с заранее нанесенными надрезами. Это делалось для имитации природного состояния массива пород массива, в котором всегда существует большое число разноориентированных трещин (дефектов прочности).

Точки, ограничивающие облако на диаграмме Мора снизу (см. рис. 4), характеризуют вновь активизированные трещины с минимальными (близкими к нулю) значениями поверхностного сцепления; точки, ограничивающие облако сверху, связаны с трещинами с максимальными значениями поверхностного сцепления, которые отвечают хрупкой прочности целых образцов.

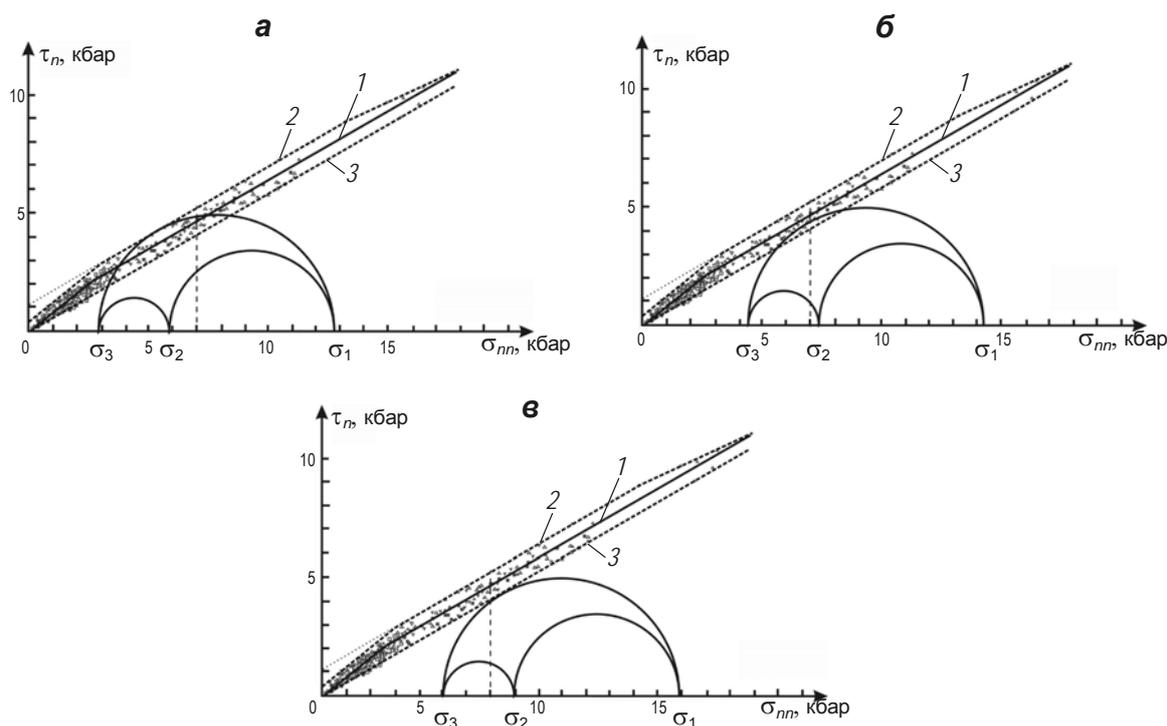


Рис. 4. Схемы стадий деформирования, сопровождаемого разной степенью активности трещин. Показана только верхняя полуплоскость диаграммы Мора. 1 – закон Байерли для кристаллических пород коры; 2 – предел прочности пород; 3 – минимальное сопротивление трения на трещинах. а – максимальная активизация трещин разной ориентации: большой круг Мора касается линии 2; б – активизация трещин определенной ориентации: большой круг Мора пересекает линию 3, но не доходит до линии 1; в – трещины не активизируются: большой круг Мора не пересекает линию 3

Из концепции закона Байерли в качестве критерия хрупкой прочности следует, что, если большой круг Мора не касается предельной линии 1 (см. рис. 4, б), то состояние упругое и разрывные деформации в среде не возникают. Можно видеть, что целый ряд экспериментальных точек попал внутрь большого круга Мора. Это означает возможность при данном напряженном состоянии активизации ранее существовавших в образце трещин, вдоль которых могут возникнуть сдвиговые смещения. Таким образом, невыполнение критерия Кулона–Мора или закона Байерли не означает, что в породах не могут активизироваться ранее существовавшие трещины. Также из данного подхода следует, что при достижении предельного состояния по Байерли (большой круг Мора касается ломанной сплошной линии) напряжений недостаточно для возникновения в массиве новых трещин, отвечающих углу скалывания горных пород (точки вблизи верхней границы облака). Все это говорит об определенной некорректности использования критерия прочности в виде закона Байерли для описания деформирования пород за счет разрывных смещений.

Заметим, что в горном деле часто вместо параметров прочности τ_f и k_f (или угла φ_f) используют прочность на одноосное сжатие UCS , которую достаточно просто получить, зная условия предельного нагружения. Этот параметр прочности связывается с предельной кулоновой прочностью соотношением

$$UCS = 2\tau_f \operatorname{tg} \left(45 + \frac{\varphi_f}{2} \right). \quad (2)$$

Для безопасного проведения буровых работ при выборе необходимой плотности бурового раствора используют возможности геомеханического анализа напряжений. Давление, создаваемое буровым раствором, способно обеспечить оптимальную прочность и устойчивость стенки скважины и к обвалу, создаваемому наличием хрупких трещин сдвига, и к формированию разрыва (трещины отрыва). Для этого применяют коридор плотности бурового раствора, нижний уровень которого отвечает минимально необходимой плотности раствора против обвала стенки скважины (удовлетворяет устойчивость стенки скважины на скалывание), а верхний – плотности раствора, препятствующей образованию открытой трещины и потери раствора в пласт. Первое состояние связано с нахождением критического значения кулоновых напряжений τ_{Cu} или прочности на одноосное сжатие UCS , а второе отвечает условию формирования трещины отрыва.

Тектонофизическая основа работ по устойчивости скважин

В работах [Ребецкий, 2003б, 2005, 2007б, 2009] показано, что результаты наблюдений по разрушению образцов горных пород, обобщенные в законе Байерли, могут быть использованы и иным образом. Предложено на диаграмме Мора выделять полосу разрушения, в которую попадают все точки напряженных состояний на плоскостях активных трещин, возникших в образцах на предыдущих этапах деформирования (см. рис. 4). При этом нижняя предельная линия характеризует напряженные состояния на поверхностях трещин с минимальной (нулевой) прочностью сцепления, верхняя – с максимальной. При таком подходе предельное состояние описывается двумя предельными соотношениями типа Кулона–Мора (1), для которых

$$0 \leq \tau_{Cu} \leq \tau_f, \quad (3)$$

где τ_f – прочность целых образцов конкретной кристаллической породы. Нетрудно заметить, что прочность целых образцов вдвое выше прочности породы по Байерли ($\tau_f = 2\tau_f^B$). Представление полосы хрупкого разрушения опирается на гипотезу о том, что верхняя и нижняя границы области предельного состояния имеют один и тот же угол наклона, определяемый одним и тем же коэффициентом трения (линии параллельны друг другу).

При выполнении левого ограничения в виде строгого неравенства ($0 < \tau_{Cu}$) большой круг Мора данного напряженного состояния пересекает нижнюю предельную границу полосы хрупкого разрушения (см. рис. 4, а, б). В этом случае в массиве возможна активизация ранее существовавших трещин сдвига, для которых имеют место низкие значения поверхностного сцепления. Выполнение правого ограничения в виде равенства ($\tau_{Cu} = \tau_f$) говорит, что в массиве происходит формирование новых трещин, ориентация плоскостей которых близка к ориентации плоскости трещин скалывания породы (см. рис. 4, а). При $0 \geq \tau_{Cu}$ в массиве не происходит активизации ранее существовавших дефектов прочности (предельный случай в виде равенства на рис. 4, в).

Далее при анализе результатов упругих решений будем выделять в заскважинном пространстве четыре типа состояний.

1. Чисто упругое состояние: большой круг Мора не достигает нижней границы полосы хрупкого разрушения (см. рис. 4, в). Верхней границе этой области на диаграмме Мора соответствует линия 3 (сопротивление сухого трения):

$$\tau_{Cu} \leq 0. \quad (4)$$

2. Состояние, при котором отдельные ранее существовавшие трещины активизируются (трещины с минимальной прочностью сцепления): большой круг Мора лишь немного пересекает нижнюю границу полосы хрупкого разрушения. Нижней границей этой области на диаграмме Мора является линия сухого трения, а верхняя определяется малой прочностью $\delta \ll \tau_f$ –

$$\delta \geq \tau_{Cu} \geq 0. \quad (5)$$

Отметим, что для этого состояния трещины имеют близкую ориентацию.

3. Состояние, отвечающее активизации большого числа трещин достаточно разнообразной ориентации: большой круг Мора касается медианной линии Байерли. Верхняя граница этой области представляет собой срединную линию полосы хрупкого разрушения, которую называют линией закона Байерли –

$$\tau_f^B \geq \tau_{Cu} \geq \delta. \quad (6)$$

4. Состояние максимально возможного диапазона разноориентированных трещин и возникновения новых трещин: большой круг Мора касается верхней границы полосы хрупкого разрушения –

$$\tau_f \geq \tau_{Cu} \geq \tau_f^B. \quad (7)$$

Отметим, что согласно принципам построения диаграммы Мора, чем дальше друг от друга расположены точки внутри кругов Мора, тем больше различается ориентация трещин, напряженные состояния которых характеризуется этими точками.

Из проведенного выше анализа вытекает следующее.

1. Когда для оценки поведения реальных горных пород в качестве критерия хрупкого разрушения используется прочность τ_f , полученная в экспериментах с бездефектными образцами (верхняя огибающая на рис. 4), это означает, что в полосе хрупкого разрушения шириной τ_f будут проявлять себя существующие в породах дефекты прочности, образуя системы разноориентированных трещин, т.е. будет иметь место активизация ранее существовавших и частично залеченных трещин.

2. При использовании в качестве предельного критерия закона Байерли (линия 1 на рис. 4) или аналогичного ему, полученного для того же типа пород, полоса хрупкого разрушения будет иметь ширину $0.5\tau_f$ и содержать в себе дефекты прочности, которые могут стать причиной образования трещин.

3. Трещины, существовавшие ранее в породном массиве, не будут активизироваться вновь только в случае, когда в качестве предельного критерия принимается условие (4).

Перейдя к континуальным критериям теории пластичности, перепишем выражение (1) в виде:

$$\tau + k_f(\sigma - P_p) \leq \tau_c \quad \text{при} \quad \sigma = 0.5(\sigma_1 + \sigma_3), \quad \tau = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (8)$$

и

$$\tau_c = \tau_f (\cos \varphi_f + k_f \sin \varphi_f)^{-1}, \quad k_c = k_f (\cos \varphi_f + k_f \sin \varphi_f)^{-1},$$

где τ_c – прочность сцепления; k_c – коэффициент трения.

Предельное соотношение (8) похоже по виду на критерий текучести, известный в теории пластичности [Поль, 1975], так как оно записано в инвариантах тензора напряжений и с использованием прочностных параметров τ_c и k_c . Используемым выше в (1) параметрам прочности $\tau_f = 5$ МПа и $k_f = 0.6$ отвечают следующие значения $\tau_c = 4.29$ МПа, $k_c = 0.515$.

Упругие решения для скважины

Авторы ряда исследований (см., например, [Fjaer et al., 1992; Charlez, 1997; Xu, 2007; Подъячев, 2015] и др.) часто используют чисто упругие решения, ограничиваясь при этом проверкой достижения предельного состояния на стенках скважин. При анализе таких решений для типичных с позиции геодинамики случаев напряженных состояний пород не всегда учитываются имеющиеся данные о природных напряжениях. Поэтому в данном разделе нами будет выполнен анализ упругих решений и оценены геодинамические типы напряженных состояний, которые могут возникнуть в заскважинном пространстве вертикальной скважины.

В настоящее время на практике при работах по обеспечению устойчивости скважин часто используют достаточно простые аналитические упругие решения, позволяющие рассчитывать такой уровень внутреннего давления бурового раствора P_w , при котором на стенках скважины не возникают структуры хрупкого разрушения; схема постановки подобной задачи представлена на рис. 5.

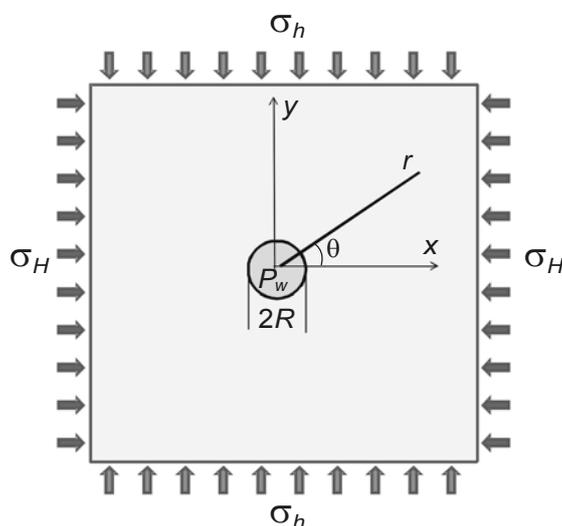


Рис. 5. Схема, используемая для расчета напряжений в окрестности вертикальной скважины

Для вертикальной скважины радиуса R решения двумерной задачи теории упругости в случае анизотропного напряженного состояния в горизонтальной плоскости имеют вид [Kirsch, 1898]:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + \frac{R^2}{r^2} P_w, \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{1}{2}(\sigma_H + \sigma_h) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \frac{R^2}{r^2} P_w, \\ \sigma_{zz} &= \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta, \\ \sigma_{r\theta} &= -\frac{1}{2}(\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta, \quad \sigma_{rz} = 0, \quad \sigma_{\theta z} = 0. \end{aligned} \tag{9}$$

где σ_H – напряжения максимального горизонтального сжатия; σ_h – напряжения минимального сжатия; θ – угол, отсчитываемый в горизонтальной плоскости против часовой стрелки от направления действия σ_H ; ν – коэффициент Пуассона.

Отметим, что в выражениях (9) для вертикальных напряжений учитывается не только литостатическое давление вышележащих пород σ_v , но и влияние девиаторных напряжений в латеральном направлении, полагая, что они возникают вследствие отсутствия на локальном участке скважины с квазипостоянным по глубине давлением бурового раствора дополнительных вертикальных упругих деформаций (вертикальное стеснение).

Согласно выражениям (9), возмущение напряженного состояния, вызванное наличием скважины, достаточно быстро затухает в заскважинном пространстве по закону $(R/r)^2$ – так, на расстоянии $10R$ дополнительные напряжения снижаются стократно. В связи с этим для изучения закономерностей развития напряжений в заскважинном пространстве достаточно выбрать область размером $3R$, на границах которой дополнительные напряжения снижаются уже почти в 10 раз.

Полагая $r=R$, из (9) находим выражения для компонент нормальных напряжений на стенках скважины ($\sigma_{r\theta} = 0$, $\sigma_{rz} = 0$, $\sigma_{\theta z} = 0$) в виде

$$\sigma_{rr} = P_w, \quad \sigma_{\theta\theta} = \sigma_H + \sigma_h - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - P_w, \quad \sigma_{zz} = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta. \quad (10)$$

Далее эти выражения будут использованы для определения предельного давления бурового раствора, обеспечивающего устойчивость стенок скважин.

Анализ напряженного состояния в скважинном пространстве

Расчеты показывают, что в заскважинном пространстве меняется не только отношение между радиальными (σ_{rr}) и тангенциальными ($\sigma_{\theta\theta}$) напряжениями, действующими в горизонтальной плоскости, но и их соотношение с вертикальным напряжением σ_{zz} . В данной постановке задачи напряжение σ_{zz} является одним из главных. Это означает, что индекс главного напряжения, действующего в вертикальном направлении, в разных частях заскважинного пространства может меняться. Такие изменения должны учитываться при записи предельных соотношений, определяющих достижение предела прочности пород. Проведем анализ соотношения между вертикальным и латеральным напряжениями и определим геодинамические типы напряженного состояния в разных зонах заскважинного пространства.

Рассчитаем напряжения в заскважинном пространстве при одинаковом давлении бурового раствора $P_w = 33$ МПа в трех разных случаях начального регионального состояния (без скважины), отвечающих режиму горизонтального растяжения, сдвига и сжатия (данные о напряжениях S_V приведены на рис. 6–8).

Обратим внимание, что на рис. 6–8 приводятся данные об эффективных нормальных напряжениях, в которых учтено влияние давления флюида в трещинно-поровом пространстве $P_p = 31$ МПа:

$$\sigma_{ii}^* = \sigma_{ii} - P_p, \quad i = r, \theta, z. \quad (11)$$

Можно видеть, что на стенках скважины изменения тангенциальных и вертикальных напряжений ведут к появлению участков разного геодинамического типа напряженного состояния только в первом варианте расчета (рис. 6, а), т.е. когда рассматривался региональный режим горизонтального растяжения. Здесь в диапазоне углов θ от -30° до 30° и от 150° до 210° (направление действия σ_H) на стенках скважины имеет

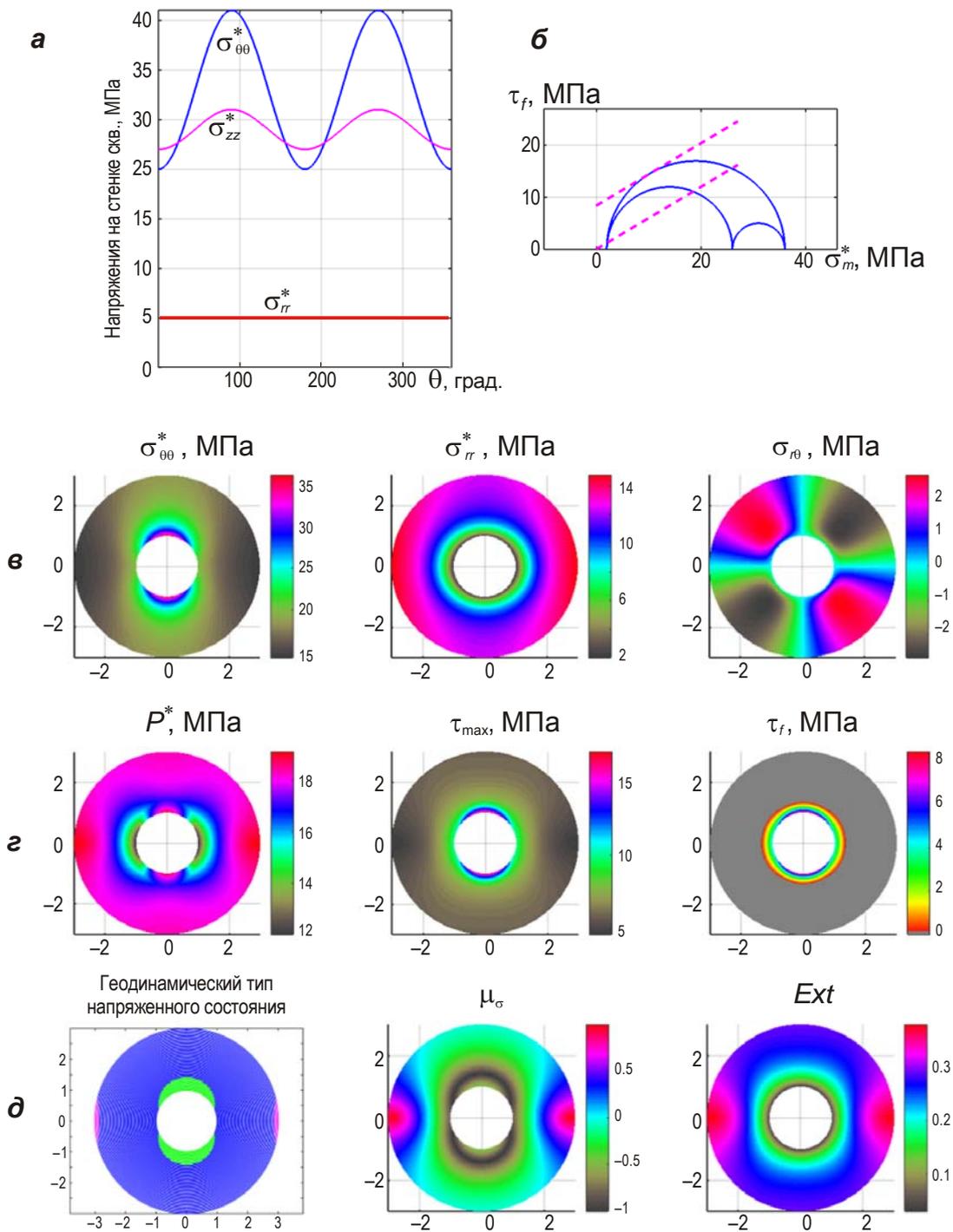


Рис. 6. Региональный режим горизонтального растяжения ($\sigma_v \geq \sigma_H \geq \sigma_h$). Распределение эффективных напряжений в заскважинном пространстве при $\sigma_v = 55$ МПа, $\sigma_H = 48$ МПа, $\sigma_h = 44$ МПа. Здесь и на рис. 7, 8 а – развертка на стенках скважины как функция угла θ ; б – на диаграмме Мора в точках стенки $\theta=90^\circ, 270^\circ$ (пунктир – предел прочности и минимальное сопротивление трения); в – компоненты тензора напряжений, действующие в горизонтальной плоскости; г – давление, максимальное касательное и кулоновы напряжения (максимальные значения на стенках скважины отображаются ярко-фиолетовым цветом, нулевые значения – красным); д – геодинамический тип напряженного состояния (горизонтальное растяжение – синий цвет, горизонтальный сдвиг – зеленый, горизонтальное сжатие – розовый), коэффициент Лодэ–Надаи и коэффициент *Ext*. Комментарии в тексте

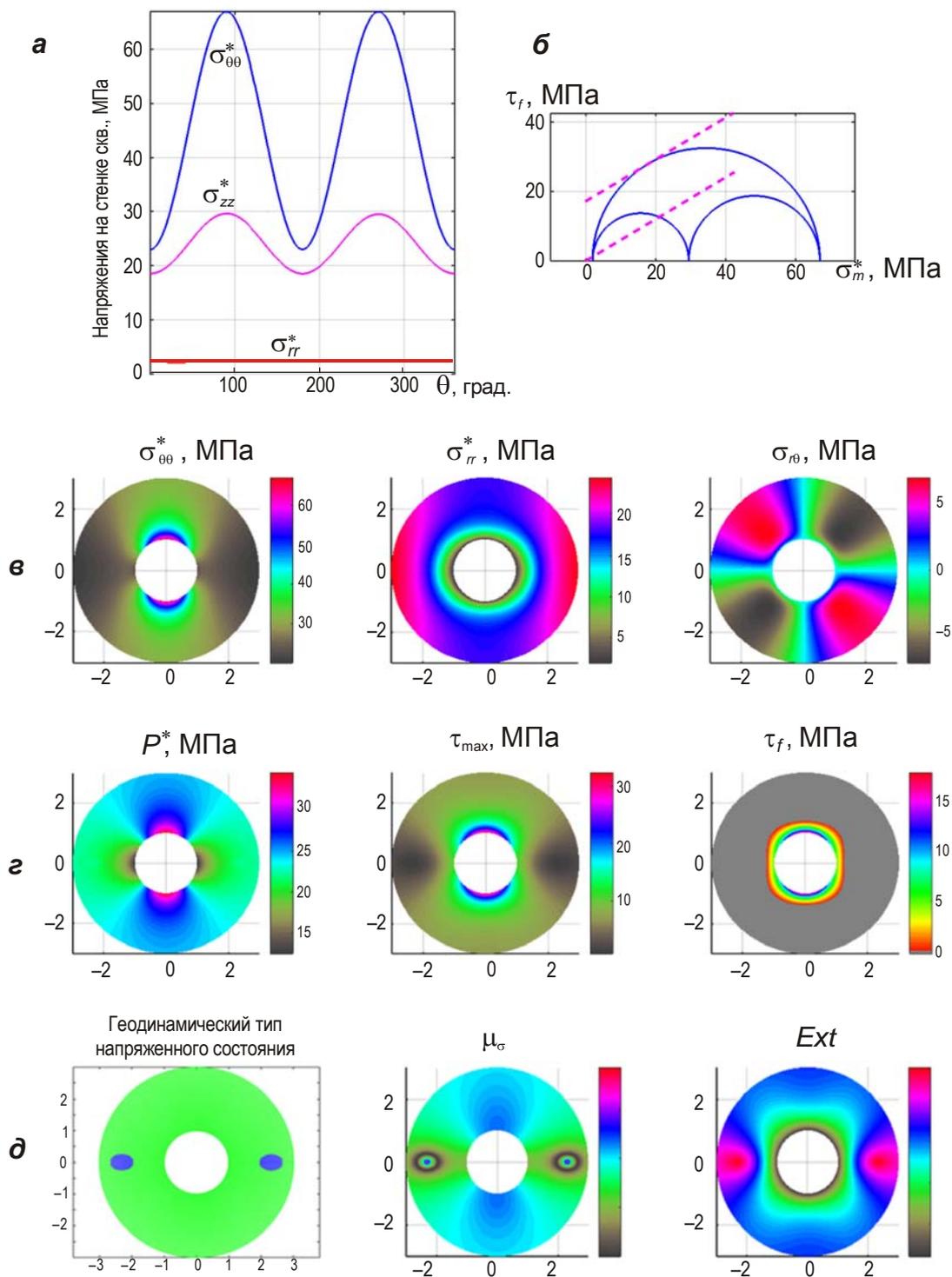


Рис. 7. Региональный режим горизонтального сдвига ($\sigma_H \geq \sigma_v \geq \sigma_h$). Распределение эффективных (11) напряжений в заскважинном пространстве при $\sigma_v = 55$ МПа, $\sigma_H = 60$ МПа, $\sigma_h = 49$ МПа. Комментарии см. в подписи к рис. б и в тексте

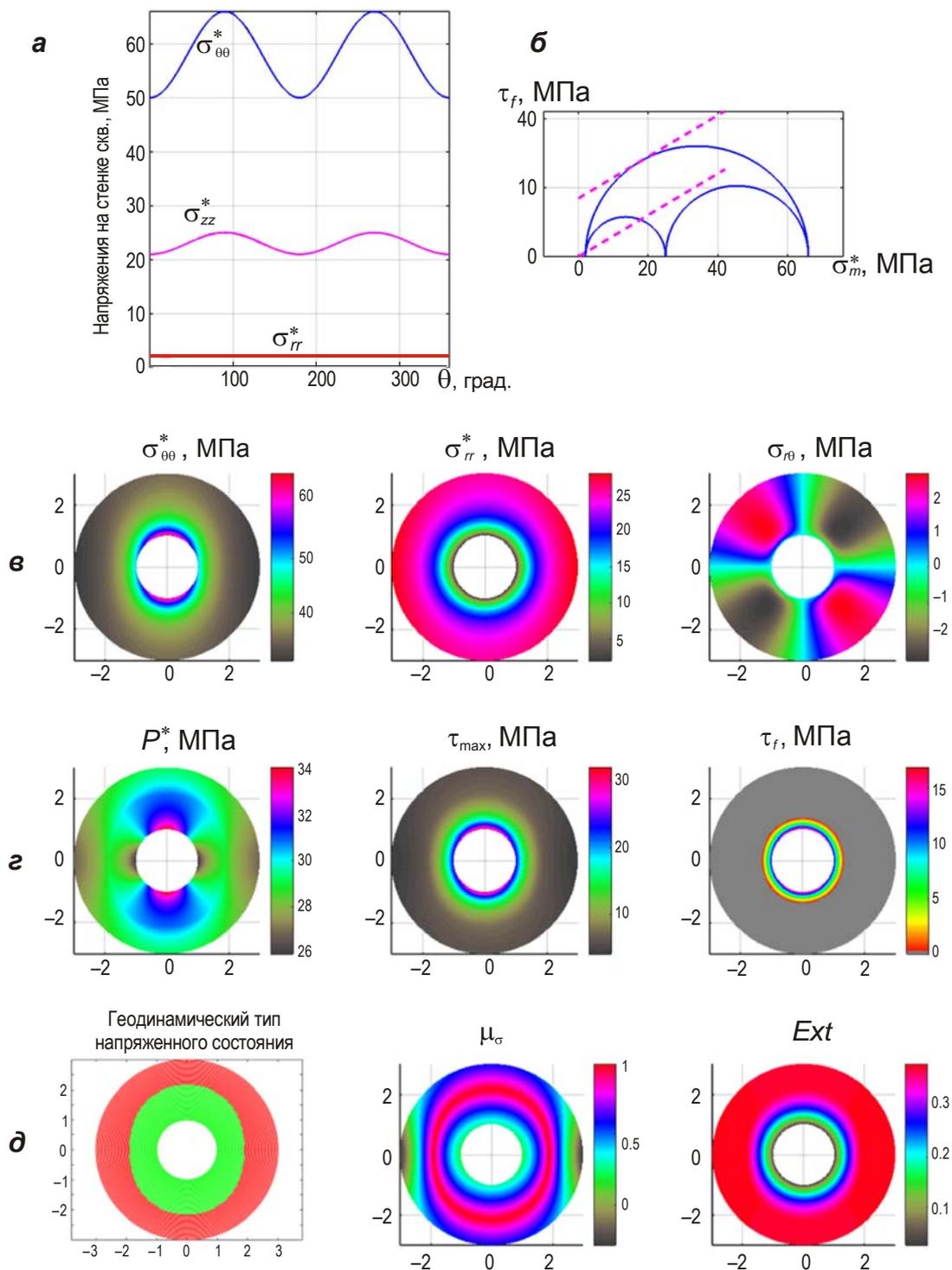


Рис. 8. Региональный режим горизонтального сжатия ($\sigma_H \geq \sigma_h \geq \sigma_v$). Распределение эффективных (11) напряжений в заскважинном пространстве при $\sigma_v = 54$ МПа, $\sigma_H = 63$ МПа, $\sigma_h = 59$ МПа. Комментарии см. в подписи к рис. б и в тексте

место локальный геодинамический режим напряженного состояния, совпадающий с региональным (горизонтальное растяжение) при ориентации максимального сжатия в тангенциальном направлении. Вне этого диапазона θ на стенках создается режим локального горизонтального сдвига. Для других вариантов расчета (фрагменты *a* на рис. 7, 8) на стенках скважин сохраняется состояние горизонтального сдвига, при этом $\sigma_{\theta\theta}^* = \sigma_1^*$ и $\sigma_{rr}^* = \sigma_3^*$.

Для всех случаев считаем, что на стенках в точках $\theta=90^\circ, 270^\circ$ максимальные значения кулоновых напряжений достигают предельного состояния по формированию новых трещин, т.е. так, как это стандартно рассматривается в геомеханике. В представленной выше тектонофизической интерпретации полосы хрупкого разрушения это означает, что большой круг Мора касается внешней предельной линии (фрагменты *b* на рис. 6–8).

На фрагментах *b* рис. 6–8 показано, как в массиве за скважиной распределены компоненты тензора напряжений $\sigma_{\theta\theta}^*, \sigma_{rr}^*, \sigma_{r\theta}$. Нас будут интересовать закономерности поля этих компонент, прежде всего, вблизи скважины. Радиальные напряжения σ_{rr} по мере удаления от скважины возрастают; рост напряжений вблизи скважины слабо зависит от угла θ . В то же время тангенциальные напряжения, наоборот, зависят от θ и снижаются, имея максимальные значения в направлении действия напряжений σ_h . Наибольших значений тангенциальные напряжения достигают на стенках скважины при $\theta=\pm 90^\circ$, наименьшее – при $\theta=0^\circ, 180^\circ$. Соответственно, вдоль вертикальной оси наблюдается наиболее быстрое снижение уровня тангенциальных напряжений. Касательные напряжения $\sigma_{r\theta}$ максимальны при $\theta = n\pi/4$ ($n=1, 3, 5, 7$); уровень этих напряжений согласно (8) максимален на расстоянии $r = \sqrt{3}R$ от стенок скважины.

Максимальные касательные напряжения τ достигают наибольшего значения вблизи стенок скважины в направлении действия регионального напряжения σ_h , т.е. при $\theta=\pm 90^\circ$ (фрагменты *c* на рис. 6–8). В этом же месте максимально и давление $P = 0.5(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta})$, действующее на плоскости максимальных касательных напряжений. Наименьших значений вблизи стенок скважины оба этих параметра достигают в направлении действия регионального напряжения σ_H ($\theta=0^\circ, 180^\circ$).

В зонах горизонтального растяжения (см. рис. 6, *c*) снижение уровня максимальных касательных напряжений достигает почти 70 %, а давления несколько меньше (~37 %). Этим объясняется то, что кулоновы напряжения, оцениваемые согласно (1) или (8), больше в направлении действия региональных напряжений σ_h . Подобные соотношения характерны и для других режимов напряженного состояния (фрагменты *c* на рис. 7, 8).

Обратим внимание на схожесть пространственного распределения максимальных касательных напряжений τ и тангенциальных напряжений $\sigma_{\theta\theta}^*$ вблизи стенок заскважинного пространства. Это связано с тем, что в этой области радиальные напряжения σ_{rr}^* практически не зависят от угла, а касательные $\sigma_{r\theta}$ близки к нулю.

При расчете кулоновых напряжений, представленных на фрагментах *c* рис. 6–8, k_f принималось равным 0.6. Можно видеть, что область положительных значений кулоновых напряжений охватывает скважину целиком; максимальные их значения на стенках скважины расположены в направлении действия σ_h . При этом на стенках скважины градиент изменения кулоновых напряжений максимален (или наибольший) для региональных состояний горизонтального сдвига и растяжения.

Если предположить, что полученные на стенках скважины максимальные значения τ_{ci} отвечают пределу внутреннего сцепления τ_f ($\theta=\pm 90^\circ$), то в режиме горизонтальных сдвига (см. рис. 7, б) и сжатия (см. рис. 8, б) область активизации трещин захватывает широкий участок внутри большого круга Мора. Это означает, что очень широкий диапазон разноориентированных дефектов прочности способен создать вывал вблизи точек скважины $\theta=\pm 90^\circ$.

Теперь обратим внимание на изменение геодинамического режима локального напряженного состояния вблизи стенок скважины и на некотором расстоянии от них. Во всех случаях в зонах, охватывающих точки $\theta=\pm 90^\circ$, на стенках скважины имеет место режим горизонтального сдвига. Наибольшую площадь этот режим на локальном уровне охватывает тогда, когда региональный режим также является горизонтальным сдвигом (см. рис. 7, д). Наименьшую площадь локальный режим горизонтального сдвига имеет в случае регионального напряженного состояния горизонтального растяжения (см. рис. 6, д). Для регионального напряженного состояния горизонтального сжатия область локального режима горизонтального сдвига (см. рис. 8, д) полностью охватывает скважину.

Для прогноза состояния в двух других критически важных точках стенок скважины – $\theta=0^\circ, 180^\circ$ – рассмотрим изменения в заскважинном пространстве коэффициента Лоде–Надаи (фрагменты δ на рис. 6–8)

$$\mu_\sigma = 1 - 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (12)$$

значения которого, изменяющиеся от +1 до –1, характеризуют вид тензора напряжений соответственно одноосного сжатия и растяжения. Этот коэффициент часто используется в тектонофизике при анализе природного напряженного состояния в областях формирования трещин отрыва. Запись выражения для μ_σ в виде (12) из-за смены знака растягивающих и сжимающих напряжений отличается от стандартной, принятой в классической механике. Отметим, что одноосное растяжение можно также представить как двuosное сжатие (рис. 9), которое следует рассматривать как опасное с позиции возникновения трещины отрыва, ортогональных σ_3 .

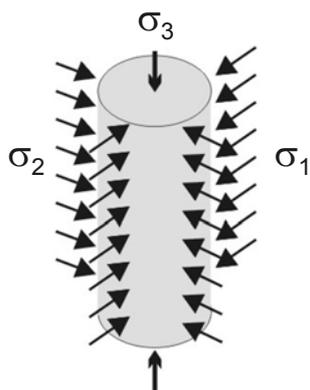


Рис. 9. Схема двuosного равномерного сжатия – вид тензора напряжений одноосного растяжения ($\sigma_3 < \sigma_1 \approx \sigma_2$)

Эта опасность будет реализована, если кроме условия $\mu_\sigma \rightarrow -1$ в анализируемой зоне будет иметь место пониженный уровень сжатия главного напряжения σ_3 , особенно, если оно является растягивающим.

Для оценки выполнения этого условия используется параметр

$$Ext = \frac{\sigma_3^*}{\sigma_1^* + \sigma_2^*}. \quad (13)$$

Обратим внимание на тот факт, что в выражении (13) использованы эффективные напряжения, т.е. хрупкий отрыв возможен даже тогда, когда все главные напряжения являются сжимающими, но уровень флюидного давления способен изменить знак эффективного главного напряжения σ_3^* . При состоянии, близком к одноосному растяжению ($\sigma_1^* \approx \sigma_2^*$), этот коэффициент меньше единицы. Возможность формирования отрывной трещины в таком состоянии увеличивается при $Ext \rightarrow 0$ и тем более при $\sigma_3^* < 0$. Как видно, для регионального состояния растяжения на всем контуре стенки скважины коэффициент $Ext \rightarrow 0$ (см. рис. 6, д). Поскольку для этого состояния при $\theta=0^\circ, 180^\circ$ коэффициент $\mu_\sigma \rightarrow -1$, то это означает, что на данном участке стенки возможно формирование трещины отрыва. Поскольку такая трещина будет иметь тангенциальное направление ($\sigma_3^* = \sigma_{rr}^*$), то она приведет к вывалу породы.

Следует отметить, что в точках $\theta=0^\circ, 180^\circ$ для двух других случаев регионального состояния $\mu_\sigma \approx -0.5$ (сдвиг – одноосное растяжение) и $\mu_\sigma \approx 0.2$ (сдвиг – одноосное сжатие); следовательно, здесь нет условий для формирования трещин отрыва.

При расчетах значение давления бурового раствора принималось таким, чтобы распределение кулоновых напряжений подчеркивало особенность каждого состояния. Если же давление бурового раствора подбирать так, чтобы для всех состояний $\tau_f = 5$ МПа, то для трех рассмотренных случаев предельные его значения составят $P_w = 35.9; 43.5; 43.2$ МПа, поскольку упругое решение линейно связано с давлением.

Обсуждение

Подход, апробированный выше чисто теоретически, применим теперь к некоторому конкретному месторождению, для которого ранее были выполнены стандартные расчеты стабильности скважины. На этом месторождении, вертикальная скважина была пробурена через доломитный ярус на глубине 1580 м с плотностью бурового раствора 1200 кг/м³ ($P_w = 18.6$ МПа).

При анализе данных микроимиджа стенок скважины было установлено, что в доломитном ярусе месторождения интервал 1580–1583 м оказался слабокавернозным. Каверны размером от мелких до средних имели продолговатую форму и были распространены неравномерно. Результаты исследований физических свойств пород свидетельствуют, что они являются достаточно прочными (прочность сцепления τ_f составляет 30 МПа; угол внутреннего трения равен 32°), хотя в них существует достаточное число микротрещин.

Согласно расчетам с использованием критерия Кулона–Мора, стенки скважины должны сохранять свою цельность при бурении, даже если в скважине не будет внутреннего давления (бурение без бурового раствора, $P_w = 0$). На практике каверны от мелких до средних появляются на стенке скважины при бурении с буровым раствором, имеющим плотность, создающую в рассматриваемом интервале давление $P_w = 18.6$ МПа.

Результаты расчета параметров напряженного состояния, выполненные в стандартном подходе (7), показаны на рис. 10.

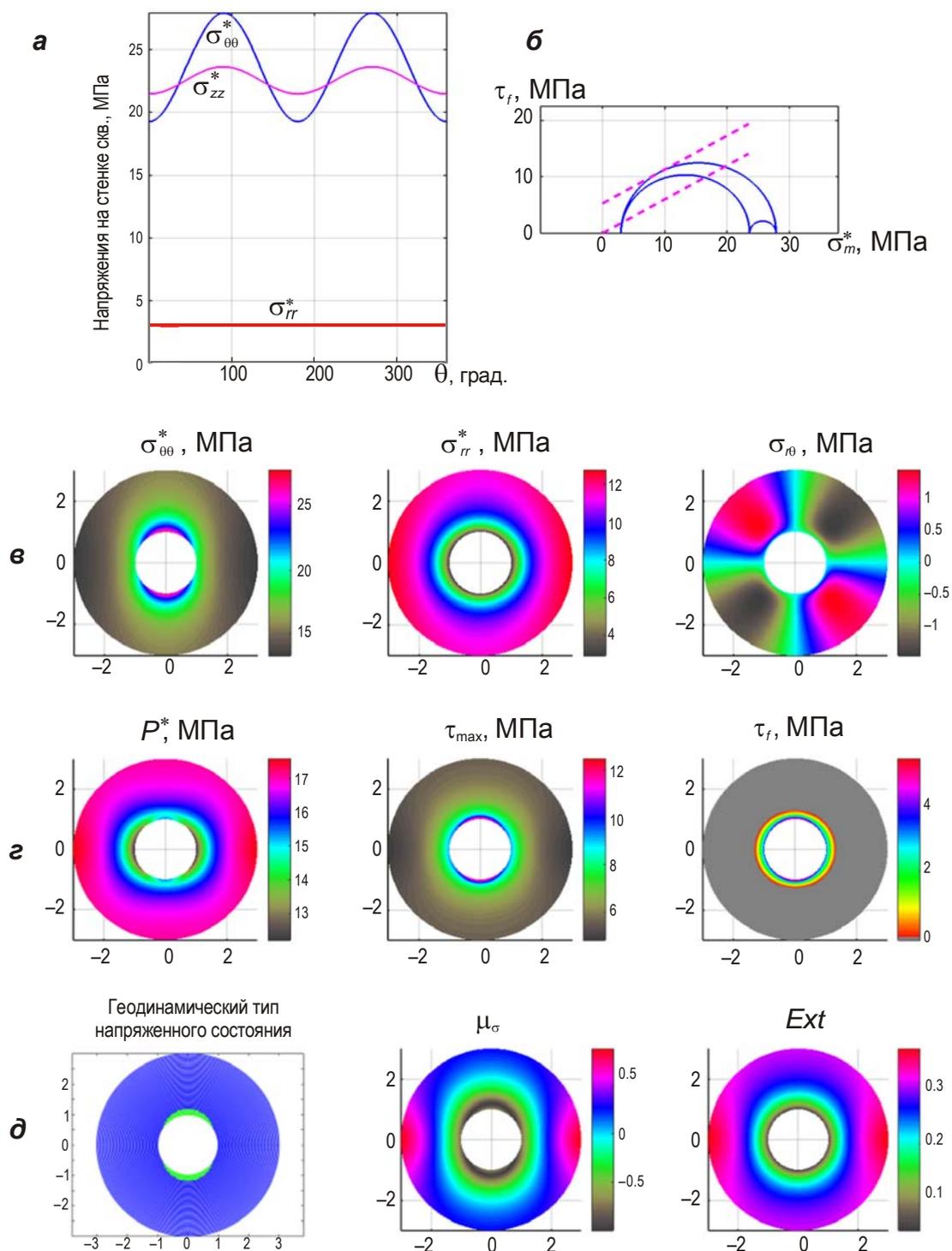


Рис. 10. Региональный режим горизонтального растяжения ($\sigma_v \geq \sigma_H \geq \sigma_h$). Распределение эффективных (11) напряжений в заскважинном пространстве при $\sigma_v = 38.2$ МПа, $\sigma_H = 30$ МПа, $\sigma_h = 27.8$ МПа, $P_p = 15.7$ МПа, $P_w = 18.6$ МПа. Комментарии см. в подписи к рис. 6 и в тексте

На рис. 10, *г* можно видеть, что ненулевые кулоновы напряжения охватывают всю скважину. Согласно изложенным взглядам на процесс деформирования трещиноватых сред, здесь можно ожидать активизации старых трещин.

На диаграмме Мора (рис. 10, б) ранее существовавшие трещины, которые ориентированы так, что их напряженные состояния попадают в зону между линиями с нулевым и максимальным сцеплением, можно также рассматривать как флюидопроводящие [Zoback et al., 2003]. С другой стороны, трещины, напряженные состояния которых оказываются ниже линии минимального трения, стабильны и не активизируются (сухие трещины). Обратим внимание также на то, что в направлении действия регионального напряжения σ_H существует опасность появления трещин отрыва (одноосное растяжение при $Ext \rightarrow 0$) и вывала породы (рис. 10, д).

Наше предложение состоит в том, что пробурить рассматриваемую зону без каверн можно, если при расчете предельных напряжений для стенок скважины положить $\tau_{cu} = 0$. В этом случае ранее существовавшие трещины в породе не будут активизироваться вновь. Условию $\tau_{cu} \leq 0$ везде в заскважинном пространстве отвечает давление бурового раствора, равное 23.14 МПа. В этом случае стенки скважины сохраняют свою цельность, и при этом давлении нет опасности поглощения и потери бурового раствора в стенке скважины.

Выводы

Интерпретация, проведенная на основе опыта тектонофизического изучения природного напряженного состояния, результатов расчетов устойчивости стенок скважин, выполненных на основе достаточно стандартно используемых математических формул, позволила получить ряд фактов, которые ранее упускались. Наиболее важным из них оказалось установление необходимости учета исходной трещиноватости пород при расчете устойчивости стенок скважин.

Анализ наиболее типичных случаев напряженных состояний, в которых осуществляется бурение скважин, позволил установить, что обвал вокруг скважины происходит в зонах с напряженным состоянием горизонтального сдвига, а отрыв происходит в зонах одноосного растяжения (двухосное сжатие). Показано, что на некотором удалении от стенок ($r \approx (1.5 \div 2)R$) происходит смена локального геодинамического режима на региональный.

Установлено, что при использовании стандартного расчета, связывающего устойчивость стенок скважин с прочностью целых образцов пород, изолиния нулевого значения кулоновых напряжений τ_{cu} проходит на некотором расстоянии от стенок скважин. Согласно выполненному в тектонофизическом разделе анализу можно прогнозировать, что в зоне, где $\tau_{cu} > 0$, возможна активизация ранее существовавших и частично залеченных хрупких трещин.

Во всех рассмотренных случаях эта область не сильно внедряется в заскважинное пространство, и поэтому можно сказать, что в скважине если и возникнет локальное разрушение, то оно не будет иметь катастрофические для ее устойчивости последствия. Однако существуют такие соотношения главных напряжений, для которых такие зоны могут захватывать значительные участки заскважинного пространства.

Предлагается расчет устойчивости стенок скважин вести с учетом того факта, что в массиве может существовать частично залеченная система трещины. Требование создания давления бурового раствора, для которого $\tau_{cu} \leq 0$, позволяет реализовать такое напряженное состояние.

Авторы благодарят за поддержку Министерство образования Исламской республики Иран.

Литература

- Алимжанов А.М.* Пространственная осесимметричная устойчивость вертикальной скважины в массиве, содержащем слой с пониженными прочностными свойствами // Электрон. науч. журн. Уфа. Нефтегазовое дело. 2008. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Alimzhanov/Alimzhanov_1.pdf.
- Кременецкий А.А., Овчинников Л.Н., Нартикоев В.Д., Лapidус И.В.* Комплексные геохимические и петрологические исследования глубоких и сверхглубоких скважин // Глубинные исследования недр в СССР: Докл. сов. геол. на XXVII сессии Междунар. геолог. конгр. (Вашингтон, июль, 1989 г.). Л., 1989. С.212–226.
- Марков Г.А.* О распространении горизонтальных тектонических напряжений в зонах поднятий земной коры // Инженерная геология. 1980. № 1. С.20–30.
- Марков Г.А.* Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. Л.: Наука, 1977. 211 с.
- Подъячев А.А.* Обоснование и разработка математической модели оценки устойчивости ствола наклонно направленных и горизонтальных скважин: Дис. ... канд. техн. наук. Самара: СГТУ, 2015. 101 с.
- Поль Б.* Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения // Разрушение. Т. 2. Математические основы теории разрушения / Под ред. Г. Либовица. М.: Мир, 1975. С.336–520.
- Ребецкий Ю.Л.* Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристикам трещин: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: ОИФЗ РАН, 2003а. 455 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // Докл. РАН. 2003б. Т. 3, № 2. С.237–241.
- Ребецкий Ю.Л.* Оценка относительных величин напряжений – второй этап реконструкции по данным о разрывных смещениях // Геофизический журнал. Киев: ИГ НАНУ, 2005. Т. 27, № 1. С.39–54.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига. 2007а. 406 с.
- Ребецкий Ю.Л.* Тектонические напряжения и области триггерного механизма возникновения землетрясений // Физическая мезомеханика. 2007б. Т. 1, № 10. С.25–37.
- Ребецкий Ю.Л.* Третий и четвертый этапы реконструкции напряжений в методе катакластического анализа сдвиговых разрывов // Геофизический журнал. 2009. Т. 31, № 2. С.93–106.
- Ребецкий Ю.Л.* Об особенностях напряженного состояния коры внутриконтинентальных орогенов // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, вып. 4. С.437–466.
- Турчанинов И.А.* Состояния и основные направления исследований в скальных породах // Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коре: Материалы Всес. школы-семинара “Измерение напряжений и их приложение в прогнозе землетрясений”. Апатиты: 1982. С.5–9.
- Al-Ajmi A.M., Zimmerman R.W.* Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi–Coulomb failure criterion // International Journal Rock Mechanics & Mining Sciences. 2006. V. 43. P.1200–1211.
- Anderson E.M.* The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain // Oliver and Boyd, Edinburgh, 1951. 206 p.
- Bjorn L.J.* Natural stress value obtained in different parts of Fennoscandian rock masses // Proc. 2-nd Cong. Int. Soc. Rock Mech. Beograd, 1970. N 1. P.209–212.
- Brace W.F.* Volume changes during fracture and frictional sliding // A Rev. Pure and Applied geophics. 1978. V. 116. P.603–614.

- Brady B., Brown E.* Rock mechanics for underground mining. Third edition. Kluwer Academic Publishers, 2004. 688 p.
- Byerlee J.D.* Frictional characteristics of granite under high confining pressure // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72, N 14. P.3639–3648.
- Byerlee J.D.* Friction of Rocks // *Pure and Applied Geophys.* 1978. V. 116. P.615–626.
- Charlez P.A.* Rock Mechanics. Petroleum Applications. Paris: Editions Technip, 1997. V. 2. 661 p.
- Fjaer E., Holt R.M., Horsrud P., Raaen A.M., Risnes R.* Petroleum Related Rock Mechanics. Amsterdam: Elsevier, 1992. 338 p.
- Hast N.* The state of stresses in upper part of Erath' crust // *Tectonophysics.* 1969. V. 8, N 3. P.169–211.
- Kirsch G.D.* Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre // *VDIZ.* 1898. V. 42. P.797–807.
- Mogi K.* Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow // *Bull. Earth. Res. In. Univ. Tokyo.* 1966. V. 44. P.215–232.
- Mogi K.* Fracture and flow of rocks under high triaxial compression // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76, N 5. P.1255–1269.
- Schmitt D.R., Currie C.A., Zhang L.* Crustal stress determination from boreholes and rock cores: Fundamental principles // *Tectonophysics.* 2012. V. 580. P.1–26.
- Xu Guangquan.* Wellbore stability in geomechanics. Thesis submitted to The University of Nottingham for the degree of PhD. February. 2007. 202 p.
- Zoback M.D.* Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, 2007. 505 p.
- Zoback M.D., Barton C.A., Brudy M., Castillo D.A., Finkeiner T., Grollimund B.R., Moos D.B., Peska P., Ward C.D., Wiprut D.J.* Determination of stress orientation and magnitude in deep wells // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.* 2003. V. 40. P.1049–1076.

Сведения об авторах

ГАРАВАНД Абузар – аспирант, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 119991, Москва, Ленинский просп., д. 65, корп. 1. Тел.: +7(967) 154-29-19. E-mail: garavand.aboozar@gmail.com

РЕБЕЦКИЙ Юрий Леонидович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(903) 173-96-02. E-mail: reb@ifz.ru

METHODS OF GEOMECHANICS AND TECTONOPHYSICS IN SOLVING THE PROBLEMS OF STABILITY OF OIL WELLS DURING DRILLING

A. Garavand¹, Yu.L. Rebetsky²

¹ *Gubkin Russian State University of Oil&Gas, Moscow, Russia*

² *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Abstract. The classical problem of the stability of oil wells is considered using the linear elastic theory. The analysis of the reasons, why the standard approach of determination the drilling fluid pressure to the underlying layers does not guarantee the stability of the borehole wall. It is shown that the presence of the fractures of various origins in the formation could lead to the possibility of local borehole collapse into the well. It was proposed to construct the algorithm of calculation using a model of the environment allowing the presence of differently oriented cracks and defects strength of different genesis. The selected criteria not only show the section of shear failures on borehole walls, but also tear-off violations on the basis of the form of the stress tensor.

Keywords: well stability, shear strength, coulomb stresses.

References

- Al-Ajmi A.M., Zimmerman R.W. Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi–Coulomb failure criterion, *Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2006, vol. 43, pp. 1200-1211.
- Alimzhanov A.M. Space axis symmetric stability of vertical well in massif with layer of rock lowered physico-mechanical characteristics, *Neftegazovoe delo* (Oil and gaz business), 2008, no. 2, http://ogbus.ru/authors/Alimzhanov/Alimzhanov_1.pdf.
- Anderson E.M. *The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain*, Edinburgh: Oliver and Boyd, 1951.
- Bjorn L.J. Natural stress value obtained in different parts of Fennoscandien rock masses, *Proc. 2-nd Cong. Int. Soc. Rock Mech.*, Beograd, 1970, no. 1, pp. 209-212.
- Brace W.F. Volume changes during fracture and frictional sliding, *A Rev. Pure and Applied Geophys.*, 1978, vol. 116, pp. 603-614.
- Brady B. and Brown E. *Rock mechanics for underground mining*, 3rd ed., Kluwer Academic Publishers, 2004.
- Byerlee J.D. Frictional characteristics of granite under high confining pressure, *J. Geophys. Res.*, 1967, vol. 72, no. 14, pp. 3639-3648.
- Byerlee J.D. Friction of Rocks, *Pure and Applied Geophys.*, 1978, vol. 116, pp. 615-626.
- Charlez P.A. *Rock Mechanics. Petroleum Applications*, Paris: Editions Technip, 1997, vol. 2.
- Fjaer E., Holt R.M., Horsrud P., Raaen A.M., and Risnes R. *Petroleum Related Rock Mechanics*, Amsterdam: Elsevier, 1992.
- Hast N. The state of stresses in upper part of Erath' crust, *Tectonophysics*, 1969, vol. 8, no. 3, pp. 169-211.
- Kirsch G.D. Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre, *VDIZ*, 1898, vol. 42, pp. 797-807.
- Kremenetskii A.A., Ovchinnikov L.N., Nartikoev V.D., and Lapidus I.V. The complex of geochemical and petrological studies of deep and superdeep boreholes. *Sbornik dokladov XXVII Mezdunarodnogo Geologicheskogo Kongressa* (Proc. XXVII Int. Geol. Congress), Leningrad, 1989, pp. 212-226.
- Markov G.A. On propagation of horizontal tectonic stresses in the crust uplift zones, *Inzhenernaya Geologiya* (Engineering Geology), 1980, no. 1, pp. 20-30.
- Markov G.A. *Tektonicheskie napryazheniya i gornoe davlenie v rudnikakh Khibinskogo massiva* (Tectonic Stress and Confining Pressure in Mines in the Khibiny Massif), Leningrad: Nauka, 1977.
- Mogi K. Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow, *Bull. Earth. Res. In. Univ. Tokyo*, 1966, vol. 44, pp. 215-232.
- Mogi K. Fracture and flow of rocks under high triaxial compression, *J. Geophys. Res.*, 1971, vol. 76, no. 5, pp. 1255-1269.
- Paul B. *Macroscopic criteria for plastic flow and brittle fracture*, vol. 2: *Fracture*, ed. H. Liebowitz, London: Academic Press, 1968.
- Pod'yachev A.A. Substantiation and development of a mathematical model for estimating the stability of directional and horizontal wells, *Cand. Sci. (Techn.) Dissertation*, Samara: SGTU, 2015.
- Rebetsky Yu.L. The stress-strain state and mechanical properties of natural massifs according to data on earthquake focal mechanisms and structural and kinematic characteristics of fractures, *Doctoral (Phys.-Math.) Dissertation*, Moscow: OIFZ, 2003a.
- Rebetskii Yu. L. Development of the Method of Cataclastic Analysis of Shear Fractures for Tectonic Stress Estimation, *Doklady Earth Sciences*, vol. 388, no. 1, 2003b, pp. 72-76.
- Rebetskiy Yu.L. Estimation of relative values of tensions as a second stage of reconstruction according to the data on rupture dislocations, *Geofizicheskii Zhurnal* (Geophys. J.), 2005, vol. 27, no. 1, pp. 39-54.
- Rebetsky Yu.L., *Tektonicheskie napryazheniya i prochnost' gornykh massivov* (Tectonic stresses and strength of mountain ranges), Moscow: Akademkniga, 2007a.
- Rebetskii Yu.L. Tectonic stresses and areas of trigger mechanism of earthquake occurrence, *Fizicheskaya mezomekhanika* (Physical mezomechanics), 2007b, vol. 1, no. 10, pp. 25-37.
- Rebetskiy Yu.L. The third and the fourth stages of strains reconstruction in the method of cataclastic analysis of shift ruptures, *Geofizicheskii Zhurnal* (Geophys. J.), 2009, vol. 31, no. 2, pp. 93-106.
- Rebetsky Yu.L. On the specific state of crustal stresses in intracontinental orogens, *Geodynamics & Tectonophysics*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 437-466.
- Schmitt D.R., Currie C.A., and Zhang L. Crustal stress determination from boreholes and rock cores: Fundamental principles, *Tectonophysics*, 2012, vol. 580, pp. 1-26.
- Turchaninov I.A. State and main directions of studies in rocks, *Materialy Vses. Shkoly-seminara Izmerenie napryazhenii i ikh prilozhenie v prognoze zemletryaseni* (Proc. All-Union Conf. Stress measurements and their application to earthquake forecast), Apatity, 1982, pp. 5-9.

Xu Guangquan. Wellbore stability in geomechanics. *Thesis submitted to The University of Nottingham for the degree of PhD*, 2007, 202 p.

Zoback M.D. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press, 2007.

Zoback M.D., Barton C.A., Brudy M., Castillo D.A., Finkeiner T., Grollmund B.R., Moos D.B., Peska P., Ward C.D., and Wiprut D.J. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells, *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2003, vol. 40, pp. 1049-1076.