

Устойчивость зоны сочленения соосных скважин различного диаметра (на примере месторождения Ханты-Мансийского автономного округа)

А.В. Серяков^{1*}, М.Ю. Подбережный², О.Б. Бочаров¹, М.А. Азаматов³

¹АО Бейкер Хьюз, Новосибирский технологический центр, Новосибирск, Россия

²Газпромнефть-ГЕО, Санкт-Петербург, Россия

³Салым Петролеум Девелопмент Н.В., Москва, Россия

В работе рассматривается устойчивость стенок скважины в области перехода из большего ствола в меньший для различных диаметров отверстий. Для определения формы областей и характера разрушения выполнено трехмерное пороупругое моделирование напряженного состояния породы вокруг сочленения соосных скважин с учетом образования корки бурового раствора на стенках. Геомеханическая модель учитывает анизотропию деформационных свойств среды, которая характерна для прибрежно-морских коллекторов Западной Сибири. Разрушение оценивается по критерию Мора-Кулона с учетом условия разрушения на разрыв. Рассматривается вертикальное и наклонное сочленение на глубине 2 км, расположенное в песчаном пласте, для которого известны пороупругие анизотропные свойства. Выполнен анализ напряженного состояния и порового давления при изменении перепада давления на стенках от 1 до 70 атм для сочленений с различными соотношениями диаметров скважин. Для вертикального и наклонного сочленения определены безопасные границы изменения давления бурового раствора. Установлено, что характер разрушения при изменении давления в скважине для сочленения меньших диаметров в целом схож со случаем больших диаметров; наблюдаются лишь незначительные различия в форме областей разрушения. Показано, что для вертикальной скважины сочленение более устойчиво к повышению давления бурового раствора, чем в наклонном случае, поскольку в последнем инициируется гидроразрыв вдоль верхней и нижней частей скважины. Выявлено, что в вертикальном сочленении скважина меньшего диаметра устойчивее к понижению давления бурового раствора, чем основной ствол. В наклонном сочленении при увеличении давления на забое более устойчивой является скважина большего диаметра.

Ключевые слова: сочленение соосных скважин, пороупругое моделирование, вертикальная и наклонная скважина, песчаный коллектор, анизотропия, разрушение

Для цитирования: Серяков А.В., Подбережный М.Ю., Бочаров О.Б., Азаматов М.А. (2020). Устойчивость зоны сочленения соосных скважин различного диаметра (на примере месторождения ХМАО). *Георесурсы*, 22(3), с. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.69-78>

Введение

При поисково-разведочном бурении (особенно при использовании мобильных буровых установок) часто возникает ситуация, когда необходимо продолжить углублять скважину (отбирать керн и записывать ГИС), но мощности установки не хватает в случае использования инструмента текущего диаметра. Из данной ситуации возможно выйти путем перехода на буровой инструмент меньшего диаметра, оставив открытым ствол, пробуренный до этого долотом большего диаметра. Актуальным здесь является вопрос об устойчивости зоны сочленения скважин различных диаметров (рис. 1), поскольку интенсивное откалывание пород стенки скважины ведет к оседанию разрушенного материала на забой.

При последовательном отборе керна куски отколовшейся породы вызывают образование сальников в керноприемнике, приводят к заклиниванию керна и проведению дополнительных спускоподъемных операций. Расширение скважины до основного диаметра после

операций керноотбора и ГИС также требует оценки устойчивости сочленения.

Проблема устойчивости зоны соосного сочленения скважин разных диаметров является актуальной при разведочном бурении с отбором керна, однако постановка, описание и подходы к решению задачи не отражены в литературных источниках. Следует отметить, что существуют похожие задачи по оценке прочности соединений труб при повышении внутреннего давления или при воздействии внешней нагрузки (например, Грогуленко, 2017) которые решаются с помощью коммерческих пакетов, использующих упругопластические модели

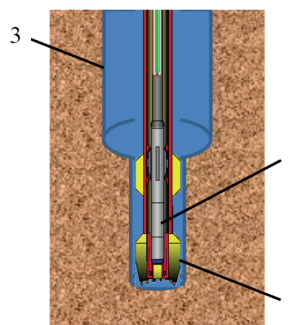


Рис. 1. Форма сочленения, образующаяся при отборе керна в керноприемник (1) в случае, когда диаметр буровой головки (2) меньше, чем основной ствол (3).

* Ответственный автор: Александр Викторович Серяков
E-mail: alexander.seryakov@bakerhughes.com

деформирования. Однако такая постановка не описывает физические процессы вокруг области стыковки скважин в пористой проницаемой горной породе на километровой глубине.

Исследование устойчивости зоны сочленения в проницаемом коллекторе необходимо проводить с помощью пороупругого моделирования с учетом неоднородности действующих напряжений, анизотропии породы, фильтрации бурового раствора в формацию с образованием корки бурового раствора.

Следует отметить, что двумерные подходы по оценке напряженного состояния и порового давления в прискважинной зоне (Cui et al., 1997, Liu et al., 2018) здесь имеют ограниченное применение, поскольку распределение напряжений вблизи плоскости состыковки будет существенно трехмерным, особенно в наклонных скважинах.

Поро-упруго-пластическое моделирование было успешно применено для анализа устойчивости зоны сочленения многоствольных скважин в работе (Mohamad-Hussein, Neiland, 2018). Авторы используют модель упрочняющегося пористого материала и пластическую поверхность на основе критерия разрушения Мора-Кулона.

В данной статье рассматривается более простой случай стыковки скважин и используется вертикально трансверсально-изотропная пороупругая модель с учетом формирования корки бурового раствора на стенке для определения эффективных напряжений и оценки разрушения по критерию Мора-Кулона.

Целью моделирования является определение верхней и нижней границ давления бурового раствора, при котором сочленение устойчиво, то есть разрушения в стенках скважин минимальны.

Характеристика пород

Моделирование было проведено для геологических пород неокомского возраста (пласты АС) месторождений Сургутского свода. Данные породы характеризуются прибрежно-морскими условиями осадконакопления. Коллекторы пластов АС сложены алевролитовыми песчаниками (рис. 2) с пористостью 13–20 %, проницаемостью 10–100 мД, породы-покрышки представлены аргиллитоподобными глинами. Результаты кросс-дипольных акустических, электромагнитных измерений и анализов керна показывают наличие анизотропных свойств данных пород (коэффициент анизотропии 1–10 %).

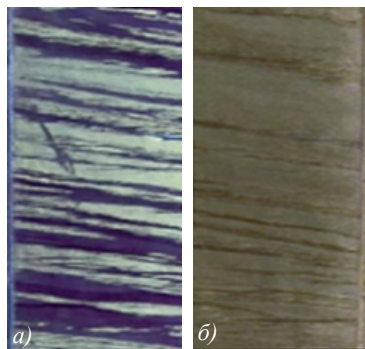


Рис. 2. Алевролитистый песчаник с линзовидно-слоистой текстурой; а) ультрафиолетовый свет; б) дневной свет

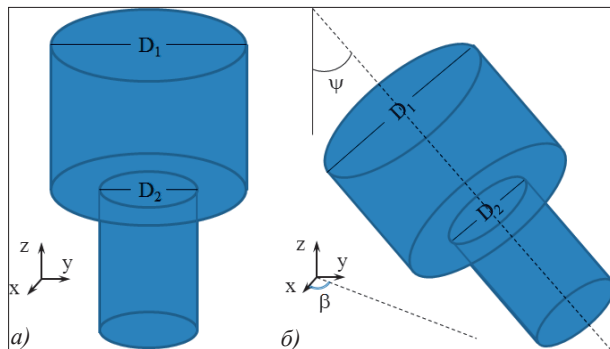


Рис. 3. Модельное представление участка перехода из большего диаметра в меньший; а) вертикальная скважина, б) наклонная скважина

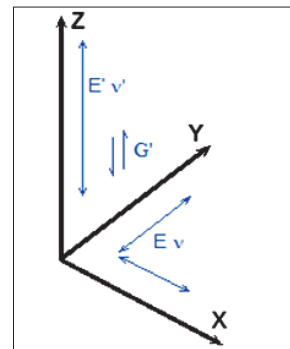


Рис. 4. Схематичное изображение действия трансверсально-изотропных модулей в сплошной среде

В этом случае, как показано в работе (Серяков и др., 2018), анализ устойчивости вертикальных и наклонных скважин необходимо проводить с учетом анизотропии пороупругих свойств.

Постановка задачи

Рассматривается песчаный коллектор, залегающий на фиксированной глубине 2400 м.

При обработке экспериментальных данных по сжатию керна установлено, что деформирование породы лучше всего описывается пороупругой трансверсально-изотропной моделью.

Моделируется вертикальная и наклонная секция открытой скважины в области перехода из большего диаметра D_1 в меньший D_2 (рис. 3). Наклонное сочленение характеризуется углом ψ с вертикальной осью и азимутальным углом β с направлением действия максимального горизонтального напряжения – осью X . Значения углов следующие: $\psi = 60^\circ$, $\beta = 25^\circ$. Рассматривается два характерных случая перехода из большего диаметра в меньший: I. $D_1 = 220$ мм, $D_2 = 160$ мм; II. $D_1 = 160$ мм, $D_2 = 120$ мм.

Предполагается, что обе секции скважины в области сочленения находятся под одинаковым давлением бурового раствора P_b , которое превышает пластовое давление P_0 на величину dP . Предыдущие работы по интерпретации электромагнитных измерений на месторождениях ХМАО показали, что на стенке скважины во время бурения образуется слабопроницаемая корка бурового раствора. Лабораторные исследования, представленные, в частности, в публикации (Podberzhny et al., 2017), определяют проницаемость этого слоя в 0.001 мД. При моделировании сочленения использовалась модель нарастания корки бурового раствора, идентичная (Podberzhny et al., 2017).

Пороупругая модель

Для определения напряженно-деформированного состояния пород вокруг сочленения использовалась вертикально трансверсально-изотропная пороупругая модель, детально описанная в (Cheng, 1997), с упрощениями, представленными в (Серяков и др., 2018). Модель характеризуется однородными свойствами в плоскости, перпендикулярной оси симметрии Z , которую в геологической среде удобно выбирать совпадающей с направлением напластования пород. Для описания деформирования упругой матрицы породы необходимо, чтобы были заданы пять констант:

два модуля Юнга E, E' , два коэффициента Пуассона ν, ν' , и один модуль сдвига G' (рис. 4). Моделирование проводится для фиксированной глубины, на которой восстановленные значения констант следующие:

$$E' = 12 \text{ ГПа}, E = 13 \text{ ГПа}, \nu' = 0.16, \nu = 0.17, G' = 5.17 \text{ ГПа}.$$

Проницаемость среды выбрана равной $k = 50$ мД.

Коэффициент Био-Виллиса α для прибрежно-морских коллекторов ХМАО равен 0.95. Он определен по результатам кросс-дипольных измерений, плотностного каротажа и уточнен с помощью данных по микро-гидрофрагменту пласта. Дополнительные пороупругие константы получены из основных зависимостей линейной теории пороупругости с использованием коэффициента объемного сжатия материала скелета, сжимаемости флюида и пористости. Формулы для констант в подробном виде можно найти в (Бочаров, 2016). Учитывая, что пористость $\phi = 0.23$, объемный коэффициент сжатия скелета $K'_s = 36$ ГПа, сжимаемость флюида $K_f = 3$ ГПа, получим коэффициент Скемптона $B = 0.5$ и модуль Био $M = 13.38$ ГПа.

Начальное напряженное состояние вокруг скважины берется из геофизических данных по региональному распределению напряжений, скорректированных на измерения по микрогидрофрагменту пласта. Поровое давление оценивается по результатам интерпретации каротажа. Напряжения на фиксированной глубине имеют следующие значения: $\sigma_v = \sigma_{zz} = 54$ МПа, $\sigma_{HMax} = \sigma_{xx} = 36$ МПа, $\sigma_{hmin} = \sigma_{yy} = 34$ МПа. Поровое давление в пласте $P_0 = 25$ МПа. Соотношения вертикальных и горизонтальных напряжений указывают на то, что месторождение разрабатывается в условиях нормального трещинообразования (Zoback, 2010).

При моделировании напряженного состояния сочленения под давлением учитывалось нарастание корки бурового раствора со следующими физическими свойствами: проницаемость корки $k_c = 0.001$ мД, пористость $\phi_c = 0.3$, концентрация взвешенных частиц в буровом растворе 6%.

Помимо корки внутри скважины, учитывалось засорение прискважинной зоны частицами бурового раствора. Для этого проницаемость формации в пределах 1 см от контура скважины полагалась равной $k_d = 5$ мД ($= 0.1k$).

Использование трансверсально-изотропной модели для деформирования породы предполагает также использования критерия разрушения, в котором прочность материала зависит от угла наклона рассматриваемой площадки к плоскости напластования (Ашихмин, 2018; Гениев, 1993). Однако, ввиду отсутствия экспериментальных данных по определению прочности образцов по различным направлениям, на первом этапе исследований был применен изотропный критерий Кулона-Мора:

$$\sigma_1 - \sigma_3 \text{ctg}\psi = C_0, \quad (1)$$

где σ_1, σ_3 – главные эффективные напряжения, $\text{ctg}\psi = (1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi)$, ϕ – угол внутреннего трения, C_0 – предел прочности породы на одноосное сжатие. При анализе поврежденности породы мы рассматриваем функцию эквивалентного напряжения $\sigma_e = \sigma_1 - \sigma_3 \text{ctg}\psi$, которая удобна для визуализации и сравнения с C_0 . Параметры разрушения песчаника получены из экспериментов по сжатию зерна, извлеченного с исследуемой глубины, и равняются: $\phi = 30^\circ$, $C_0 = 17$ МПа. Предел прочности на отрыв σ_T для песчаника выбран 1 МПа. Тип разрушения определяется в зависимости от соотношений главных

напряжений и расположения относительно кривой пластичности (Фадеев, 1987), определяемой (1) и условием отрыва:

$$\sigma_1 < -\sigma_T, \quad (2)$$

где мы придерживаемся соглашения, что растягивающие напряжения отрицательные. Таким образом, если напряженное состояние среды находится в области пластичности, то в породе могут реализоваться либо условия сдвигового нарушения (breakouts), либо гидроразрыва (hydrofracturing).

Расчеты выполнены на конечноэлементном комплексе Geofluid, принцип работы итерационного алгоритма которого описан, в частности, в (Рудяк и др., 2013).

Результаты моделирования

Рассматриваются два типа сочленений по соотношению диаметров, при этом сочленения могут быть как вертикальными, так и наклонными. Моделирование устойчивости для каждого начинается с базового варианта, в котором значения перепада давления на стенке скважины dP равняется 40 атм, что соответствует «стандартному» превышению давления при бурении на глубине 2400 метров на месторождениях углеводородов в ХМАО. Последующие расчеты проводятся при уменьшении и увеличении перепада давления от базового варианта с шагом в 5–10 атм. Диапазон изменения dP – от 1 до 70 атм.

Визуализация разрушений и поля эквивалентного напряжения в трехмерной области осуществляется по сечениям плоскостями XY, YZ, XZ. Для вертикального сочленения эти плоскости совпадают с исходными координатными плоскостями, для наклонного сочленения развернуты под теми же углами, что и ось скважин (рис. 5).

Сечения XY характеризуются расстоянием h от верхнего сечения, перпендикулярного оси скважины, до исследуемой плоскости. Расстояние от верхнего до нижнего перпендикулярного сечения моделируемой области составляет 2 метра, плоскость перехода от большего диаметра к меньшему соответствует $h = 1.0$ м.

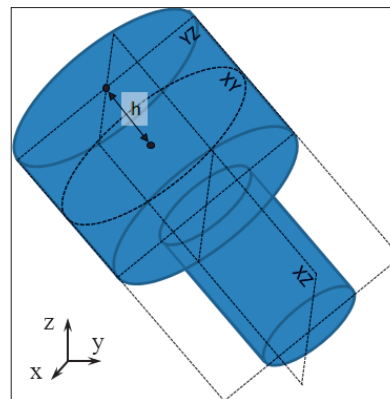


Рис. 5. Сечения плоскостями, по которым производится визуализация параметров разрушения для 3D модели

Вертикальное сочленение

Стандартный перепад давления формирует локальную по глубине концентрическую область сдвигового разрушения, образующуюся вблизи места состыковки сочленения 220/160 мм в скважине большего радиуса (рис. 6). Данный рисунок и последующие содержат изолинии параметра σ_e , где синим шрифтом приводятся значения эквивалентного

напряжения в МПа. Красной заливкой обозначены области сдвигового разрушения.

Учитывая локальный характер разрушения и тот факт, что протяженность области по стенке скважины вдоль оси z составляет порядка 5 см, данное сочленение можно считать условно устойчивым.

Анализируя результаты моделирования для соотношений диаметров 160/120 мм и такого же перепада давления (рис. 7), можно отметить сходный характер разрушения, хотя распределение эквивалентного напряжения в области изменилось по сравнению со случаем 220/160 мм.

Действительно, происходит перераспределение напряжений формации на уровне $h = 1$ м (место сочленения). Различия в напряжении σ_e для рассматриваемых вариантов соотношений диаметров могут превышать 50 %. Кроме того, для случая 160/120 мм возрастают градиенты напряжений – их изменение более резкое, чем для случая 220/160 мм. Однако вдали от уступа в срединных сечениях скважин ($h = 0.5$ м, $h = 1.5$ м), поведение параметра σ_e плавное, а различия между двумя случаями не превышают 12 %.

При уменьшении перепада давления dP до 35 атм область разрушения вокруг большего диаметра начинает распространяться ниже в формацию, образуя полукольца (рис. 8).

Аналогичные изменения происходят и в формации вокруг сочленения 160/120 мм (рис. 9) при переходе от $dP = 40$ к $dP = 35$ атм, однако в этом случае кольцо под секцией скважины большего диаметра полностью замкнуто.

Таким образом, следует ожидать откалывания и выпадения в скважину концентрических кусков породы при бурении с открытой скважиной.

Дальнейшее уменьшение перепада давления приводит к расширению области сдвигового разрушения в формацию, а также к распространению нарушений вдоль стенок скважины большего и меньшего диаметра (рис. 10). Таким образом, при бурении с перепадом давления, меньшим 40 атм, стенки сочленения становятся неустойчивыми.

Увеличение dP до 55 атм приводит к уменьшению областей разрушения в секции большего диаметра. Кольцо разрушенного материала при этом размыкается, как можно видеть на рис. 11. Отметим, что в сочленении диаметров 160/120 мм ширина областей разрушения меньше (рис. 11, в).

Дальнейшее увеличение dP до 60 атм приводит к полному исчезновению областей разрушения для вертикальных сочленений. Следует отметить, что даже увеличение dP до 70 атм не вызывает образование отрывных нарушений (гидроразрыва).

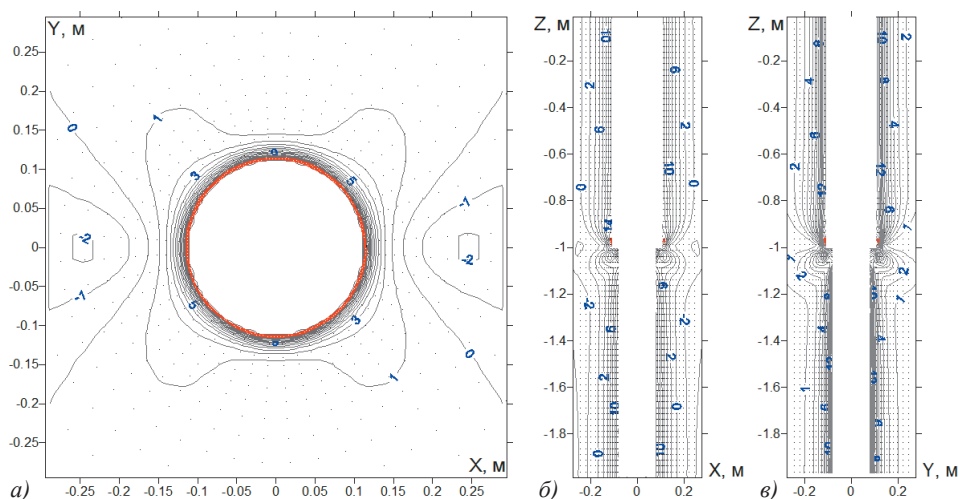


Рис. 6. Области разрушения в вертикальном сочленении 220/160 мм при $dP = 40$ атм в плоскостях XY (а, $h = 0.99$ м), XZ (б), YZ (в). Уровни изолиний напряжений σ_e (МПа) подписаны синим цветом.

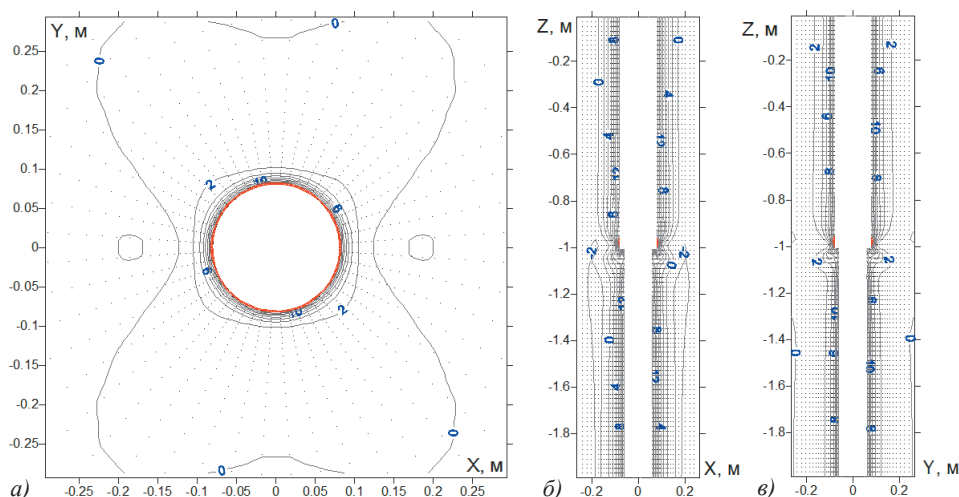


Рис. 7. Области разрушения в вертикальном сочленении 160/120 мм при $dP = 40$ атм в плоскостях XY (а, $h = 0.99$ м), XZ (б), YZ (в).

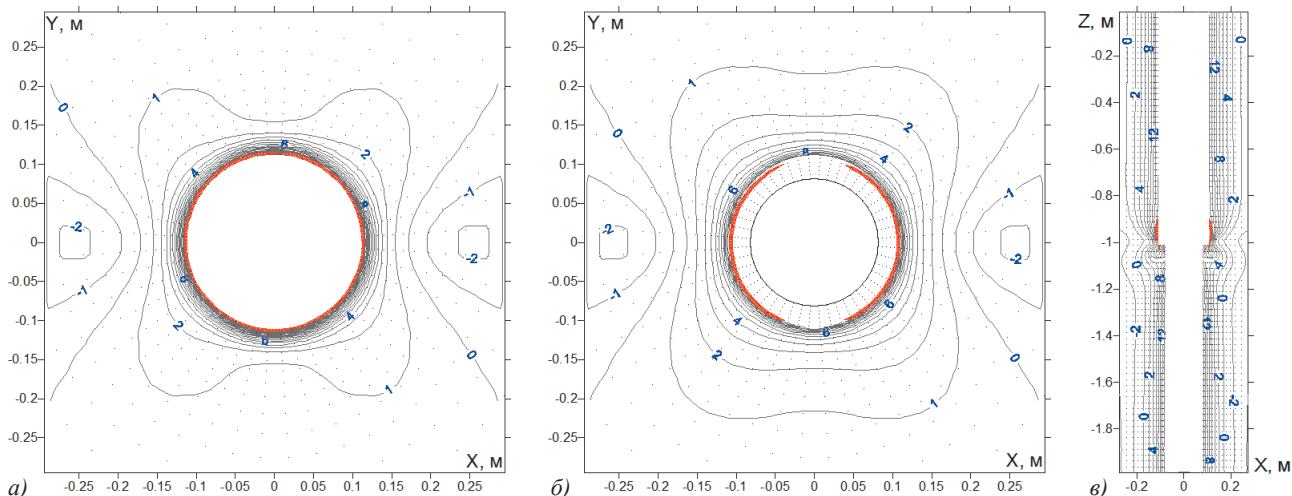


Рис. 8. Развитие областей разрушения в вертикальном сочленении 220/160 мм при уменьшении dP до 35 атм. Сечения XY даны для $h = 0.99$ м (а), $h = 1.01$ м (б). Вертикальную протяженность разрушения можно оценить по сечении XZ (в).

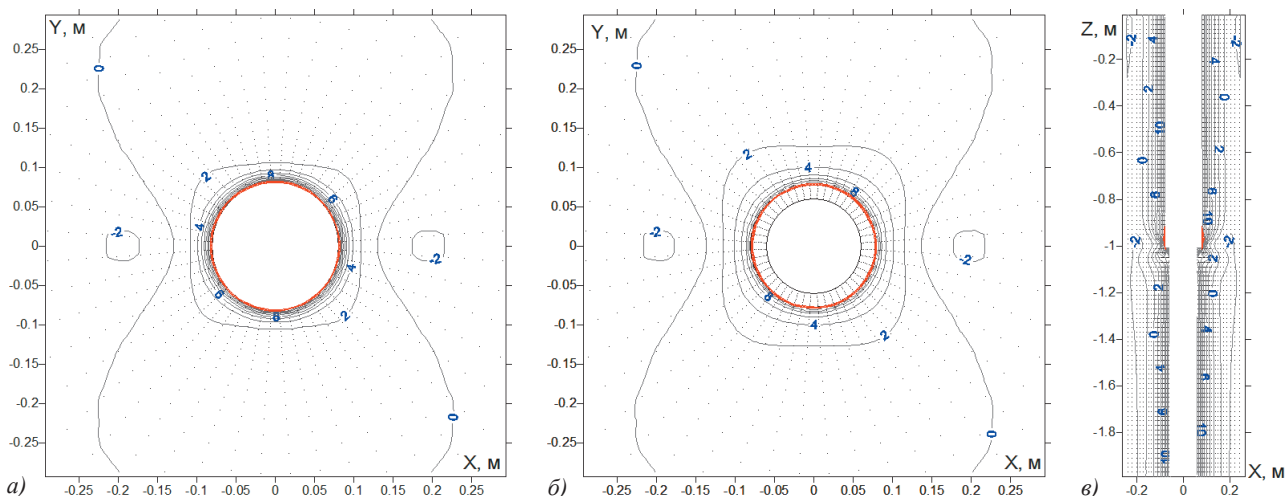


Рис. 9. Области нарушений для $dP = 35$ атм в формации вокруг сочленения 160/120 мм. Расстояния h для сечений XY равняются 0.99 м (а) и 1.01 м (б). Сечение XZ (в) дает представление о вертикальной длине области.

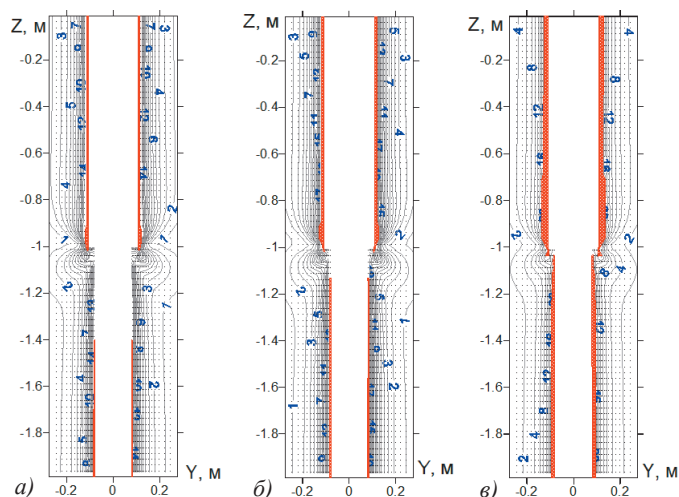


Рис. 10. Увеличение областей сдвигового разрушения в сечении YZ для сочленения 220/160 мм при уменьшении перепада давления dP до значений 30 атм (а), 20 атм (б) и 1 атм (в).

Наклонное сочленение

Рассмотрим теперь характер разрушения в наклонных сечениях скважин.

В случае 220/160 мм, при характерном перепаде давления $dP = 40$ атм на стенках скважины большего и меньшего диаметров индуцируются сдвиговые нарушения (рис. 12), что можно видеть по сечениям XY , взятым на расстоянии $h = 0.99$ м (а) и $h = 1.01$ м (б). Кроме того, на уступе сечения меньшего диаметра формируется область отрывного разрушения, обозначенная контуром с желтой заливкой на рис. 12, б, г. Протяженность сдвиговых областей в формации параллельно оси скважин удобно отслеживать по сечению XZ , поскольку оно преимущественно направлено по направлению действия минимального горизонтального напряжения (рис. 12, в). В то же время, сечение YZ в основном ориентировано по направлению максимального горизонтального напряжения, и здесь видно наличие гидроразрыва (рис. 12, г). Для лучшей визуализации локализованной области отрывного нарушения в сечении YZ представлено увеличенное изображение переходной сечения.

Учитывая, что угловой размер областей сдвигового разрушения превышает 90° (рис. 12, а), считаем, что сочленение неустойчиво (Zoback, 2010).

Рассматривая аналогичные сечения для сочленения 160/120 мм, следует отметить сходный характер и вид разрушения (рис. 13). Поскольку угловой раствор области

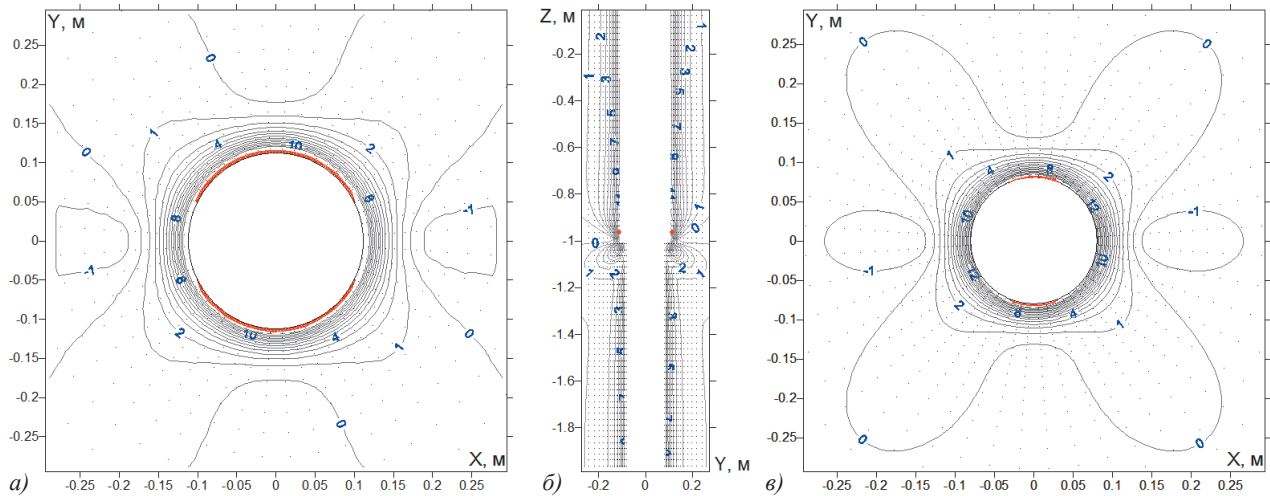


Рис. 11. Области разрушения при увеличении перепада давления до 55 атм. Представлены сечения XY, $h = 0.97$ м (а) и YZ (б) для сочленения 220/160 мм. Для сочленения 160/120 мм приведено сечение XY, $h = 0.97$ м (в).

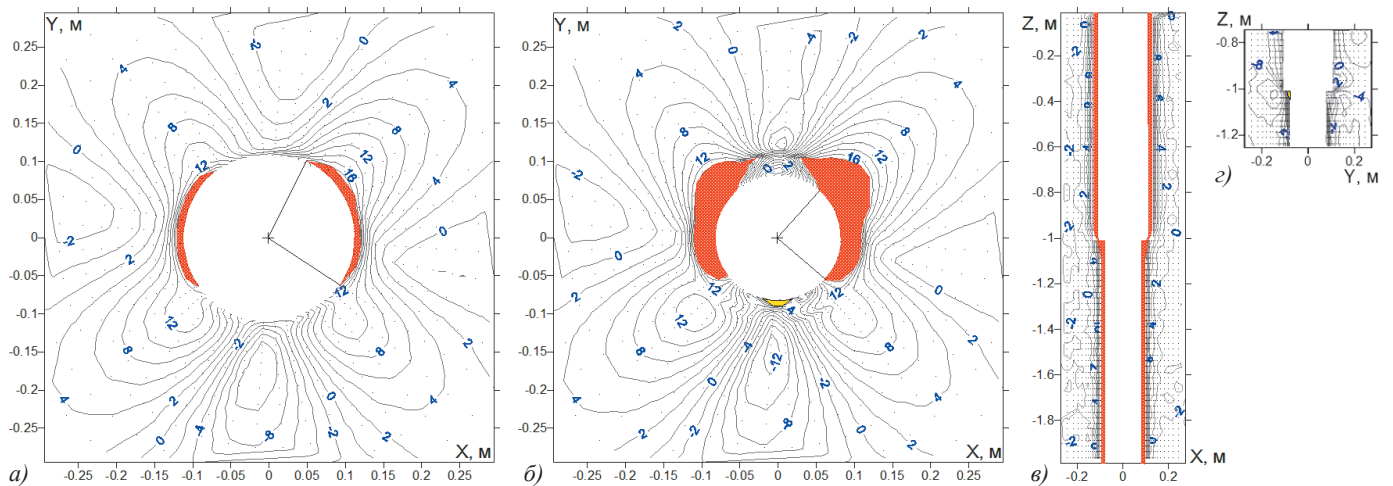


Рис. 12. Области разрушения в наклонном сочленении 220/160 мм. Перепад давления $dP = 40$ атм. Сечения XY взяты для параметра $h = 0.99$ м (а) и $h = 1.01$ м (б). Области сдвигового разрушения обозначены красной заливкой в плоскости XZ (в). Области отрывного разрушения выделены желтой заливкой в плоскости YZ (з).

разрушения в большем диаметре (рис. 13, а) превышает 90° , сочленение также неустойчиво. Аналогично случаю 220/160 мм, здесь также на уступе при переходе из большего диаметра в меньший образуется зона отрывного разрушения (рис. 13, б, г).

Проанализируем, как изменяется картина разрушения при уменьшении перепада давления. Следует отметить, что предполагаемого исчезновения областей отрыва при уменьшении dP не происходит. Всегда остается хотя бы одна разрушенная ячейка сетки на выступе, образованном

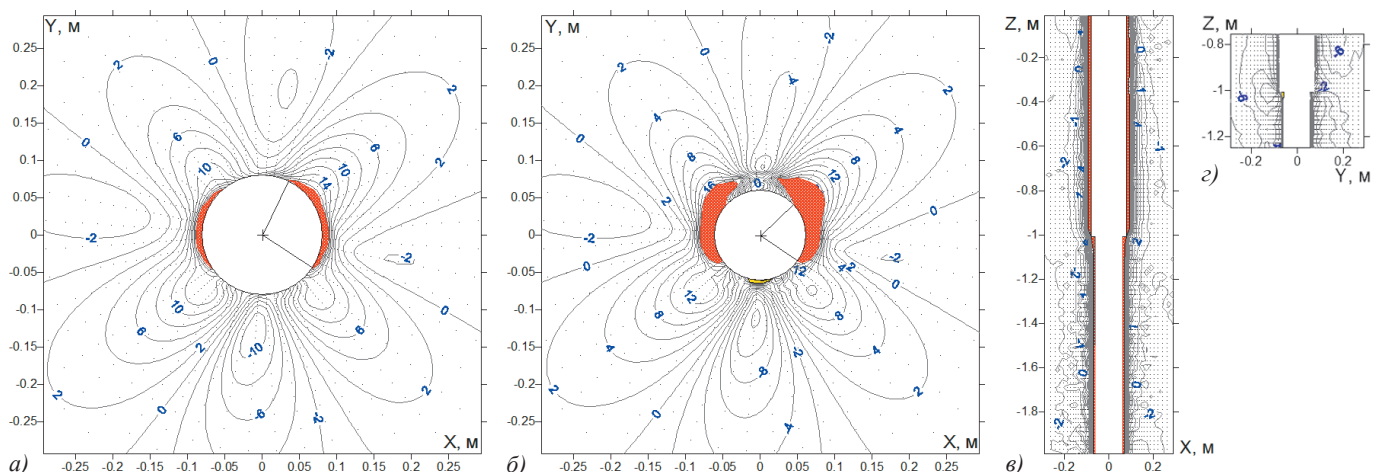


Рис. 13. Области разрушения в наклонном сочленении 160/120 мм. Перепад давления $dP = 40$ атм. Расстояние до сечения XY $h = 0.99$ м (а) и $h = 1.01$ м (б). Сечения плоскостями XZ и YZ приведены на контурных картах (в), (з).

в месте перехода из большого диаметра в меньший. Данное утверждение верно как для варианта 220/160 мм, так и для 160/120 мм. С другой стороны, с уменьшением давления в скважине, увеличиваются области сдвигового разрушения, так как интенсивность сжимающих напряжений вокруг отверстий становится выше. Общую тенденцию по изменению формы областей разрушений можно видеть на рис. 14, где представлен результат для перепада давления $dP = 20$ атм в сочленении с соотношением диаметров 220/160 мм. Следует отметить, что область сдвигового разрушения увеличивается как вдоль контура скважины, так и по радиальному направлению.

Результат при понижении давления в сочленении 160/120 мм качественно повторяет случай 220/160 мм, и здесь не приводится.

Дальнейшее уменьшение dP до 1 атм приводит практически к смыканию областей сдвигового разрушения вокруг скважины, то есть происходит полное обрушение стенок в сочленении.

Увеличение значения dP до 50 атм в сочленении 220/160 мм вызывает уменьшение окружного размера областей разрушения, которые становятся меньше 90°

(рис. 15 а, б). Вкупе с тем, что область гидроразрыва все еще локализована и сосредоточена на уступе скважины меньшего диаметра (рис 15, в, г), наклонное сочленение будет устойчиво.

Аналогичную форму имеют области разрушений для сочленения 160/120 мм, поэтому бурение на керн при $dP = 50$ атм там также будет устойчивым.

Увеличение dP до 60 атм для сочленения 220/160 мм приводит к образованию отрывного разрушения напротив уступа в плоскости YZ (рис. 16, а), а также к удлинению гидроразрыва с уступа вниз по поверхности скважины. Расположение разрывов и сдвиговых нарушений в плоскости, перпендикулярной оси скважины, можно видеть на рис. 16, б.

Рассмотрим сочленение 160/120 мм в условиях, когда значение dP увеличивается до 60 атм. Здесь также образуются два противоположных по азимуту разрыва, однако длина этих областей вдоль поверхности скважины становится больше, чем в случае 220/160 мм, что можно видеть по рис. 17, а. Форму областей сдвиговых нарушений, а также расположение областей отрыва по контуру отверстия можно видеть на рис. 17, б.

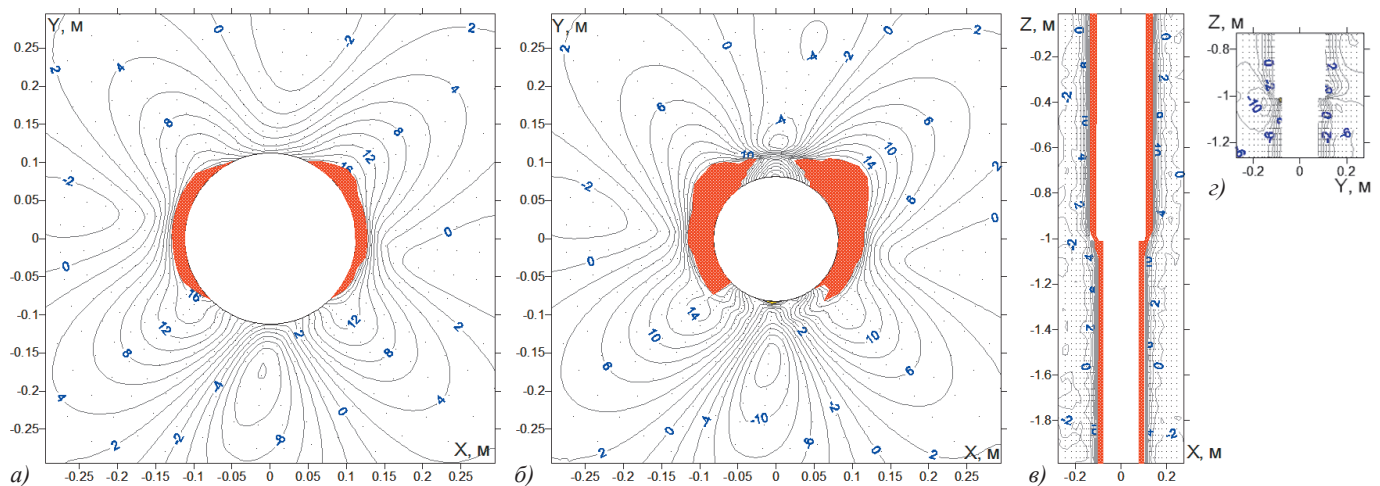


Рис. 14. Изменение формы областей разрушений при уменьшении перепада давления до $dP = 20$ атм в сочленении 220/160 мм. Расстояние до сечения XY $h = 0.99$ м (а) и $h = 1.01$ м (б). Увеличение сдвиговых нарушений можно видеть на сечении XZ (в). Область отрывных нарушений на уступе отображает увеличенное сечение YZ (г).

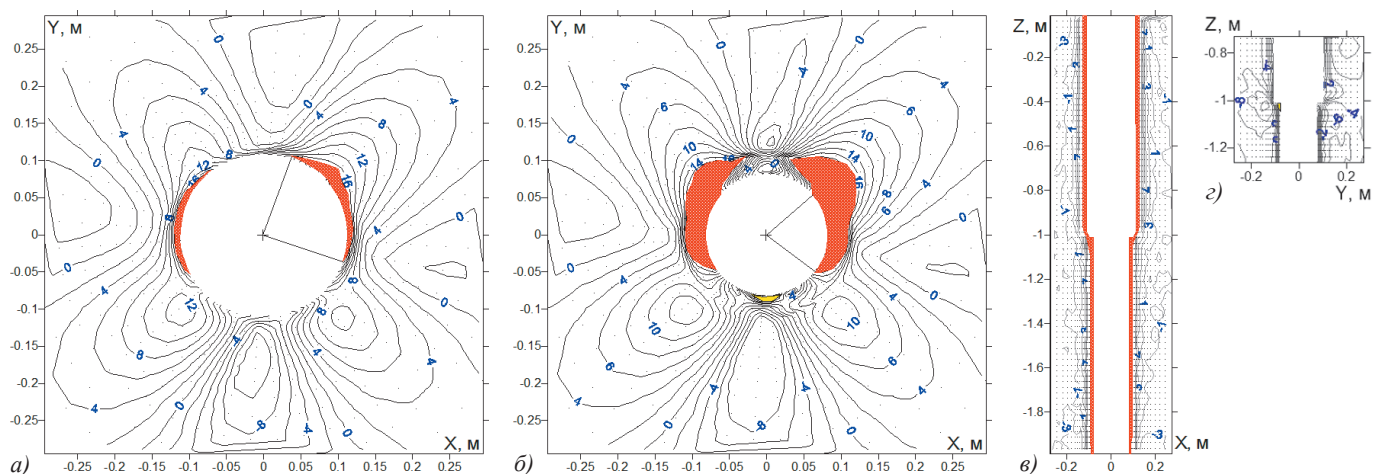


Рис. 15. Форма разрушений вокруг наклонного сочленения 220/160 мм при увеличении перепада давления до $dP = 50$ атм. Расстояния до сечений XY составляют $h = 0.99$ м (а) и $h = 1.01$ м (б). Также представлено сечение XZ (в) и увеличенная область стыковки в плоскости YZ (г).

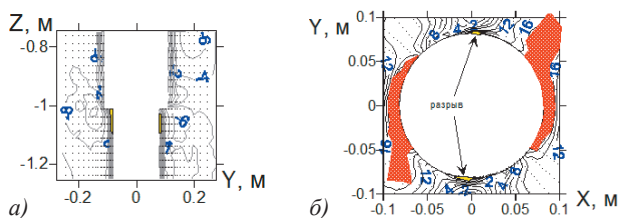


Рис. 16. Форма разрушений в формации вокруг сочленения 220/160 мм при повышении dP до 60 атм. В плоскости YZ (а) видно распространения гидроразрыва с уступа вдоль скважины меньшего диаметра. Кроме того, в противоположном боку скважины также происходит разрыв. Сечение XY взято на расстоянии $h = 1.05$ м (б). Области сдвигового разрушения продолжают уменьшаться

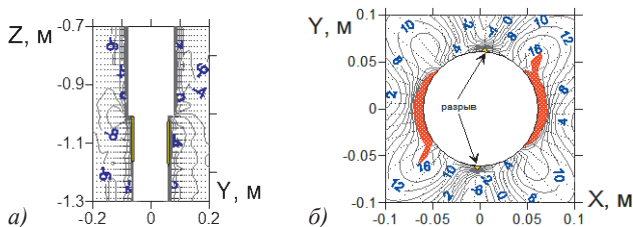


Рис. 17. Области разрушения при увеличении давления dP до 60 атм в сочленении 160/120 мм. Протяженность гидроразрыва показана на сечении YZ (а). Расположение областей отрыва и сдвиговых нарушений относительно контура отверстия приведено на сечении XY (б) для расстояния $h = 1.1$ м

В целом, ввиду нелокальности областей гидроразрыва для рассматриваемых соотношений диаметров в сочленении, бурение на керноотбор с перепадом давления 60 атм будет неустойчивым.

Для обоих соотношений диаметров 220/160 мм и 160/120 мм дальнейшее увеличение dP до 70 атм вызывает распространение трещины гидроразрыва вдоль поверхности скважины малого диаметра, а также инициирование отрывных нарушений в скважине большого диаметра. Данный факт можно видеть на рис. 18, где приведено сечение плоскостью YZ формации вокруг сочленения. Очевидно, что режим бурения на керн с $dP = 70$ атм для наклонного сочленения является безусловно опасным.

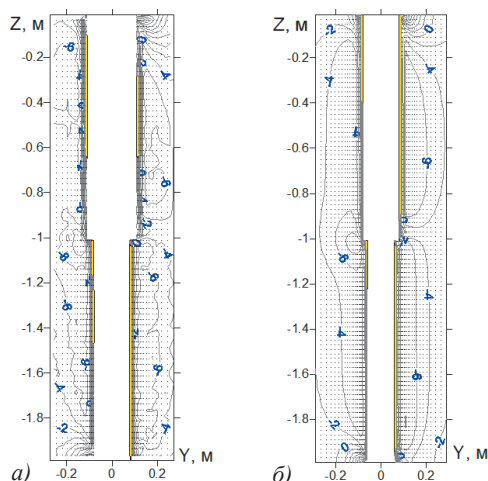


Рис. 18. Распространение областей гидроразрыва при увеличении перепада давления dP до 70 атм в сочленении с соотношениями диаметров 220/160 мм (а) и 160/120 мм (б). На рисунке представлены YZ -сечения наклонного сочленения

Обсуждение результатов

Результаты по моделированию разрушения формации вблизи сочленения получены с использованием вертикально-трансверсально-изотропной пороупругой модели с учетом нарастания корки бурового раствора. В связи с небольшим разбросом значений упругих параметров, восстановленных из эксперимента по сжатию керна, встает вопрос о применимости изотропного подхода для описания поведения формации. Для пороупругой изотропной среды с учетом нарастания корки проведено моделирование напряженного состояния вблизи вертикального и наклонного сочленения. Сравнение результатов с вертикально-трансверсально-изотропным случаем показало, что различие в величине эквивалентного напряжения в области стыковки скважин различного диаметра составляет 6–15%. В связи с тем, что экспериментальные данные по деформированию керна более точно описываются моделью с анизотропными свойствами, данная система уравнений для пороупругой среды и была выбрана для численных расчетов.

Важным результатом здесь является то, что для сочленений диаметром 220/160 мм и 160/120 мм принципиальных отличий в характере и типе появляющихся в формации разрушений при изменении давления в скважине нет. Таким образом, основные выводы по устойчивости при бурении керна могут быть обобщены на оба случая.

Использование «стандартного» для основного ствола скважины перепада давления 40 атм оказывается недостаточным при бурении на керн с меньшим диаметром долота, поскольку размер областей сдвиговых нарушений на контуре скважин указывает на нестабильность стенок. Безопасные условия бурения сочленения достигаются увеличением давления бурового раствора в скважине на 10 атм.

Для анизотропных песчаников Сургутского свода отбор керна будет предпочтительнее из вертикальных и суб-вертикальных скважин. Действительно, вертикальная переходная секция более устойчива, поскольку при повышении перепада давления до 70 атм в ней отсутствуют трещины гидроразрыва.

В скважинах с углами наклона от 60° бурение с меньшим диаметром для извлечения керна нужно осуществлять в рамках узкого окна давления в скважине. Перепад давления в 50 атм достаточен для стабильности наклонного сочленения, однако его уменьшение на 10 атм вызывает критические сдвиговые разрушения, а увеличение на 10 атм приводит к гидроразрыву стенок.

В качестве области, наиболее подверженной разрушению, можно указать на уступ, образованный в месте состыковки большего и меньшего диаметров скважины. Можно предположить, что в реальных условиях данная форма вследствие отколов будет сглажена к плавному переходу из одного диаметра в другой.

Отметим также, что для вертикального сочленения скважина меньшего диаметра является более резистентной по отношению к уменьшению давления на забое, поскольку разрушения инициируются в скважине большего диаметра, а затем распространяются на поверхность меньшей скважины. В противоположность этому, для наклонного сочленения при увеличении давления бурового раствора отрывные нарушения возникают сначала в

скважине меньшего диаметра, а потом распространяются в основной ствол, который является, таким образом, более устойчивым к увеличению dP .

Выводы

– Проведено трехмерное пороупругое моделирование устойчивости вертикального и наклонного сочленения диаметров 220/160 мм и 160/120 мм для диапазонов перепада давления в скважине от 1 до 70 атм в анизотропном песчанике продуктивного пласта АС.

– Установлено, что форма и характер разрушений в сочленениях для различных соотношений диаметров качественно сходны для равных перепадов давлений на стенках.

– Выявлено, что вертикальное сочленение является более устойчивым по сравнению с наклонным, поскольку при его формировании отсутствуют трещины отрыва.

– При керноотборе из вертикальных скважин необходимо поддерживать перепад давления выше 55 атм на забое для обеспечения его стабильности.

– В вертикальном сочленении скважина меньшего диаметра является более устойчивой к понижению давления бурового раствора.

– Для обеспечения устойчивости наклонного сочленения необходимо, чтобы перепад давления составлял $50 \text{ атм} \pm 10\%$. Понижение давления ведет к критическому выкрашиванию породы из стенок, повышение вызывает распространение отрывного разрушения по поверхности скважин.

– При повышении давления в наклонном сочленении трещины гидроразрыва инициируются и распространяются, в первую очередь, в скважине меньшего диаметра, основной ствол скважины является более устойчивым.

Литература

- Ашихмин С.Г., Кашников Ю.А., Шустов Д.В., Кухницкий А.Э. (2018). Влияние анизотропии упругих и прочностных свойств пород на устойчивость ствола наклонно направленной скважины. *Нефтяное хозяйство*, 2, с. 54–57. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-2-54-57>
- Бочаров О.Б., Серяков А.В. (2016). Моделирование нехарактерного разрушения продуктивных слоев песчаника при бурении. *Физическая Механика*, 19(6), с. 86–93.
- Гениев Г.А., Курбагов А.С., Самедов Ф.А. (1993). Вопросы прочности и пластичности анизотропных материалов. М.: Интербук, 187 с.
- Грогуленко В.В. (2017). Моделирование приложения нагрузок на металлополимерные колтюбинговые трубы для нефтяной и газовой промышленности. *Науковедение*, 9(1).
- 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.

Серяков А.В., Подбережный М.Ю., Бочаров О.Б. (2018). Анизотропия формации как ключевой фактор устойчивости скважин на Западно-Салымском месторождении. *Мат. 8 международная геологической и геофизической конференции EAGE: Инновации в геонауке – время открытий*. Санкт-Петербург.

Фадеев А.Б. (1987). Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 221 с.

Cheng A. H.-D. (1997). Material Coefficients of Anisotropic Poroelasticity. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 34(2), pp. 199–205. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(96\)00055-1](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(96)00055-1)

Cui L., Cheng A.H.-D., and Y. Abousleiman (1997). Poroelastic Solution for an Inclined Borehole. *J. of App. Mechanics ASME*, 64(1), pp. 32–38. <https://doi.org/10.1115/1.2787291>

Liu C., and Y. Abousleiman (2018). Multiporosity/Multipermeability Inclined-Wellbore Solutions With Mudcake Effects. *SPE Journal*, 23(5), pp. 1723–1747. <https://doi.org/10.2118/191135-PA>

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

Podberezhny M., Polushkin S. and Makarov A. (2017). Novel Approach for Evaluation of Petrophysical Parameters from Time-Lapse Induction Logging-While-Drilling Measurements in Deviated and Horizontal Wells. *Proceedings of the SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow. <https://doi.org/10.2118/187911-RU>

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

Сведения об авторах

Александр Викторович Серяков – научный сотрудник, канд. техн. наук

АО Бейкер Хьюз, Новосибирский технологический центр

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

Максим Юрьевич Подбережный – руководитель направления по петрофизике, канд. физ.-мат. наук

Газпромнефть-ГЕО

Россия, 191167, Санкт-Петербург, Синопская набережная, д. 22А

Олег Борисович Бочаров – зам. директора по НР, канд. физ.-мат. наук

АО Бейкер Хьюз, Новосибирский технологический центр

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

Марат Альбертович Азаматов – руководитель направления краткосрочного планирования разработки, магистр физики

Салым Петролеум Девелопмент Н.В.

Россия, 123242, Москва, Новинский бульвар, 31

Статья поступила в редакцию 19.12.2019;

Принята к публикации 04.06.2020;

Опубликована 30.09.2020

IN ENGLISH

Junction zone stability in coaxial wells of different diameters (on the example of the Khanty-Mansi Autonomous District oil field)

A.V. Seryakov^{1}, M.Yu. Podberezhny², O.B. Bocharov¹, M.A. Azamatov³*

¹Novosibirsk Technology Center, Baker Hughes, Novosibirsk, Russian Federation

²Gazpromneft-GEO, St. Petersburg, Russian Federation

³Salym Petroleum Development N.V., Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: Alexander V. Seryakov, e-mail: alexander.seryakov@bakerhughes.com

Abstract. The paper considers borehole wall stability in a junction zone of coaxial wells where a borehole of bigger diameter connects with a smaller one. To determine the shapes and character of rock destruction, 3D poroelastic modeling of the stressed state of the rock around the coaxial junction with account for mudcake formation was performed. The geomechanical model considers the anisotropy of the medium's deformation properties that are characteristic for the coastal-marine reservoirs of Western Siberia. The rock failure is estimated based on the Mohr-Coulomb criterion with account for tensile destruction condition. The paper considers cases of vertical and inclined junctions of a well drilled at a depth of 2 km in sandstone productive pay with known poroelastic anisotropic properties. The stress and pore pressure analysis has been performed for a mud pressure drop range from 1 to 70 atm and coaxial junctions with different combinations of borehole diameters. The safe mud pressure window has been determined for vertical and inclined junctions. It has been found that the rock failure pattern for junction of bigger diameters is, in general, similar to that for smaller diameters with some insignificant differences in the destruction areas shapes. It has also been demonstrated that in vertical junctions, the bottom holes of smaller diameter are more stable to reduced drilling-mud pressure than the mainboreholes, while in the inclined junction it is the mainwellbore that is more stable to increased drilling-mud pressure than the bottom hole.

Keywords: 3D poroelastic modeling, coaxial junction, vertical and inclined well, anisotropy, rock failure, sandstone reservoir

Recommended citation: Seryakov A.V., Podberezhny M.Yu., Bocharov O.B., Azamatov M.A. (2020). Junction zone stability in coaxial wells of different diameters (on the example of the Khanty-Mansi Autonomous District oil field). *Georesursy = Georesources*, 22(3), pp. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.69-78>

References

- Ashikhmin S.G., Kashnikov Yu.A., Shustov D.V., Kukhtinskii A.E. (2018). Influence of elastic and strength anisotropy on the stability of inclined borehole. *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*, 2, pp. 54–57. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-2-54-57>
- Bocharov O.B., Seryakov A.V. (2016). Modeling uncharacteristic destruction of productive sandstone layers during drilling. *Fizicheskaya Mezomekhanika*, 19(6), pp. 86–93.
- Cheng A. H.-D. (1997). Material Coefficients of Anisotropic Poroelasticity. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 34(2), pp. 199–205. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(96\)00055-1](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(96)00055-1)

Cui L., Cheng A.H.-D., and Y. Aboussleiman (1997). Poroelastic Solution for an Inclined Borehole. *J. of App. Mechanics ASME*, 64(1), pp. 32–38. <https://doi.org/10.1115/1.2787291>

Fadeev A.B. (1987). Finite element method in geomechanics. Moscow: Nedra, 221 p.

Geniev G.A., Kurbatov A.S., Samedov F.A. (1993). Issues of strength and ductility of anisotropic materials. Moscow: Interbuk, 187 p.

Grogulenko V.V. (2017). Modeling the application of loads on metal-polymer coiled tubing pipes for the oil and gas industry. *Naukovedenie*, 9(1).

Liu C., and Y. Aboussleiman (2018). Multiporosity/Multipermeability Inclined-Wellbore Solutions With Mudcake Effects. *SPE Journal*, 23(5), pp. 1723–1747. <https://doi.org/10.2118/191135-PA>

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

Podberezhny M., Polushkin S. and Makarov A. (2017). Novel Approach for Evaluation of Petrophysical Parameters from Time-Lapse Induction Logging-While-Drilling Measurements in Deviated and Horizontal Wells. *Proceedings of the SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow. <https://doi.org/10.2118/187911-RU>

Rudyak V.Ya., Seryakov A.V., Manakov A.V. (2013). Joint modeling of geomechanics and filtration processes in the near-wellbore zone while drilling. *Proc. Conf.: Geodynamics and the stress state of the Earth's interior*. Novosibirsk: IGD SO RAN, v.1, pp. 383–388.

Seryakov A.V., Podberezhny M.Yu., Bocharov O.B. (2018). Formation anisotropy as a key factor in well stability in the West Salym field. *Proceedings of the 8th International Geological and Geophysical Conference EAGE: Innovations in Geoscience – Time for Breakthrough*. St. Petersburg.

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

About the Authors

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

Maxim Yu. Podberezhny – Head of Petrophysics Department, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Gazpromneft-GEO

22A Sinopskaya emb., St. Petersburg, 191167, Russian Federation

Oleg B. Bocharov – Deputy Director for HP, , Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Novosibirsk Technology Center, Baker Hughes

4A Kutateladze st., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Marat A. Azamatov – Head of Short-Term Development Planning, Master of Physics, Salym Petroleum Development N.V.

31 Novinsky boul., Moscow, 123242, Russian Federation

Manuscript received 19 December 2019;

Accepted 4 June 2020; Published 30 September 2020