

Оценка оптимальных условий расположения горизонтальных скважин-фишбонов в условиях разработки месторождения Ямало-Ненецкого автономного округа

А.В. Серяков^{1*}, М.Ю. Подбережный²

¹Бейкер Хьюз, Новосибирск, Россия

²ВНИИнефть, Москва, Россия

Предметом исследования является зона сочленения многоствольных скважин-фишбонов, проектируемых на нефтегазовом месторождении Ямало-Ненецкого автономного округа. Устойчивость области стыковки стволов в продуктивном пласте оценивается с помощью трехмерного пороупругого моделирования. С целью определения оптимального расположения фишбона рассмотрены ситуации с различным наклоном бокового ствола, с материнским стволом, направленным вдоль максимального и минимального горизонтального напряжения, для случаев, когда сочленение находится в породе с обычной и с пониженной прочностью. В каждой конфигурации сочленения определены диапазоны допустимой депрессии на пласт, а в случае нестабильности при добыче нефти – указаны перепады давления, при которых возможно безопасное бурение и эксплуатация скважин. Моделирование с учетом нарастания корки бурового раствора на стенках скважин показало, что перепад давления может быть существенно снижен с сохранением устойчивости стенок сочленения.

Ключевые слова: фишбон, оптимизация проектирования скважин, устойчивость сочленения, пороупругое моделирование, глинистая корка бурового раствора, прочность песчаника

Для цитирования: Серяков А.В., Подбережный М.Ю. (2023). Оценка оптимальных условий расположения горизонтальных скважин-фишбонов в условиях разработки месторождения Ямало-Ненецкого автономного округа. *Георесурсы*, 25(1), с. 130–139. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.1.13>

Введение

Развитие технологий бурения многостволовых скважин в 90х годах XX века, нацеленное на повышение добычи углеводородов, потребовало решения множества инженерных задач. Для успешного заканчивания многозбойных скважин важнейшей проблемой оказалась задача устойчивости области сочленения (Brister, 1997).

Ряд исследователей с начала 90х годов опубликовали работы, посвященные аналитической и численной оценке условий стабильности скважин с несколькими стволами.

В статье (Aadnoy, 1991) предлагаются инженерные формулы для определения критических давлений трещинообразования и обрушения для двух расположенных рядом скважин с внутренним давлением. Оценка разрушений проводится с помощью критерия Мора-Кулона для напряжений, рассчитанных через коэффициент концентрации напряжений, данные по которому взяты из монографии (Савин, 1968). В последующей работе (Aadnoy, 2001) авторы продолжают применять двумерный анализ к исследованию условий устойчивости овальных отверстий и двух отдельных окружностей, содержащихся в аксиальных сечениях вертикального сочленения. Получены формулы для критических перепадов давления в однородном поле напряжений для постоянного порового давления.

Устойчивость сочленения с материнским стволом, направленным вертикально, исследуется (Bargui, 2000) с помощью трехмерного пороупругого моделирования в пакете ABAQUS. Параметры структурированной сетки для трехмерного моделирования подобраны из условия согласования с двумерными аналитическими решениями (Ling, 1948; Haddon, 1966) для напряжений вокруг двух отдельных и сопряженных отверстий на плоскости. Сопоставление проводилось для сплошной упругой среды, при этом установлено существенное отличие трехмерного напряженного состояния от двумерного в области стыковки стволов. С помощью трехмерного моделирования с учетом фильтрации в условиях притока пластовых флюидов в скважину авторы проанализировали распределение напряжений при последовательном проведении материнского и бокового стволов, определили опасные участки с точки зрения концентрации напряжений и смещений.

В публикации (Papanastasiou, 2006) представлена серия экспериментов по разрушению отверстий в 40-сантиметровых кубических образцах песчаника. Дефекты в сквозном отверстии и боковом ответвлении, моделирующем многостволовую скважину, регистрировались специальным видеоборудованием при возрастающей трёхосевой нагрузке на образец. Результаты по динамике разрушения на стенках отверстий были сопоставлены с расчетами напряженного плоского деформированного состояния сплошной среды по двумерной конечноэлементной программе. Полученное качественное соответствие в нескольких сечениях кубов авторы считают достаточным для использования двумерного моделирования для оценки

* Ответственный автор: Александр Викторович Серяков
e-mail: rednex@yandex.ru

© 2023 Коллектив авторов

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

устойчивости реальных сочленений в пласте.

Исследование (Baufield, 2000) посвящено численному моделированию трехмерной упругопластической задачи для Y-образного сочленения труб разных диаметров, которое описывает обсадку многостволовых скважин. Напряженно-деформированное состояние стыковки рассчитывается с помощью конечноэлементного пакета ABAQUS, при этом сочленение помещается в стальной цилиндр, моделирующий армирование, а также в цементные цилиндры для моделирования цементации обсадки. К стенкам труб прикладывается последовательно внутреннее и внешнее давление, вызывающее пластические деформации по контуру отверстий, критическое развитие которых позволяет определить давление разрыва обсадки, а также давление схлопывания (завала). Выявлены характерные области, в которых начинается пластическая деформация, а также определены прочностные в случае разрыва и коллапса для каждого типа сочленения.

Наиболее полная математическая модель для решения задачи устойчивости сочленения, описывающая физику процессов прискважинной зоны, представлена в (Mohamad-Hussein, 2017). Для вертикально-ориентированного сочленения в неоднородном поле начальных напряжений численно решается трехмерная пороупругопластическая задача с пластическим законом в форме критерия Мора-Кулона с упрочнением. Конечноэлементное программное обеспечение верифицировано на данных трехосного теста и экспериментальных результатах (Papanastasiou, 2006).

На сегодняшний день на углеводородных месторождениях ЯНАО все чаще отдаются предпочтение многостволовым скважинам, забуриваемым по технологии фишбон (Akhmetov, 2019). Данная технология характеризуется тем, что боковой ствол является материнским для следующего разветвления. Подробное исследование стабильности фишбонов проводится с помощью трехмерного геомеханического моделирования (Alchibaev, 2017).

Мы рассматриваем месторождение в ЯНАО, вовлекаемое в разработку скважинами фишбон, аналогом которого является группа Мессояхских месторождений. Проектируемые области резки боковых стволов находятся в пласте-коллекторе, при этом сочленение ориентировано в горизонтальной плоскости. Предполагается, что будет использоваться схема заканчивания первого уровня по классификации Technology Advancement Multilateral, что подразумевает открытые стволы без обсадки в области разветвления.

Целью работы является определение условий стабильности фишбона, расположенного на глубине порядка километра для режима бурения скважины и режима добычи углеводородов.

В связи с этим задачами исследования являлись:

1. Проведение комплексного систематического трехмерного моделирования напряженного состояния и порового давления формации вокруг сочленения при различной ориентации материнского ствола относительно горизонтальных напряжений, для трех вариантов расположения бокового ствола относительно материнского, для значений давления в скважинах больше и меньше пластового.

2. По результатам пороупругого моделирования с помощью критерия Мора-Кулона определение областей

разрушений в стенках сочленения для песчаного коллектора с характерной и пониженной прочностью.

3. Оценка влияния корки бурового раствора на разрушение зоны сочленения.

4. Обобщение и анализ условий стабильности фишбона для каждой конфигурации. Формирование рекомендаций по снижению рисков обрушения области стыковки стволов на стадиях бурения и эксплуатации скважин.

Характеристика пород

Рассматриваемая залежь имеет сложное строение с тектоническими нарушениями. Целевой пласт – подгазовая нефтенасыщенная оторочка с подстилающей водой. Литологически породы-коллекторы продуктивного пласта представлены слабосцементированным песчаником со средней пористостью 25 %. Несмотря на высокие коллекторские свойства извлечение нефти связано со следующими сложностями:

- низкие эффективные толщины (в среднем 6 м),
- неоднородность по расчленённости,
- высокие фильтрационные сопротивления при вытеснении высоковязкой нефти (вязкость порядка 60 мПа*с),
- неоднородность ГНК (вторжение нефти в газовую шапку и прорывы газа в нефтедобывающие скважины),
- наличие подстилающей воды.

В связи с описанными сложностями целесообразно вести разработку по неравномерно-избирательной сетке с различным профилем добывающих скважин. Наиболее оптимальной технологией является бурение фишбонов. Рассматривается наиболее дешевая и простая схема заканчивания первого уровня: в материнский ствол спускается нецементируемый хвостовик, боковые ответвления не имеют крепления обсадными трубами. Прочность сочленения на данном уровне целиком зависит от свойств породы, в котором находится место сочленения и соответственно для оценки устойчивости данной зоны при бурении и освоении необходимо применять трехмерное геомеханическое моделирование.

Модель и постановка задачи

Физические процессы совместного изменения напряжений в породном скелете и порового давления на масштабе времени фильтрации флюида в прискважинной зоне достаточно хорошо описываются линейной пороупругой моделью (Detournay, 1993). Поскольку фишбон располагается на глубинах порядка километра, используется изотропная модель среды. Система уравнений включает в себя:

Уравнение равновесия:

$$\nabla \sigma = \rho \vec{g}, \quad (1)$$

где σ – тензор напряжений насыщенной среды (полные напряжения), \vec{g} – вектор силы тяжести, ρ – плотность породы.

Обобщенный закон Гука:

$$\sigma = \lambda \varepsilon_{kk} \mathbf{I} + 2G \varepsilon - \alpha p \mathbf{I}, \quad (2)$$

где λ , G – параметры Ламе, \mathbf{I} – единичный тензор, ε – тензор деформаций, ε_{kk} – объемная деформация, α – коэффициент Био-Уиллиса, p – поровое давление. Удобно

использовать в качестве независимых постоянных среды модуль сдвига G и коэффициент Пуассона ν , тогда $\lambda = 2G\nu/(1 - 2\nu)$.

Уравнение фильтрационного течения:

$$\frac{\alpha}{K_{uB}} \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \left(\frac{k}{\mu} \nabla p \right) + \alpha \frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

где K_u – непренированный модуль объемного сжатия, B – коэффициент Скемптона, k – проницаемость среды, μ – вязкость флюида.

В режиме бурения, когда давление в скважине превышает пластовое и в буровом растворе содержатся взвешенные твердые частицы, при прохождении проницаемых пластов на стенке скважины, как правило, образуется низкопроницаемый слой – корка бурового раствора. Для моделирования ее нарастания используется дополнительное уравнение

$$\frac{\partial h}{\partial t} = a q_n - \gamma, \quad (4)$$

где $h = h(t)$ – толщина корки, a – параметр роста корки, q_n – скорость фильтрационного течения через контур скважины, γ – скорость смыва корки. Величину a можно оценить по формуле $a = \delta(1+\delta)/(1 - \phi_c)$, где δ – концентрация твердых частиц в потоке, ϕ_c – пористость корки (Кашеваров, 2003). Уравнение (4) сопряжено с уравнением фильтрационного течения (3), поскольку скорость течения q_n определяется через закон Дарси

$$\vec{q} = -\frac{k_c}{\mu} \nabla p, \quad (5)$$

где k_c – проницаемость корки, а ∇p можно аппроксимировать как $\nabla p = (p_b - p_f)/h$, где p_b – давление в скважине, p_f – поровое давление в формации под коркой, которое есть p на границе ячейки на стенке скважины.

Изменение напряженного состояния формации при свободной фильтрации в пласт или при извлечении нефти описывается с помощью системы (1)–(3). Если рассматривается бурение с превышением давления над пластовым и образованием корки, используется система (1)–(4).

Для оценки устойчивости области сочленения скважин используется критерий Мора-Кулона, записанный для напряжений в породном скелете, или эффективных напряжений:

$$\sigma_e \equiv \sigma_1' - \sigma_3' \cdot ctg\psi \geq UCS, \quad (6)$$

где $\sigma_1' = \sigma_1 + ap$, $\sigma_3' = \sigma_3 + ap$ – максимальное и минимальное главные эффективные напряжения, UCS – предел прочности породы на одноосное сжатие, $ctg\psi = (1 + \sin\varphi)/(1 - \sin\varphi)$, φ – угол внутреннего трения. Тип разрушения определяется из соотношения главных напряжений и расположения точки в пространстве (σ_1', σ_3') относительно кривой пластичности (Фадеев, 1987). Если мы находимся в основной области неупругих деформаций, происходит сдвиговое разрушение породы (вывалы). В случае же, когда $\sigma_1 < -\sigma_T$, где σ_T – предел прочности на отрыв, происходит трещинообразование (fracturing) и образуется гидроразрыв. В работе мы придерживаемся соглашения, что растягивающие напряжения отрицательные, сжимающие – положительные.

Для понимания и оценки состояния формации вокруг сочленения, удобно отрисовывать изолинии эквивалентного напряжения σ_e (Еременко, 1991), сопоставляя значение σ_e с пределом прочности UCS . В случае, когда

σ_e больше UCS , наступает сдвиговое разрушение.

Геометрия задачи представлена на рис. 1.

Рассматривается схема закачивания первого уровня, в связи с этим моделируется сочленение скважин без обсадки. Предполагается, что радиусы скважин равны $r_b = 0.08$ м. Материнский ствол расположен горизонтально и направлен параллельно оси X в модели. Боковой ствол имеет азимутальный угол α с осью материнского ствола и отклонен на угол β от горизонтальной плоскости. Начало координат расположено в точке пересечения осей скважин.

Сочленение находится в формации, в которой действуют тектонические напряжения $\sigma_{xx}^0, \sigma_{yy}^0, \sigma_{zz}^0$. Скважины с внутренним давлением p_b находятся в флюидонасыщенном пласте с поровым давлением p_0 .

Очевидно, что при достаточном удалении от области стыковки распределение напряжений вокруг отверстий может быть получено с помощью формул Кирша. С приближением к месту зарезки бокового ствола напряженное состояние можно оценить по аналитическим формулам, полученным в (Ling, 1948, Haddon, 1966), однако полное трехмерное распределение напряжений и порового давления вокруг области разветвления скважин может дать лишь численное моделирование.

Решение задачи проводится методом конечных элементов в дополнительных напряжениях в значительной по объему области вокруг сочленения. На стенке скважин задается перепад давления $dp = p_b - p_0$, при этом $dp < 0$ в случае добычи/опробования скважин, $dp > 0$ в режиме бурения. Отметим, что в тексте нам будет удобно говорить об абсолютной величине dp , отдельно упоминая, идет речь о добыче или бурении. Алгебраические системы для перемещений, порового давления и корки решаются итерационным алгоритмом до установления на следующем временном шаге (Рудяк, 2013). Для того, чтобы учесть геометрию сочленения, используются тетраэдрические элементы, а построение сетки в области осуществляется с помощью пакета ANSYS Meshing. Сетка экспортируется, дополняется свойствами материалов и граничными условиями и расчетный вариант запускается в собственной программе расчета GeoFluid.

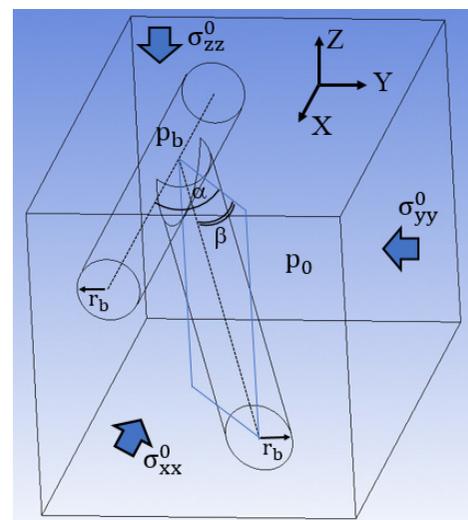


Рис. 1. Расположение стволов скважин в сочленение типа флишбон, геометрическая модель

Параметры моделирования

Рассматривается сочленение, находящееся на километровой глубине в песчаном коллекторе. Вертикальное напряжение формации определено через вес пород $\sigma_v = 22.8$ МПа, горизонтальные оценены по коэффициентам бокового отпора, рассчитанным для расположенных рядом месторождений, и с учетом сдвигового режима $\sigma_{HMax} = 25.72$ МПа, $\sigma_{hmin} = 16.62$ МПа. Поровое давление в пласте $p_0 = 11.37$ МПа. Песчаник характеризуется пороупругими свойствами: $G = 5.76$ ГПа, $\nu = 0.27$, $\alpha = 0.8$, $k = 265$ мД, $\mu = 63$ сП, $\varphi = 30^\circ$. Произведение $K_u B$, входящее в фильтрационное уравнения (3), можно найти из основных формул пороупругости через пористость ϕ , объемную сжимаемость флюида K_f и породного скелета K'_s

$$K_u B = K'_s / \phi \left(\frac{K'_s}{K_f} - 1 \right). \quad (7)$$

Для песчаника $\phi = 0.2$, $K'_s = 36$ ГПа, сжимаемость нефти $K_f = 3.3$ ГПа, получим $K_u B = 18.16$ ГПа. Поскольку в постановке задачи не используется коэффициент Скемптона B , его удобно выбрать равным 1.

Для оценки оптимальности расположения фишбона необходимо рассчитать варианты, при которых материнский ствол ориентирован как вдоль максимального, так и вдоль минимального горизонтального напряжения. Рассматриваются следующие случаи отклонения бокового ствола от материнского: I. $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 0$; II. $\alpha = 0$, $\beta = 20^\circ$; III. $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 20^\circ$.

Анализ данных широкополосного акустического каротажа совместно с экспериментальными данными сжатия керна указывают на то, что UCS на исследуемой глубине может уменьшаться с 33 МПа до 16 МПа при уменьшении в песчанике алевритовой составляющей. Поэтому для оценки устойчивости нужно учесть оба этих граничных значения. Предел прочности на растяжение σ_T принят равным 1 МПа.

Основное внимание было уделено определению условий устойчивости сочленения при откачке флюида из песчаника, что соответствует режиму опробования пласта. При этом опорные значения депрессий были 2.5–3.8 МПа, поскольку при таких значениях в пилотных скважинах наблюдались вывалы, определенные по данным каверномеров и имиджеров. Однако по мере моделирования песчаника с пониженными прочностными свойствами UCS=16 МПа, выяснилось, что необходимо рассматривать также режим бурения чтобы оценить безопасный перепад давления. Моделирование с превышением давления в скважине над пластовым включало как беспрепятственную фильтрацию в породу, так и образование корки бурового раствора, со свойствами $k_c = 10^{-3}$ мД, $\delta = 0.06$, $\phi_c = 0.3$, проницаемость зоны повреждения толщиной 5 мм была понижена до $k_a = 26$ мД.

В расчетах перепад давления в случае опробования пласта изменялся от 0.1 до 7.05 МПа, в режиме бурения от 0.5 до 7 МПа.

Результаты представлены отдельно по каждому случаю I, II, III расположения бокового ствола фишбона. В рамках каждой конфигурации рассмотрены ситуации ориентировки материнского ствола по направлению σ_{HMax} , σ_{hmin} , а также варианты, когда песчаник имеет обычную и пониженную прочность UCS.

Результаты

I. Боковой ствол под углом 20° в горизонтальной плоскости

I.1. Песчаник с прочностью UCS = 33 МПа

I.1.1. Материнский ствол ориентирован по направлению σ_{HMax}

Моделирование показывает, что при опробовании пласта с депрессией $dp = 3.8$ МПа в стенках фишбона образуются не критичные вывалы породы. Кроме того, разрушение происходит также в клине породы между скважинами. На рис. 2 приведены горизонтальное (а) и вертикальные сечения (б)–(г) формации, при этом сечения YZ показаны пунктиром на плоскости XY, а координаты плоскостей $x = 0.3$ м, 0.45 м, 0.55 м. Точка (0,0,0) соответствует точке пересечения осей материнского и бокового ствола.

Установлено, что угловой размер областей разрушений в боках скважин не превышает 40° , что соответствует устойчивому состоянию стенок горизонтальных скважин (Zobak, 2010).

Увеличение депрессии на пласт до 6.4 МПа приводит к расширению областей разрушения, их угловой размер становится больше 60° , что указывает на неустойчивость сочленения.

I.1.2. Материнский ствол ориентирован по направлению σ_{hmin}

В этом случае при депрессии 3.8 МПа разрушение появляется только в клине породы между стволами скважин. Таким образом, такое сочленение является более устойчивым, чем направленное вдоль σ_{HMax} .

Однако верхний предел устойчивости по dp здесь ниже, поскольку при увеличении депрессии до 5.1 МПа в стенках скважин образуются четыре области разрушения, которые начинают попарно замыкаться на контуре скважины при дальнейшем повышении давления откачки (рис. 3).

I.2. Песчаник с прочностью UCS=16 МПа

Установлено, что в песчанике с пониженной прочностью добыча флюида с перепадом давления $dp = 3.8$ МПа вызывает опасные разрушения в стенках скважин как для случая ориентировки вдоль σ_{HMax} , так и вдоль σ_{hmin} . При этом угловой размер областей вывалов для $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{HMax}$ порядка 90° , а в случае $\sigma_{xx}^0 = \sigma_{hmin}$ – достигают 180° (коллапс критических участков скважин). Дальнейшие расчеты с уменьшением dp до 0.1 МПа показали, что размер области разрушения в сочленении, направленном вдоль σ_{HMax} все еще больше 40° , а в фишбоне, направленном вдоль σ_{hmin} – больше 90° .

Таким образом, наиболее опасной является ситуация для сочленения с материнским стволом, направленным вдоль σ_{hmin} , так как даже кратковременное уменьшение давления в скважине ниже пластового приведет к коллапсу стенок сочленения. В связи с этим возникает вопрос, при каких давлениях выше пластового фишбон будет устойчивым, то есть с какими перепадами давления можно делать зарезку бокового ствола в хрупком песчанике.

Для определения условий стабильности сочленения в породе с пониженной прочностью, были проведены расчеты с превышением давления в скважине над пластовым в условиях беспрепятственной фильтрации флюида в формацию, и в условиях образования корки бурового раствора на стенках.

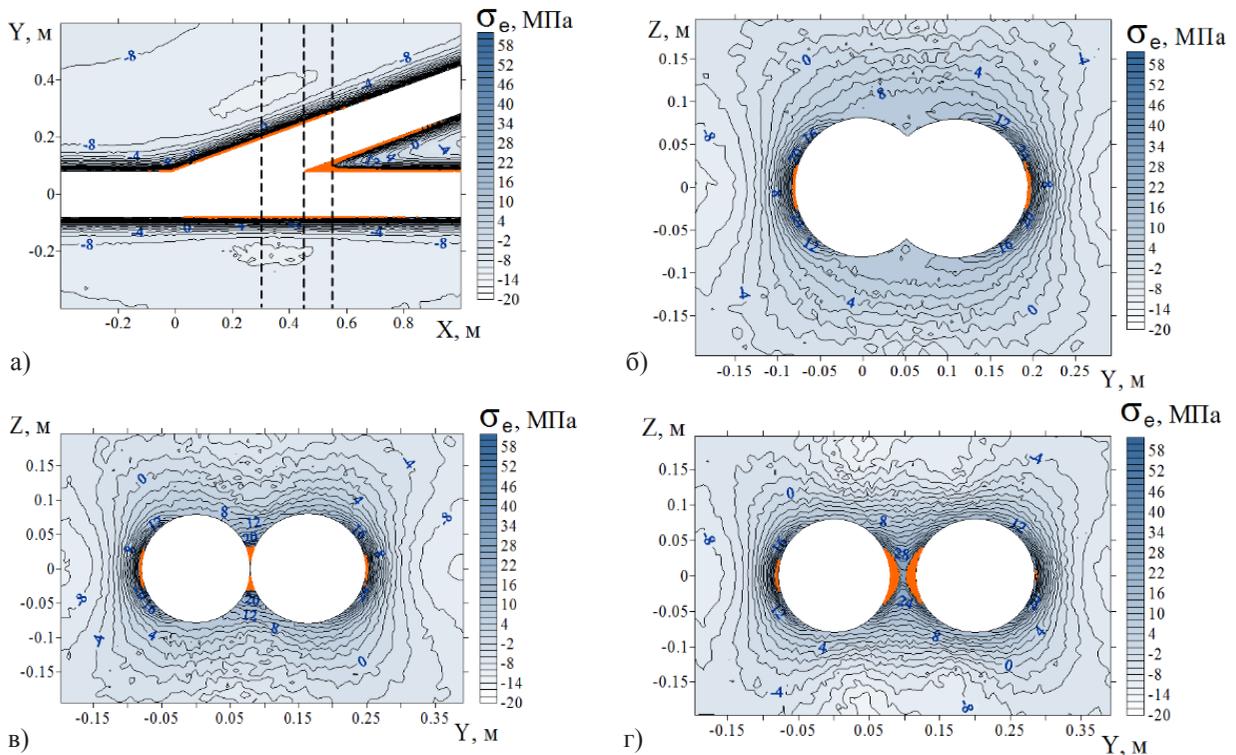


Рис. 2. Области разрушения и распределение напряжения σ_e вокруг сочленения направленного вдоль σ_{HMax} в песчанике с $UCS = 33$ МПа; депрессия на пласт 3.8 МПа

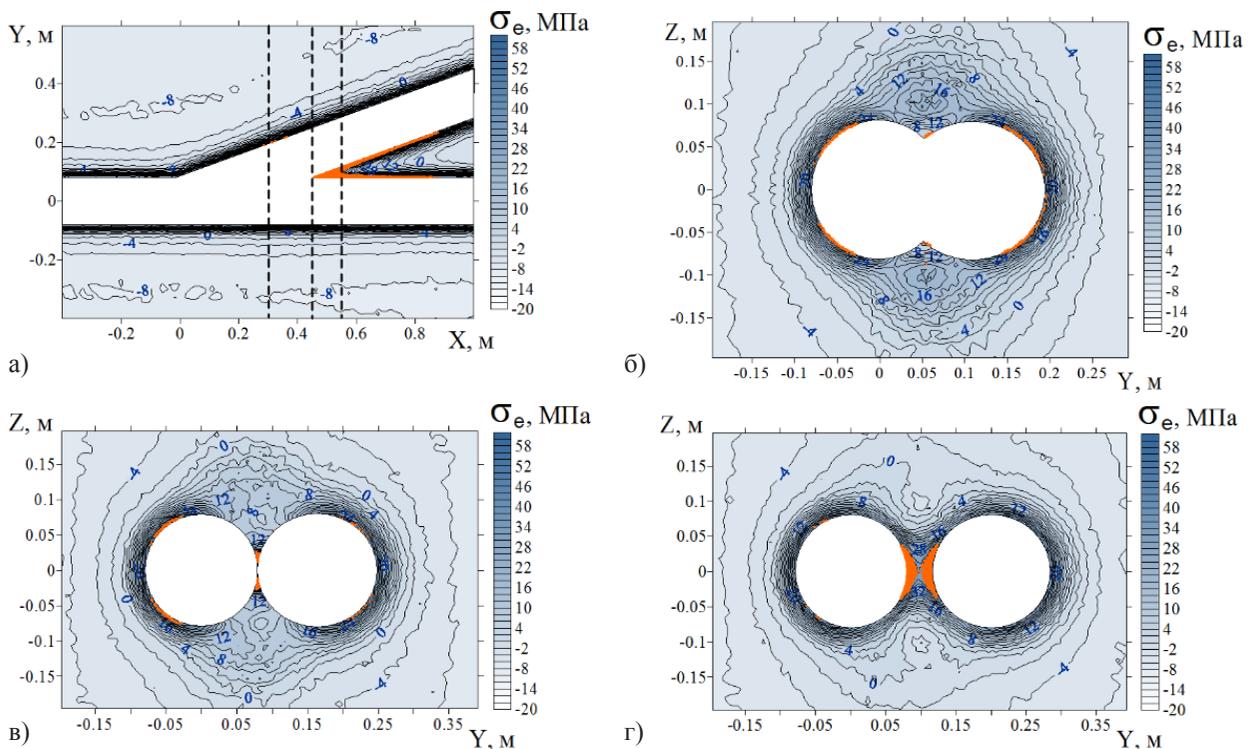


Рис. 3. Области разрушения и изолинии напряжения σ_e в песчанике с $UCS = 33$ МПа вблизи сочленения с материнским стволом, направленным вдоль σ_{Hmin} при увеличении депрессии на пласт до 5.1 МПа

1.2.1. Материнский ствол ориентирован по направлению σ_{HMax}

В случае бурения без корки безопасный размер областей вывалов, меньше 40° достигается при превышении dp значения 4 МПа.

Моделирование с нарастанием корки показывает, что вследствие гидродинамического изолирования формации, условия стабильности выполняются при меньшем перепаде давления $dp = 2.5$ МПа.

1.2.2. Материнский ствол ориентирован по направлению σ_{Hmin}

Если происходит бурение с беспрепятственной фильтрацией в формацию, то перепада давления dp в 4 МПа оказывается достаточно для того, чтобы области разрушения в стенках сочленения были не опасны. Форма сдвиговых разрушений при этом качественно соответствует представленной на рис. 3, напряженное же состояние отличается вследствие моделирования

различных режимов и перепадов давления. Несмотря на неопасный размер разрушений в области зарезки бокового ствола, в материнской скважине на достаточном удалении от места стыковки угол вывалов все еще больше 40° . Полностью стабильного состояния фишбон достигает при $dp = 4.5$ МПа.

Если рассматривать бурение с образованием корки бурового раствора, то оказывается, что перепад давления можно уменьшить до $dp = 3$ МПа. Таким образом, в целом, по случаю I при бурении в хрупком песчанике с образованием корки, перепад давления может быть уменьшен на 1.5 МПа (37 %).

II. Боковой ствол под углом 20° в вертикальной плоскости

II.1. Песчаник с прочностью $UCS = 33$ МПа

II.1.1. Материнский ствол ориентирован по направлению σ_{HMax}

В условиях отбора флюида при депрессии 3.8 МПа незначительное разрушение проявляется только в клине породы между стволами, таким образом, сочленение является устойчивым.

При дальнейшем увеличении dp до 7.05 МПа в сечении, проходящем через самую широкую часть фишбона при $x = 0.3$ м, в формации наблюдается трещинообразование (рис. 4 а), при этом трещины локализованы в породе вокруг сочленения и не выходят на его контур. В связи с этим следует ожидать повышения проницаемости формации в этих областях. При этом в сечении плоскостями $x = 0.45$ и 0.55 м (рис. 4 б, в) преобладающую роль играют уже сдвиговые нарушения.

В целом, сочленение является устойчивым, однако в материнской скважине вне зоны влияния стыковки

образуются вывалы, размер которых при дальнейшем увеличении перепада давления становится больше 40° (рис. 4 г).

II.1.2. Материнский ствол ориентирован по направлению σ_{Hmin}

Анализ результатов моделирования показывает, что при перепаде давления от качки 3.8 МПа в стенках сочленения образуются критические вывалы (рис. 5). Кроме того, в боковых зонах стыковки скважин происходит гидроразрыв, что можно видеть в сечении в самой широкой области фишбона на рис. 5 а. Отметим, что при продвижении далее по оси x в сечениях $x = 0.45$ м (рис. 5 б), $x = 0.55$ м области трещинообразования исчезают и наблюдаются только сдвиговые вывалы с угловым размером больше 60° .

При этом если рассматривать материнский ствол на удалении от места стыковки, то там наблюдаются лишь незначительные нарушения, то есть сама горизонтальная скважина, направленная вдоль σ_{Hmin} , устойчива.

Установлено, что при уменьшении депрессии на пласт до 1 МПа размер областей разрушений меньше 40° и сочленение становится устойчивым.

II.2. Песчаник с прочностью $UCS = 16$ МПа

Результаты моделирования показывают, что для песчаника с пониженной прочностью опробование пласта с любым перепадом давления приводит к образованию критических вывалов в стенках фишбона, направленного как вдоль σ_{HMax} , так и вдоль σ_{Hmin} . Поэтому были проведены расчеты и проанализировано напряженное состояние породы вокруг сочленения с превышением давления над пластовым во время бурения.

II.2.1. Сочленение ориентировано вдоль σ_{HMax}

Для условий бурения без образования корки безопасного состояния сочленение достигает уже при

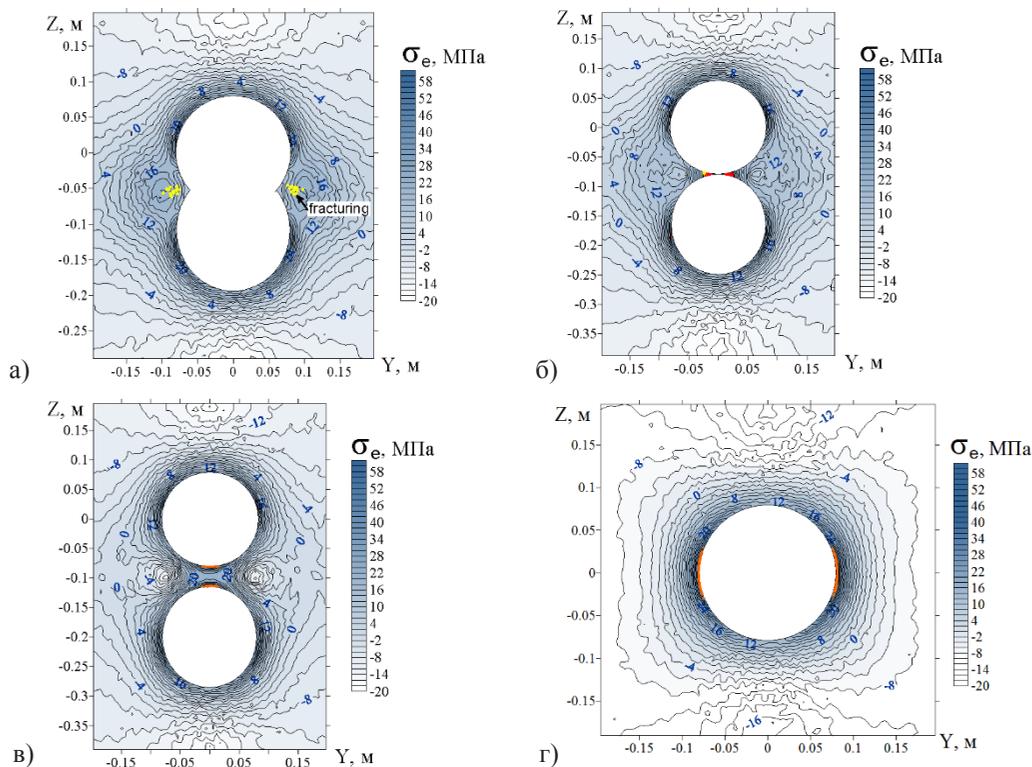


Рис. 4. Области разрушения и распределение параметра σ_e вблизи сочленения при повышении депрессии на пласт до 7.05 МПа в песчанике с $UCS = 33$ МПа при ориентации сочленения вдоль σ_{HMax} . Вертикальные сечения проходят через точки с координатами $x = 0.3$ м (а), 0.45 м (б), 0.55 м (в), -0.45 м (г). Желтой заливкой отмечены области растрескивания

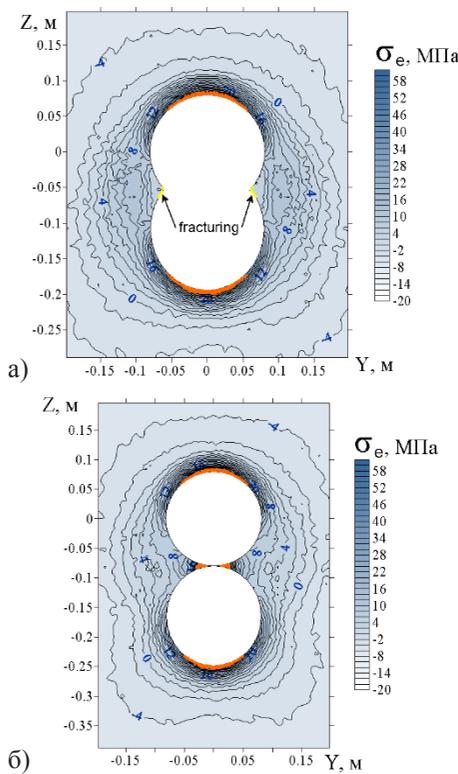


Рис. 5. Области разрушения для сочленения направленного вдоль σ_{hmin} в песчанике с UCS = 33 МПа, при депрессии на пласт 3.8 МПа в сечениях $x = 0.3$ м (а) и $x = 0.45$ м (б)

$dp = 1.5$ МПа. Однако, в материнском стволе на удалении от места зарезки бокового ствола размер вывалов составляет 50° . Уменьшение угла вывалов до значений ниже 40° достигается увеличением перепада давления до 2.5 МПа.

Моделирование с учетом нарастания корки бурового раствора показало, что аналогичного результата по устойчивости можно достичь при $dp = 1.5$ МПа, таким образом перепад давления может быть уменьшен на 1 МПа.

III.2.2. Сочленение направлено вдоль σ_{hmin}
 Для этого варианта области разрушения настолько обширны, что добиться их приемлемого уменьшения можно только со значительным перепадом давления в $dp = 7$ МПа, что является достаточно высоким значением для стандартных буровых растворов. С другой стороны, если бурение идет с нарастанием глинистой корки, то, как показывают расчеты, перепад давления в 4 МПа в этом случае полностью устраняет области разрушения в стенках сочленения, остаются лишь разрушения клина породы между скважинами.

Таким образом, корка бурового раствора в рассматриваемом случае расположения сочленения в хрупком песчанике позволяет уменьшить перепад давления более чем на 40 %.

III. Боковой ствол отклонен под углом 20° от горизонтальной плоскости и по азимуту

III.1. Песчаник с прочностью UCS = 33 МПа

III.1.1. Сочленение направлено вдоль σ_{HMax}

При опробовании пласта с депрессией 3.8 МПа основные вывалы сосредоточены в клине породы между скважинами, в боках же скважин со стороны формации сдвиговых разрушений практически нет. Расчеты показывают, что перепад давления откачки можно повысить до 4.6 МПа (рис. 6), при этом дальнейшее увеличение давления вызывает вывалы с размером больше 40° .

III.1.2. Сочленение направлено вдоль σ_{hmin}

Установлено, что значение депрессии 3.8 МПа для

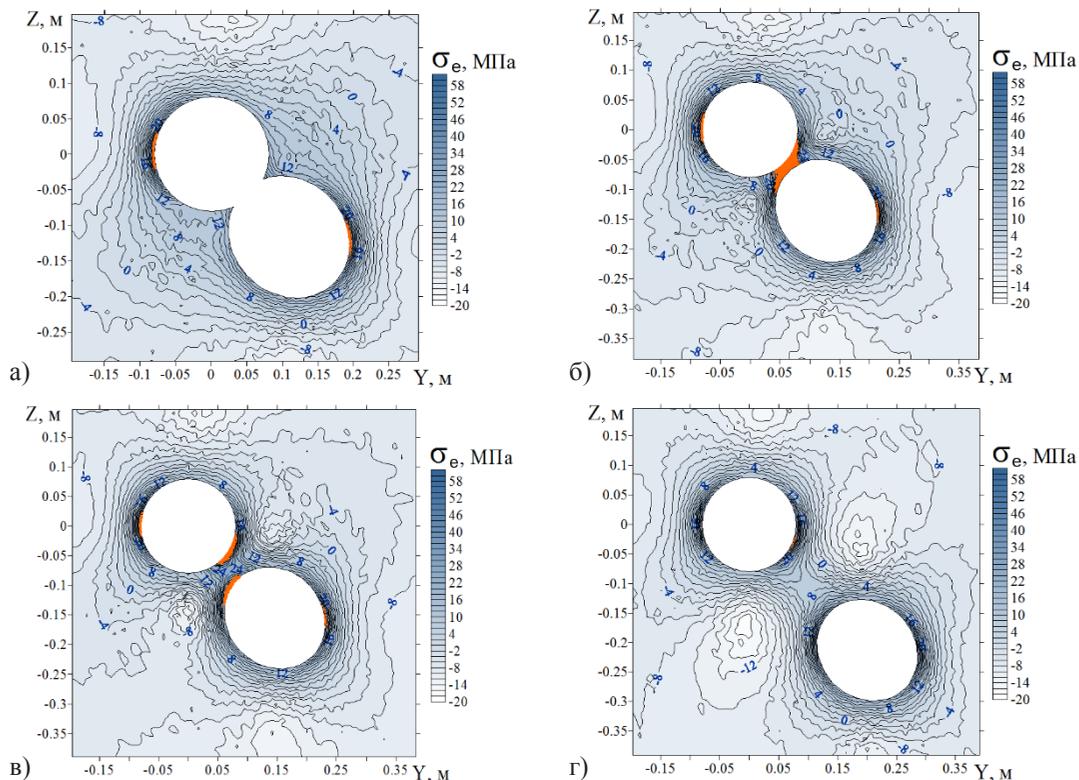


Рис. 6. Области разрушения и распределение параметра σ_e в песчанике с UCS = 33 МПа вблизи сочленения направленного вдоль σ_{HMax} при депрессии на пласт 4.6 МПа. Приведены сечения формации вертикальными плоскостями YZ, проходящими через точки $x = 0.3$ м (а), 0.35 м (б), 0.4 м (в), 0.55 м (г)

такого сочленения является опасным, поскольку вывалы в стенках сочленения больше 40° .

Кроме того, в сочленении, направленном вдоль минимального горизонтального напряжения, образуются трещины гидроразрыва по верхней дуге смыкания скважин.

Уменьшение депрессии до 2 МПа приводит фишбон в устойчивое состояние (рис. 7), при этом в области сочленения все еще наблюдается локализованное образование трещин, что можно видеть на сечении плоскостью $X = 0.2$ м (а).

III.2. Песчаник с прочностью $UCS = 16$ МПа

Анализ результатов расчетов показывает, что при опробовании пласта с любой депрессией сочленение, проходящее в хрупком песчанике, ориентированное как вдоль σ_{HMax} , так и вдоль σ_{hmin} , неустойчиво. В связи с этим для установления безопасных перепадов давлений на контуре сочленения был рассмотрен режим бурения с беспрепятственной фильтрацией в пласт и с образованием корки бурового раствора.

III.2.1. Фишбон направлен вдоль σ_{HMax}

Установлено, что уменьшение областей вывалов до размера меньше 40° происходит, когда перепад давления достигает значения 4 МПа. Однако для таких давлений при свободной фильтрации бурового раствора в формацию образуются протяженные области гидроразрыва вдоль боков скважин, что можно видеть на сечениях YZ , представленных на рис. 8 а, б. Таким образом, сочленение остается неустойчивым.

Между тем, уменьшения размера вывалов до значений меньше 40° можно добиться при бурении с нарастанием корки бурового раствора для перепада давления всего лишь в $dp = 2$ МПа. При этом изолирующее действие корки предохраняет скважины от гидроразрыва.

III.2.2. Фишбон направлен вдоль σ_{hmin}

Установлено, что превышение давления в скважинах в 6.5 МПа над пластовым обеспечивает стабильное состояние сочленения, при этом гидроразрыв на контуре отверстий и в формации не наблюдается.

При бурении с нарастанием корки бурового раствора перепада давления в $dp = 3$ МПа оказывается достаточным, чтобы максимальный угловой размер разрушений в боках скважин уменьшился до 42° . При дальнейшем увеличении давления бурового раствора сочленение становится устойчивым. Качественно конфигурация сдвиговых нарушений в этом случае соответствует представленной на рис. 7, при этом распределение и амплитуды напряжений различны.

Обсуждение результатов

Как мы можем видеть, анализируя результаты расчетов, опробование пласта с характерной для исследуемого интервала прочностью UCS в 33 МПа для фишбонов, ориентированных вдоль максимального горизонтального напряжения, является безопасным для депрессий порядка 3.8 МПа. Из рассматриваемых случаев наиболее устойчиво к увеличению давления откачки сочленение, материнский ствол которого направлен вдоль σ_{HMax} , а боковой – под углом 20° в вертикальной плоскости (вариант II).

Для сочленений, материнский ствол которых направлен вдоль σ_{hmin} в песчанике с $UCS = 33$ МПа, устойчивым на депрессиях порядка 3.8 МПа является только вариант I, в котором боковой ствол отклонен на 20° в горизонтальной плоскости. В остальных случаях перепад давления должен быть уменьшен до 1–2 МПа для обеспечения стабильности фишбона.

Абсолютно очевидным является тот факт, что в случае, когда сочленение оказывается в области песчаников с пониженной прочностью на сжатие до 16 МПа, отбор

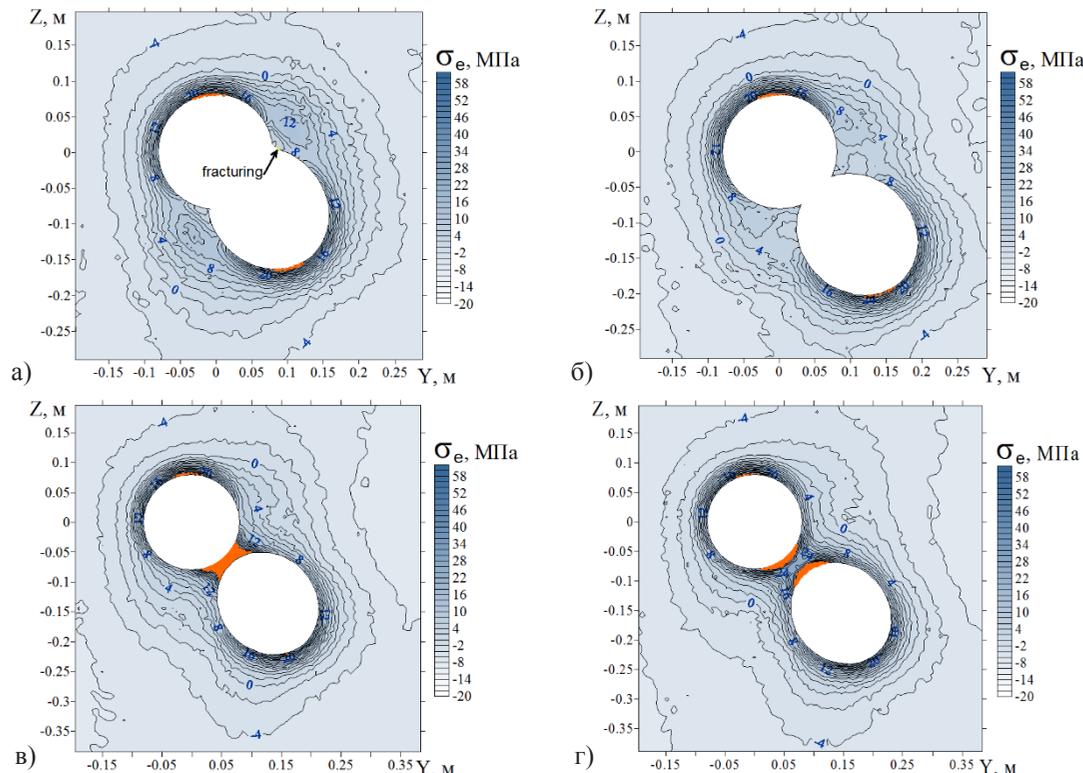


Рис. 7. Области разрушения и изолинии параметра σ_e в песчанике с $UCS = 33$ МПа вблизи сочленения направленного вдоль σ_{hmin} при депрессии на пласт 2 МПа. Приведены вертикальные сечения плоскостями $X = 0.2$ м (а), 0.3 м (б), 0.35 м (в), 0.4 м (з)

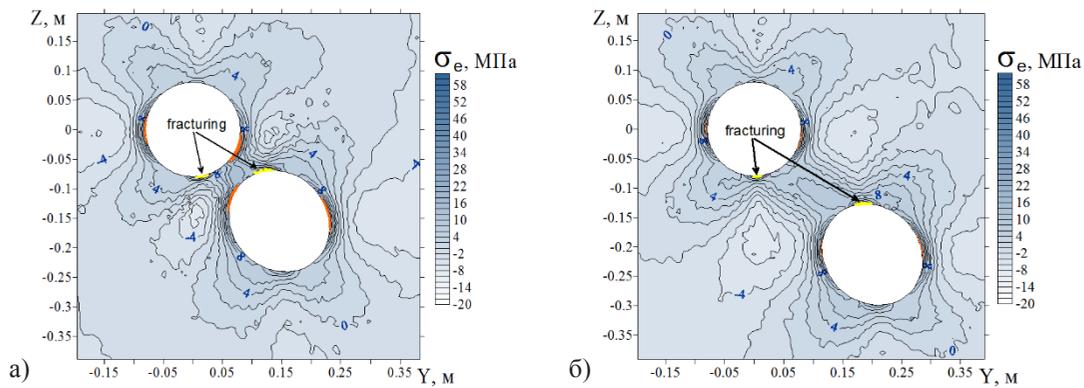


Рис. 8. Области разрушения для сочленения направленного вдоль σ_{Hmax} в песчанике с $UCS = 16$ МПа при бурении без корки бурового раствора с $dp = 4$ МПа в сечениях $x = 0.4$ м (а) и $x = 0.55$ м (б)

пластового флюида с любой депрессией будет вызывать критические разрушения стенок скважин. В связи с этим рекомендуется устанавливать обсадку на область сочленения, если избежать зарезки в таких областях не представляется возможным.

Дальнейшее обсуждение касается только режима бурения сочленения в песчанике с пониженным UCS 16 МПа.

В случае, когда материнский ствол ориентирован вдоль σ_{Hmax} бурение боковых стволов, имеющих отклонение в 20° по горизонтали и вертикали (варианты I, II) не принесет существенных проблем, если будет осуществляться с превышением давления в 4.0 и 2.5 МПа над пластовым, соответственно.

Бурение с образованием слабопроницаемой корки бурового раствора для тех же условий, позволяет уменьшить перепад давления на 37–40 %.

Для варианта III, когда боковой ствол отклонен под углом 20° в горизонтальной и вертикальной плоскости, безопасного режима бурения с беспрепятственной фильтрацией в пласт не существует, в связи с возникновением протяженной области гидроразрыва в боках сочленения. Только бурение с нарастанием корки бурового раствора устраняет проблему и обеспечивает стабильное состояние стенок фишбона при перепаде давления 2 МПа.

В ситуации, когда материнский ствол направлен вдоль σ_{Hmin} области разрушения имеют значительный угловой размер, и добиться их уменьшения возможно только существенным увеличением давления в скважинах. Здесь особым случаем является вариант I с расположением бокового ствола под углом 20° в горизонтальной плоскости, поскольку устойчивость стенок достигается при этом для перепада давления 4.5 МПа. В остальных случаях превышение давления в скважине над пластовым должно составлять 6.5–7.0 МПа, что затруднительно осуществить при используемых на месторождении буровых растворах. Показано, что в вариантах II, III бурение с нарастанием слабопроницаемой корки позволяет уменьшить перепад давления на скважинах на 42–53 %. В варианте I перепад давления может быть уменьшен на 33 %.

Заключение

С помощью трехмерного порупругого моделирования области стыковки скважин определены диапазоны перепадов давлений, при которых возможно опробование пласта, для каждого конкретного случая. В ситуации, когда формирование сочленения происходит в песчанике

с пониженной прочностью, установлены безопасные перепады давления при бурении. Показано, что образование корки бурового раствора является в определенных случаях единственным способом безопасно пробурить фишбон. Кроме того, формирование слабопроницаемого слоя на стенках сочленения позволяет понизить перепад давления до 50 %, достигнув при этом разумных значений давления в скважинах.

Литература

- Еременко С.Ю. (1991). Методы конечных элементов в механике деформируемых тел. Харьков: Основа, 272 с.
- Кашеваров А.А., Ельцов И.Н., Эпов М.И. (2003). Гидродинамическая модель формирования зоны проникновения при бурении скважин. Прикладная механика и техническая физика, 44(6), с. 148–157.
- Рудяк В.Я., Серяков А.В., Манаков А.В. (2013). Совместное моделирование процессов геомеханики и фильтрации в прискважинной зоне во время бурения. Сборник трудов конференции: Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск: ИГД СО РАН, т. 1, с. 383–388.
- Савин Г.Н. (1968). Распределение напряжений около отверстий. Киев: Наукова Думка, 891 с.
- Фадеев А.Б. (1987). Метод конечных элементов в геомеханике. М: Недра, 221 с.
- Aadnoy B.S., Edland C. (2001). Borehole stability of multilateral junctions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 30, pp. 245–255. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(01\)00137-1](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(01)00137-1)
- Aadnoy B.S., Froitland T.S. (1991). Stability of adjacent boreholes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 6, pp. 37–43. [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(91\)90022-F](https://doi.org/10.1016/0920-4105(91)90022-F)
- Akhmetov M., Maximov M., Lymarev M., Malyshev Ye., Vasilyev R., and N. Glushenko, F. Rakhmangulov, and D. Frolov (2019). Drilling Extended Reach Well with Eight Fishbone Sidetracks: East Messoyakha Field. *Proceedings of the SPE Russian Petroleum Technology Conference*, Moscow, Russia. <https://doi.org/10.2118/196788-RU>
- Alchibaev D.V., Glazyrina A.Ye., Ovcharenko Yu.V., Kalinin O.Yu., Lukin S.V., Martemyanov S.V., Zhigulskiy S.V., Chebyshev I.S., and A.V. Sidelnik., I.Sh. Bazyrov (2017). Application of 3D and Near-Wellbore Geomechanical Models for Well Trajectories Optimization. *Proceedings of the SPE Russian Technology Conference*, Moscow, Russia. <https://doi.org/10.2118/187830-RU>
- Bargui H., and Y. Abousleiman (2000). 2D and 3D elastic and poroelastic stress analyses for multilateral wellbore junctions. *Proceedings of the 4th North American rock mechanics symposium*, Seattle, Washington, US. ARMA-2000-0261.
- Bayfield M., Fisher S.L., and L.M. Ring (2000) Burst and collapse of a sealed multilateral junction: Numerical simulations. *SPE Drill. & Completion*, 15(2). <https://doi.org/10.2118/63813-PA>
- Brister A.R. (1997) Analyzing a multi-lateral well failure in the east Wilmington field of California. *Proceedings of the SPE Western Regional Meeting*, California. <https://doi.org/10.2118/38268-MS>
- Detournay E., Cheng A.H.-D. (1993). Fundamentals of poroelasticity. Chapter 5. *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects*. Vol. II. Analysis and Design Method. Pergamon Press, pp. 113–171. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-040615-2.50011-3>
- Haddon R.A.W. (1966). Stresses in an infinite plate with two unequal

circular holes. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, XX(3), pp. 277–291. <https://doi.org/10.1093/qjmam/20.3.277>

Ling C-H (1948). On the stresses in a plate containing two circular holes. *Journal of Applied Physics*, 19(1), pp. 77–82. <https://doi.org/10.1063/1.1697875>

Mohamad-Hussein A., Heiland J. (2018). 3D finite element modeling of multilateral junction wellbore stability. *Petroleum Science*, 15, pp. 801–814. <https://doi.org/10.1007/s12182-018-0251-0>

Papanastasiou P., Sibai M., Heiland J., Shao J. F., Cook J., Fourmaintraux D., Onaisi A., Jeffryes B., and P. Charlez (2006). Stability of a Multilateral Junction: Experimental Results and Numerical Modeling. *SPE Drill & Completion*, 21, pp. 4–11. <https://doi.org/10.2118/78212-PA>

Zoback M.D. (2010). *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press, 449 p.

Сведения об авторах

Александр Викторович Серяков – научный сотрудник, канд. техн. наук, Бейкер Хьюз, Новосибирский технологический центр

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Кутателадзе, д. 4А

Максим Юрьевич Подберезный – технический советник, канд. физ.-мат. наук, ВНИИНефть

Россия, 127422, Москва, Дмитровский проезд, д. 10

Статья поступила в редакцию 09.07.2022;

Принята к публикации 24.08.2022; Опубликована 30.03.2023

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Estimation of the fishbone optimal orientation for a Yamalo-Nenets Autonomous District oilfield

A. V. Seryakov^{1*}, *M. Yu. Podberezhny*²

¹*Baker Hughes, Novosibirsk, Russian Federation*

²*VNIINEft, Moscow, Russian Federation*

*Corresponding author: Alexander V. Seryakov, e-mail: rednex@yandex.ru

Abstract. The objective is the junction zone of the multilateral fishbone wellbores planned at the Yamalo-Nenets Autonomous District oilfield. Reservoir rock stability around the junction area is estimated with the help of the full coupled 3D poroelastic modeling. In order to determine the optimal fishbone location, the different cases with the various sidetrack inclination, parent well orientation along the maximal and minimal horizontal stresses with the condition of sidetracking in the rock with standard and reduced strength were simulated. The permissible depression and reposition values were estimated for each fishbone configuration. For the cases with unstable junction the safe pressure drop and overbalance for drilling regime were determined. It was shown that in the case when mudcake is formed on the wellbores wall the pressure drop can be essentially decreased with fishbone stability retention.

Keywords: fishbone, well design optimization, junction zone stability, poroelastic modeling, mudcake, sandstone strength

Recommended citation: Seryakov A.V., Podberezhny M.Yu. (2023). Estimation of the fishbone optimal orientation for a Yamalo-Nenets Autonomous District oilfield. *Georesursy = Georesources*, 25(1), pp. 130–139. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.1.13>

References

Aadnoy B.S., Edland C. (2001). Borehole stability of multilateral junctions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 30, pp. 245–255. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(01\)00137-1](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(01)00137-1)

Aadnoy B.S., Froiland T.S. (1991). Stability of adjacent boreholes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 6, pp. 37–43. [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(91\)90022-F](https://doi.org/10.1016/0920-4105(91)90022-F)

Akhmetov M., Maximov M., Lymarev M., Malyshev Ye., Vasilyev R., and N. Glushenko, F. Rakhmangulov, and D. Frolov (2019). Drilling Extended Reach Well with Eight Fishbone Sidetracks: East Messoyakha Field. *Proceedings of the SPE Russian Petroleum Technology Conference*, Moscow, Russia. <https://doi.org/10.2118/196788-RU>

Alchibaev D.V., Glazyrina A.Ye., Ovcharenko Yu.V., Kalinin O.Yu., Lukin S.V., Martemyanov S.V., Zhigulskiy S.V., Chebyshev I.S., and A.V. Sidelnik, I.Sh. Bazyrov (2017). Application of 3D and Near-Wellbore Geomechanical Models for Well Trajectories Optimization. *Proceedings of the SPE Russian Technology Conference*, Moscow, Russia. <https://doi.org/10.2118/187830-RU>

Bargui H., and Y. Abousleiman (2000). 2D and 3D elastic and poroelastic stress analyses for multilateral wellbore junctions. *Proceedings of the 4th North American rock mechanics symposium*, Seattle, Washington, US. ARMA-2000-0261.

Bayfield M., Fisher S.L., and L.M. Ring (2000) Burst and collapse of a sealed multilateral junction: Numerical simulations. *SPE Drill. & Completion*, 15(2). <https://doi.org/10.2118/63813-PA>

Brister A.R. (1997) Analyzing a multi-lateral well failure in the east Wilmington field of California. *Proceedings of the SPE Western Regional Meeting*, California. <https://doi.org/10.2118/38268-MS>

Detournay E., Cheng A.H.-D. (1993). Fundamentals of poroelasticity. Chapter 5. *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects*. Vol. II. Analysis and Design Method. Pergamon Press, pp. 113–171. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-040615-2.50011-3>

Eremenko S.Yu. (1991). *Finite Element Method in Solid Mechanics*. Kharkov: Osnova, 272 p. (In Russ.)

Fadeev A.B. (1987). *Finite Element Method in Geomechanics*. Moscow: Nedra, 221 p. (In Russ.)

Haddon R.A.W. (1966). Stresses in an infinite plate with two unequal circular holes. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, XX(3), pp. 277–291. <https://doi.org/10.1093/qjmam/20.3.277>

Kashevarov A.A., El'tsov I.N., Epov M.I. (2003). Hydrodynamics model of invasion zone formation while borehole drilling. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 44(6), pp. 148–157. (In Russ.)

Ling C-H (1948). On the stresses in a plate containing two circular holes. *Journal of Applied Physics*, 19(1), pp. 77–82. <https://doi.org/10.1063/1.1697875>

Mohamad-Hussein A., Heiland J. (2018). 3D finite element modeling of multilateral junction wellbore stability. *Petroleum Science*, 15, pp. 801–814. <https://doi.org/10.1007/s12182-018-0251-0>

Papanastasiou P., Sibai M., Heiland J., Shao J. F., Cook J., Fourmaintraux D., Onaisi A., Jeffryes B., and P. Charlez (2006). Stability of a Multilateral Junction: Experimental Results and Numerical Modeling. *SPE Drill & Completion*, 21, pp. 4–11. <https://doi.org/10.2118/78212-PA>

Rudyak V.Ya., Seryakov A.V., Manakov A.V. (2013). Joint modeling of the geomechanics and filtration processes in near-wellbore zone while drilling. *Proceedings of the conference «Geodynamics and Stressed State of the Earth Interior» 3-6 October 2011, MISD RAS, Novosibirsk, Russia*. Vol.1. PP.383-388. (In Russ.)

Savin G.N. (1968). *Raspredelenie napryazheniy okolo otverstiy*. Kiev: Naukova Dumka, 891 p. (In Russ.)

Zoback M.D. (2010). *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press, 449 p.

About the Authors

Alexander Viktorovich Seryakov – Researcher, Cand. Sci. (Engineering), Baker Hughes, Novosibirsk Technology Center 4A, Kutateladze st., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Maxim Yuriyevich Podberezhny – Technical Advisor, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), VNIINEft

10, Dmitrovsky pas., Moscow, 127422, Russian Federation

Manuscript received 9 June 2022;

Accepted 24 August 2022; Published 30 March 2023