

© Коллектив авторов,
2024



УДК 622.243.2:550.82
<https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-4-98-109>

УСТОЙЧИВОСТЬ ИНТЕРВАЛА СРЕЗКИ В ОТКРЫТОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СТВОЛЕ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МНОГОЗАБОЙНЫХ СКВАЖИН С БОЛЬШИМ ОТХОДОМ

Д.А. Тазьба^{1,*}, Р.К. Непоп^{1,2}, Н.Ю. Смирнов¹

¹ООО «ПетроГМ», РФ, Новосибирск

²Институт геологии и минералогии СО РАН, РФ, Новосибирск

Электронный адрес: tazba.da@petrogm.com

Введение. В условиях истощения традиционных залежей углеводородов при длительной эксплуатации месторождений все большее внимание в отрасли уделяется работе с трудноизвлекаемыми запасами. Ключевыми технологиями их разработки являются строительство горизонтальных скважин и проведение гидравлического разрыва пласта, в том числе и многостадийного (МГРП). Однако в случае маломощных пластов-коллекторов, где проведение МГРП затруднено ввиду высоких рисков прорыва трещины в зону газонефтяного контакт (ГНК) или подстилающую воду, актуальным становится строительство многоствольных скважин. Это позволяет увеличить зону дренирования и повышает дебит скважин до экономически рентабельного уровня. Помимо стабильного состояния самих стволов ключевым моментом успешного строительства таких скважин становится устойчивость зоны сочленения.

Цель. Оценка устойчивости интервала срезки в открытом горизонтальном стволе многоствольной скважины.

Методы. В работе использовалось комплексное 3D геомеханическое моделирование напряженно-деформированного состояния горного массива вблизи зоны сочленения двух стволов при различных параметрах срезки: ориентации материнского ствола относительно горизонтальных напряжений, расположении бокового ствола относительно материнского (направление и интенсивность срезки), зенитный угол основного ствола, различных диаметрах стволов, различных значениях удельных весов бурового раствора и, соответственно, давлений в скважине выше и ниже пластового.

Результаты. Результаты геомеханического моделирования, сопровождение бурения и оперативная выдача рекомендаций при подходе текущего забоя к зоне сочленения позволило скорректировать плановые интервалы срезок в наиболее безопасные (в терминах устойчивости) как для перемены между стволами, так и для стенок скважин. Безаварийное бурение и длительная устойчивость зоны сочленения в ходе дальнейшей добычи подтвердила корректность проведенного анализа.

Заключение. При строительстве многоствольных скважин комплексное трехмерное моделирование устойчивости зоны сочленения с учетом результатов одномерного моделирования механических свойств, давлений и напряжений позволяет оптимизировать срезку бокового ствола и проводить как безаварийное строительство скважины, так и ее последующую эксплуатацию.

Ключевые слова: многоствольные скважины, устойчивость зоны сочленения, интервал срезки, 3D геомеханическое моделирование, напряженно-деформированное состояние горного массива, стереонет

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Для цитирования: Тазьба Д.А., Непоп Р.К., Смирнов Н.Ю. Устойчивость интервала срезки в открытом горизонтальном стволе при строительстве многозабойных скважин с большим отходом. ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2024;9(4):98–109. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-4-98-109>

Статья поступила в редакцию 10.09.2024

Принята к публикации 04.10.2024

Опубликована 27.12.2024

ERD MULTILATERAL WELL OPEN HOLE JUNCTION ZONE STABILITY FOR PURPOSE OF WELL
CONSTRUCTION OPTIMIZATION

Dmitry A. Tazba^{1,*}, Roman K. Nepoch^{1,2}, Nikolay Y. Smirnov¹

¹LLC "PetroGM", RF, Novosibirsk

²Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, RF, Novosibirsk

E-mail: tazba.da@petrogm.com

Introduction. As conventional hydrocarbon reservoirs become depleted during extended production the industry is increasingly focusing on the development of hard-to-recover reserves. Key technologies for their exploitation include the construction of horizontal wells and hydraulic fracturing (including multistage hydraulic fracturing, MHF). However, in the case of thin reservoir formations where MHF is complicated due to high risks of fracture breakthrough into the gas-oil contact (GOC) or underlying water zone the construction of multilateral wells becomes more relevant. This approach increases the drainage area and raises well production rates to

economically viable levels. In addition to maintaining the stability of the boreholes themselves the stability of the junction zone is a critical factor for the successful well construction.

Aim. The objective of this study was to evaluate the junction zone stability in multilateral well's horizontal open boreholes.

Methods. The study employed complex 3D geomechanical modeling of the stress-strain state and rock stability in two boreholes junction zone under various sidetracking parameters: the orientation of the main borehole relative to horizontal stresses; the orientation of the lateral borehole relative to the main borehole (sidetracking direction and intensity); deviation angle of the main borehole; the influence of the lateral borehole's diameter; different mud weight and corresponding wellbore pressures above and below reservoir pressure.

Results. Geomechanical modeling combined with drilling geomechanics support and timely recommendations allowed to adjust the planned kick-off point when the current drill bit depth approached the junction zone. This optimization ensured safer intervals (in terms of stability) for both the bridge between the wellbores and the borehole wall. The accident-free drilling and the junction zone continuous stability during subsequent production confirmed the accuracy of the conducted analysis.

Conclusion. Complex 3D modeling of junction zone stability accounting the results of 1D modeled mechanical properties, pressures and stresses allows to optimize lateral borehole sidetracking parameters during multilateral well construction. This approach ensures both accident-free well construction and its subsequent exploitation.

Keywords: multilateral wells, junction zone stability, junction zone, kick-off point interval, 3D geomechanical modeling, stress-strain state, stereonet

Conflict of Interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Tazba D.A., Nepop R.K., Smirnov N.Y. ERD Multilateral well open hole junction zone stability for purpose of well construction optimization. PRONEFT. Professionally about oil. 2024;9(4):98–109. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-4-98-109>

Manuscript received 10.09.2024

Accepted 04.10.2024

Published 27.12.2024

ВВЕДЕНИЕ

В условиях истощения традиционных залежей углеводородов для повышения экономической эффективности разработки на месторождениях Западной Сибири в последнее время все чаще применяется технология строительства многоствольных скважин типа fishbone или fork. Целесообразность строительства таких скважин обусловлена необходимостью увеличения зоны дренирования в случае маломощных пластов-коллекторов, в которых проведение многостадийного гидроразрыва пласта невозможно ввиду высоких рисков прорыва трещины в ГНК или подстилающую воду. При строительстве таких многоствольных скважин зона сочленения материнского и боковых стволов, как правило, располагается в интервале пласта-коллектора и остается необсаженной, как в процессе бурения, так и при дальнейшей разработке, а уровень сложности строительства соответствует первому уровню по классификации TAML (некоммерческая организация Technology Advancement of MultiLaterals). Определяющим фактором успешного внедрения данной технологии (помимо устойчивости стенок самих открытых стволов) является устойчивость зоны сочленения. Ввиду выдержанности напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива и упруго-прочностных

свойств породы в интервале коллектора устойчивость зоны сочленения контролируется прежде всего азимутами и углами срезки относительно материнского ствола. Наиболее эффективным инструментом решения данной задачи является трехмерное геомеханическое моделирование.

При расчете устойчивости стенки ствола скважины традиционно используется критерий Мора — Кулона. Использование этого критерия позволяет вывести формулы для определения давлений образования трещин и обрушения для расположенных рядом стволов, а также зоны сочленения сложной геометрической формы, образующей овал [1, 2].

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния горных пород в призабойной зоне может использоваться и для прогнозирования устойчивости боковых стволов многоствольной скважины как при ее строительстве, так и во время добычи, а также для анализа характера изменения пластических деформаций в прискважинной зоне в интервале срезки (в плоскости, ортогональной оси материнского ствола) [3].

В работе [4] приведен пример изучения зоны сочленения стволов для одного из месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа. Рассмотрены сценарии срезки строго вниз и влево с разным давлением внутри ствола при условии фильтрации через стенку

скважины, а также с учетом нарастанием корки — гидродинамического изолирования формации. На месторождении на глубине песчаного коллектора сдвиговый режим напряжения, т.е. преобладающим является горизонтальный максимальный стресс $SH > Sv > Sh$.

ПОКАЗАНО, ЧТО ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МНОГОСТВОЛЬНЫХ СКВАЖИН КОМПЛЕКСНОЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ 1D-МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЗВОЛЯЕТ ОПТИМИЗИРОВАТЬ СРЕЗКУ БОКОВОГО СТВОЛА, УЧИТЫВАЯ РАЗНЫЕ ВАРИАНТЫ НАПРАВЛЕНИЯ БОКОВЫХ СТВОЛОВ.

Целью представляемой работы являлась оценка устойчивости интервала срезки в открытом горизонтальном стволе (ГС) многоствольной скважины. В ходе работы проведено комплексное трехмерное моделирование напряженно-деформированного состояния горного массива вблизи зоны сочленения при различных параметрах срезки:

- расположения бокового ствола относительно материнского (направление и интенсивность срезки);
- ориентация материнского ствола относительно горизонтальных напряжений;
- зенитный угол основного ствола;
- диаметры материнского и бокового стволов;
- значения удельных весов бурового раствора и соответственно давления в скважине выше и ниже пластового.

Выполненное комплексное геомеханическое моделирование представляет собой успешную реализацию инженерного подхода, описанного в работе [5], к выбору оптимальных параметров срезки, а также выбору интервала в открытом ГС при строительстве многозабойных скважин с большим отходом. Важным элементом такого подхода является возможность оперативного обновления геомеханических моделей, расчета устойчивости стенок ствола и сочленения для песчаного коллектора разных прочностных характеристик в режиме онлайн (в ходе геомеханического сопровождения бурения). Принимая во внимание как плановые, так и предпочтительные (по результатам моделирования) направления боковых стволов и наиболее безопасное направление срезки, заказчику выдавались рекомендации по выбору оптимального местоположения интервала срезки непосредственно в процессе бурения.

ПОСТРОЕНИЕ 3D-МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА ВБЛИЗИ ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ

В ходе исследования проводилось трехмерное моделирование зоны сочленения двух необсаженных стволов. Одним из основных методов для моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестностях различных горных выработок, включая скважины, является метод конечных элементов (МКЭ). Суть метода заключается в том, что область геометрического тела разбивается на некоторое число малых, но конечных по размерам подобластей (конечных элементов). Далее решается система разрешающих уравнений МКЭ, которая для статической задачи представляет собой систему линейных алгебраических уравнений. Алгоритм моделирования с использованием МКЭ представляет собой последовательность шагов для расчета деформаций и напряжений в горном массиве (рис. 1).

Построение геометрии. Первым этапом решения поставленной задачи было построение геометрической модели исследуемого объекта (рис. 2). Рассматривалась геометрия, исходя из проектных диаметров основного и боковых стволов — 155,6 мм. Зона сочленения включала в себя четыре зоны: зона общего материнского ствола, зона сочленения стволов сложной геометрической формы, условно образующей овал (интервал начала срезки), зона смежных стволов и зона двух разобщенных стволов (в том числе с учетом отсутствия перераспределения напряжений вокруг обоих стволов). Далее скважина, интервал сочленения и прискважинная зона были встроены во вмещающий куб, ограничивающий расчетную область. Размер куба (60×50×50 м) подбирался таким образом, чтобы границы модели находились на достаточном удалении от исследуемого участка, что позволяет исключить влияние граничных условий и связанное с этим перераспределение напряжений вокруг скважины.

Создание сетки. На следующем этапе проводилась дискретизация построенной геометрической модели. Рассматриваемая область представлялась в виде совокупности конечных элементов в форме тетраэдров, соединенных между собой в узловых точках. Этот этап имеет важное значение для дальнейшего расчета. Оптимальное использование вычислительных ресурсов и необходимая точность конечных расчетов в целевой области требуют аккуратного подбора шага сетки в каждом геометрическом теле. Так, шаг

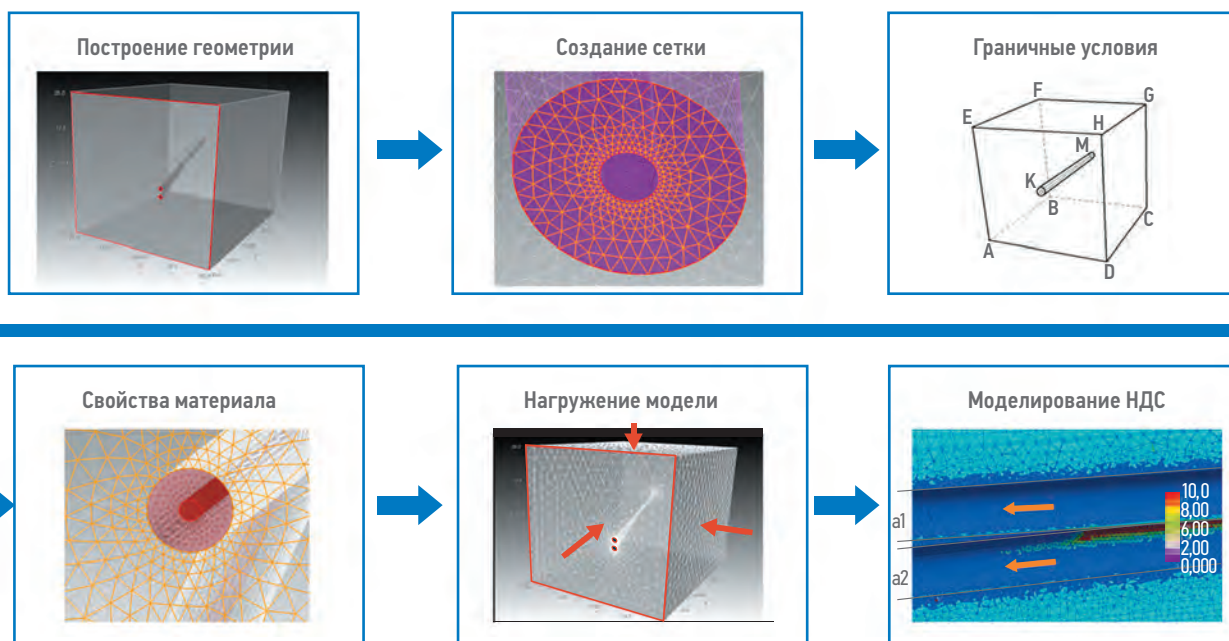


Рис. 1. Алгоритм моделирования НДС методом конечных элементов в зоне сочленения. Составлено авторами
Fig. 1. The sequence of steps for constructing the FEM for modeling the Stress-strain behavior in the junction zone. Prepared by the authors

сетки (расстояние между узлами) на стенке скважины был принят равным 0,02 м. По мере приближения к граничной поверхности прискважинной зоны он увеличивался до 0,08 м, а на границах всего моделируемого куба — до 4 м. Далее сетка конечных элементов в объемах автоматически сгущалась (уменьшение размера сопрягаемых тетраэдров) по мере приближения к целевой области зоны сочленения, а именно от граничных поверхностей куба к поверхности прискважинной зоны, и далее к поверхности скважины

(рис. 2). В результате, для моделирования каждого из рассмотренных сценариев была построена сетка с общим количеством узлов около 3,5 млн и количеством тетраэдров около 7 млн.

Свойства материала. Для трехмерного моделирования в качестве параметров среды использованы результаты расчетов одномерной геомеханической модели: напряжения, упруго-прочностные свойства и плотность бурового раствора. Толща горных пород выше и ниже целевой области зоны

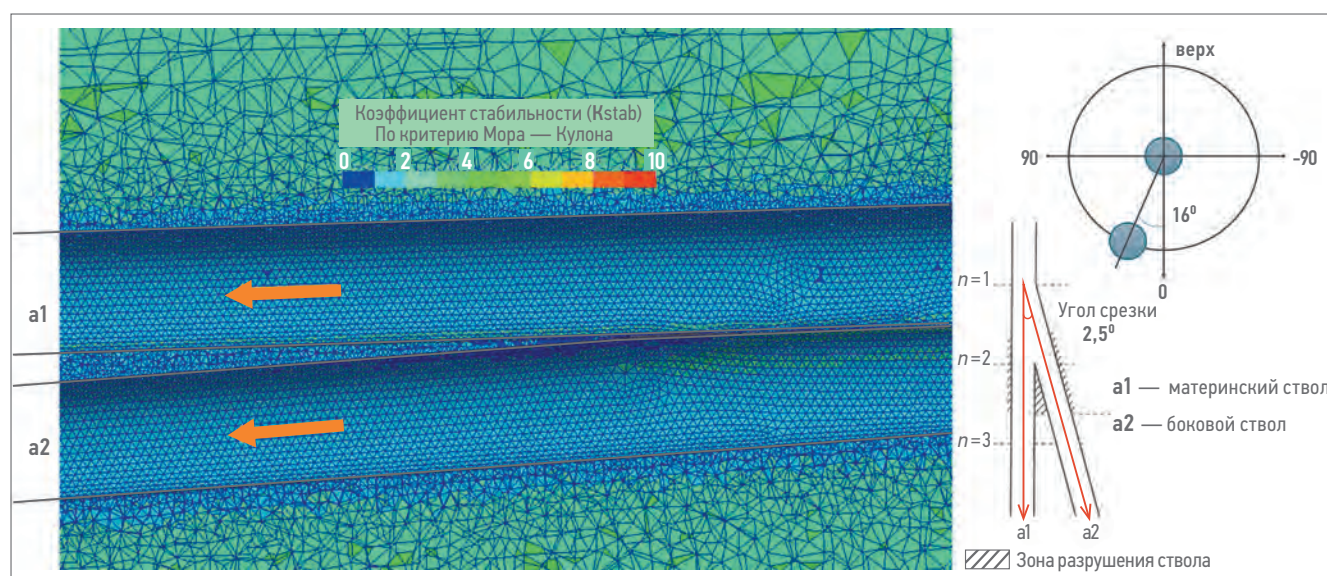


Рис. 2. Интервал зоны сочленения основного и бокового стволов (срезка в третий квадрант — вниз и влево) с отображением расчетной сетки переменного шага. Справа — вид в плоскости, проходящей через центры обоих стволов. Стрелками показано направление бурения, a1 — материнский ствол, a2 — боковой ствол. Составлено авторами
Fig. 2. Interval of the junction zone of the main and lateral boreholes for the planned trajectories with mesh display. The arrows indicate the direction of drilling, a1 — the main borehole, a2 — the lateral borehole. Prepared by the authors

сочленения задавалась сплошным однородным изотропным телом с едиными упруго-прочностными свойствами. В качестве основного моделируемого материала для коллектора принят песчаник, как наиболее представительный для срезки с точки зрения, как локализации по глубине в секции (исходя из траекторий), так и устойчивости зоны сочленения.

Граничные условия, нагружение. При задании граничных условий зафиксированы три взаимно ортогональные грани расчетной области (нулевое перемещения элементов этих граней по нормали). Три оставшиеся грани находились под воздействием давления равных вертикальному, максимальному и минимальному горизонтальному эффективным напряжениям в целевой области сочленения, которые получены по результатам одномерного геомеханического моделирования. На рассматриваемом месторождении принят нормальный стресс режим, т.е. $S_v > S_H > S_h$. На стенку скважины действовало давление равное гидростатическому давлению столба жидкости известной плотности (плановая плотность бурового раствора). Отметим, что при моделировании учитывалось создание буровым раствором глинистой корки на стенке скважины. Было принято, что фильтрация флюида через глинистую корку не происходит или она пренебрежимо мала. Таким образом в модели стенка скважины является непроницаемой мембраной. Это исключает возможность фильтрации в пласт и гидродинамическую связь между стволами. Любые давления, создаваемые на забое, распространяются только внутри скважины.

Моделирование НДС пород в интервале срезки. Как уже отмечалось во введении, использование критерия Мора — Кулона позволяет рассчитать критические давления, определяющие начало разрушения зоны сочленения двух расположенных рядом открытых стволов. При проведении данного исследования в качестве основной модели поведения горных пород также выбрана упругая идеально-пластичная модель Мора — Кулона. Отметим, что данная модель является наиболее консервативной, однако чаще всего используется всего для моделирования поведения механических свойств пород, так как при расчетах в целом обеспечивает надежные результаты. Модель Мора — Кулона использует закон Гука для описания поля деформаций и условие прочности Мора — Кулона для предельного состояния:

$$\tau = C + \sigma \times \tan \phi, \quad (1)$$

где τ — предел прочности породы по касательным напряжениям, C — когезия (коэффициент сцепления), σ — нормальное напряжение, действующее на площадке разрушения, ϕ — угол внутреннего трения. Однако в таком виде он практически не применяется для нахождения коэффициента запаса устойчивости. Чаще всего для расчетов используют выраженную из этого уравнения функцию прочности, т.е. уравнение касательной, огибающей предельные круги напряжений Мора:

$$2C \cos \phi + (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \phi \geq (\sigma'_1 - \sigma'_3), \quad (2)$$

где σ'_1 и σ'_3 — соответственно главные максимальные и минимальные эффективные напряжения, действующие в горном массиве (получены из упругого решения с учетом порового давления).

Из критерия разрушения можно рассчитать K_{stab} — коэффициент запаса устойчивости в каждой точке горного массива (в том числе на стенках открытых стволов в зоне их сочленения):

$$K_{stab} = \frac{2C \cdot \cos FANG + (\sigma'_1 + \sigma'_3) \cdot \sin FANG}{\sigma'_1 - \sigma'_3}, \quad (3)$$

где $C = 1/2 \sqrt{USC \cdot TSTR}$, USC — предел прочности при одноосном сжатии, $TSTR$ — предел прочности на растяжение. Таким образом $K_{stab} \leq 1$ характеризует области запредельного деформирования горной пород, т.е. зоны, где будет происходить ее разрушение (ячейки темно-синего цвета на рис. 2).

Для проверки достоверности получаемых результатов с учетом принятого критерия разрушения проводилось моделирование устойчивости только материнского ствола для планируемой траектории вне зависимости от места срезки. Результаты полностью совпали с результатами 1D геомеханического моделирования, что подтверждает корректность расчетов.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЕВ СРЕЗКИ

Моделирование методом конечных элементов различных вариантов срезки бокового ствола проводилось в программный комплекс Fidesys 1.6. В ходе расчетов оценена чувствительность устойчивости зоны сочленения двух стволов к расположению материнского ствола — его ориентации относительно горизонтальных напряжений и зенитного угла; ориентации бокового ствола относительно основного — угол между стволами и азимут срезки; диаметра бокового

ствола. Для обеспечения устойчивости стволов при эксплуатации скважин, исследовано влияние забойного давления на степень разрушения материнского ствола и зоны сочленения, при вызове притока и выводе скважины на рабочий режим.

Моделирование одного из плановых сценариев (срезка в третий квадрант, **рис. 2**) демонстрирует зону сочленения, в которой стволы сообщаются, образуя в сечении овал, а далее происходит формирование перемычки. Начало перемычки охарактеризовано значениями коэффициента запаса устойчивости меньше единицы (тёмно-синий цвет на **рис. 2**). Таким образом, в этой области по результатам моделирования будет наблюдаться разрушения горной породы.

Отметим, что одним из результатов моделирования различных сценариев зарезки бокового ствола стала идентичная картина НДС горного массива в зоне сочленения при симметричной срезке в третий и четвертый квадрант. Это объясняется незначительной анизотропией напряжений в интервале коллектора рассматриваемого месторождения (разница между горизонтальными напряжениями составила ~1–2 %). Исходя из полученных результатов, далее рассмотрены только сценарии срезки в 4 квадрант, который больше всего подходит для успешной реализации срезки именно вправо вниз, ввиду стандартного правого вращения бурового инструмента.

Сценарий 1: Ориентация основного и бокового стволов в направлении минимального и максимального горизонтального напряжения. В рамках моделирования этого сценария исследовалось влияние на устойчивость интервала срезки сразу двух параметров — угла между стволами и направление срезки из материнского ствола.

Учитывая технологические ограничения при зарезке бокового ствола, анализ влияния угла между стволами на устойчивость зоны сочленения проводился для углов — 1°, 2,5° и 5°. Наряду с этим проведена оценка устойчивости зоны сочленения к направлению срезки. Рассматривалась срезка только в 4 квадрант в значениях — 0°, -22,5°, -45° (отсчет выполняется от направления «вниз» по часовой стрелке в плоскости, ортогонально секущей материнский ствол). Все результаты представлены в виде сечения скважины вдоль интервала срезки бокового ствола плоскостью, перпендикулярной оси скважины. При расчетах азимут максимального и минимального горизонтальных напряжений принят равным 160° и 70°, соответственно, зенитный угол основного ствола — 86°, азимут основного ствола — 145°. На **рис. 3** представлен один из кейсов расчета для угла между стволами 2,5° и предельного расстояния от начала срезки, где наблюдается разрушения перемычки для рассматриваемых параметров.

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что с увеличением угла между стволами

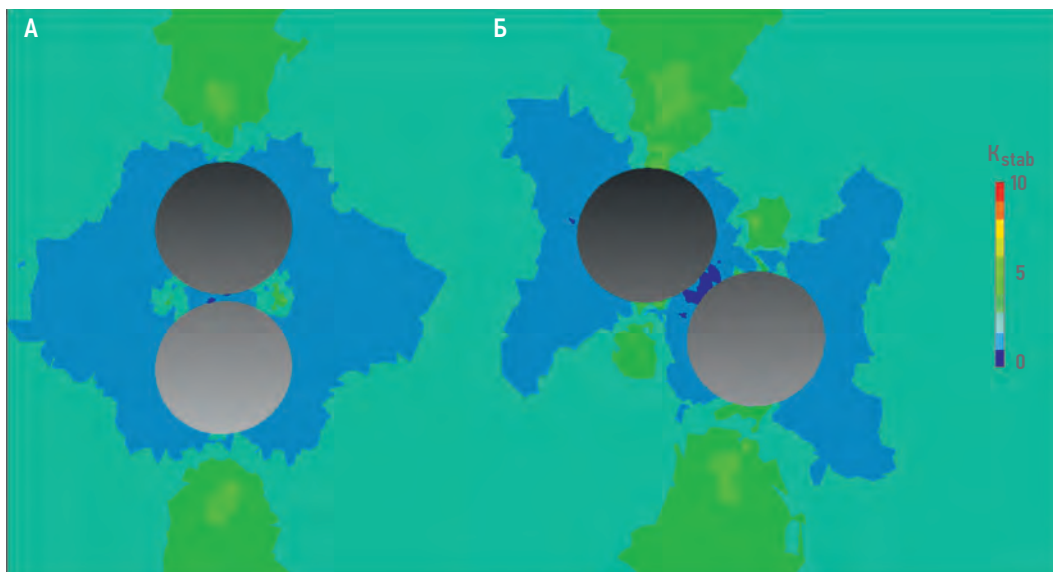


Рис. 3. Результат моделирования устойчивости зоны сочленения стволов при А) срезке вниз (0°) и Б) вправо (-45°) в 4 квадрант. Угол между материнским и боковым стволом составляет 2,5°. Расстояние от места срезки в направлении SH 3,51 метра (А) и 3,75 метра (Б). Перемычка между стволами все еще подвержена разрушению. Составлено авторами

Fig. 3. The results of sidetracking А) down (0°) and Б) right (-45°) in 4 quadrants. The angle between the main and lateral boreholes is 2,5°. The distance after the junction (kick-off) point (in the SH direction) is 3,51 meters (А) and 3,75 meters (Б). The bridge between the trunks is still subject to collapse. Prepared by the authors

уменьшается как явное разрушение пере-
мычки (зона смежных стволов), так и потенци-
альные разрушения, связанные с НДС горной
породы вокруг стволов. Это объясняется тем,
что при меньших углах срезки зона разобщен-
ных стволов (область, где исчезает взаимное
влияние стволов, стволы перестают «видеть»
друг друга) появляется позже. Результаты мо-
делирования также демонстрируют наличие
явной зависимости от направления срезки
бокового ствола (рис. 4). Чем больше угол
отхода относительно низа скважины (срезки
вниз), тем разрушенный интервал пере-
мычки больше. Это связано с тем, что при срез-
ке вправо или влево с увеличением азимута
срезки перемычка между стволами все более
подвержена действию именно вертикального
напряжения, НДС в этой области существенно
меняется.

Для анализа полученных данных и визуа-
лизации результатов моделирования был
разработан специализированный инстру-
мент — параметр Δ (или чувствительность),
представляющий собой отношение текущего
диаметра скважины к длине интервала раз-
рушения перемычки (рис. 4):

$$\Delta = \frac{\text{Borehole diameter}}{\text{Junction zone failure distance}} \quad (4)$$

Нижне представлены интервалы разрушений
перемычки между стволами для всех смоде-
лированных случаев (табл. 1).

**Сценарий 2. Анализ чувствительности
устойчивости зоны сочленения к зенит-
ному углу основного ствола.** В ходе моде-
лирования исследовано влияние зенитного
угла основного ствола в диапазоне 86–92°
на напряженно-деформированное состояние
горного массива в зоне сочленения стволов.
При расчетах азимут максимального гори-
зонтального напряжений принят равным
160°, зенитный угол основного ствола — 86°,
89° и 92°, азимут основного ствола — 145°,
угол между основным и боковым стволами —
5°. Боковой ствол направлен в 4-й квадрант
под углом -45°.

Результаты моделирования для трех значе-
ний зенитного угла основного ствола не вы-
явили существенных различий в устойчиво-
сти зоны сочленения (рис. 5). Такой результат
получен для всех направлений срезки, вклю-
чая и самый критичный с точки зрения устой-
чивости — срезка вбок под максимальным
углом -45°.

**Сценарий 3. Анализ чувствительности
устойчивости зоны сочленения к диаметру
бокового ствола.** В результате моделирова-
ния исследовано влияние диаметра бокового

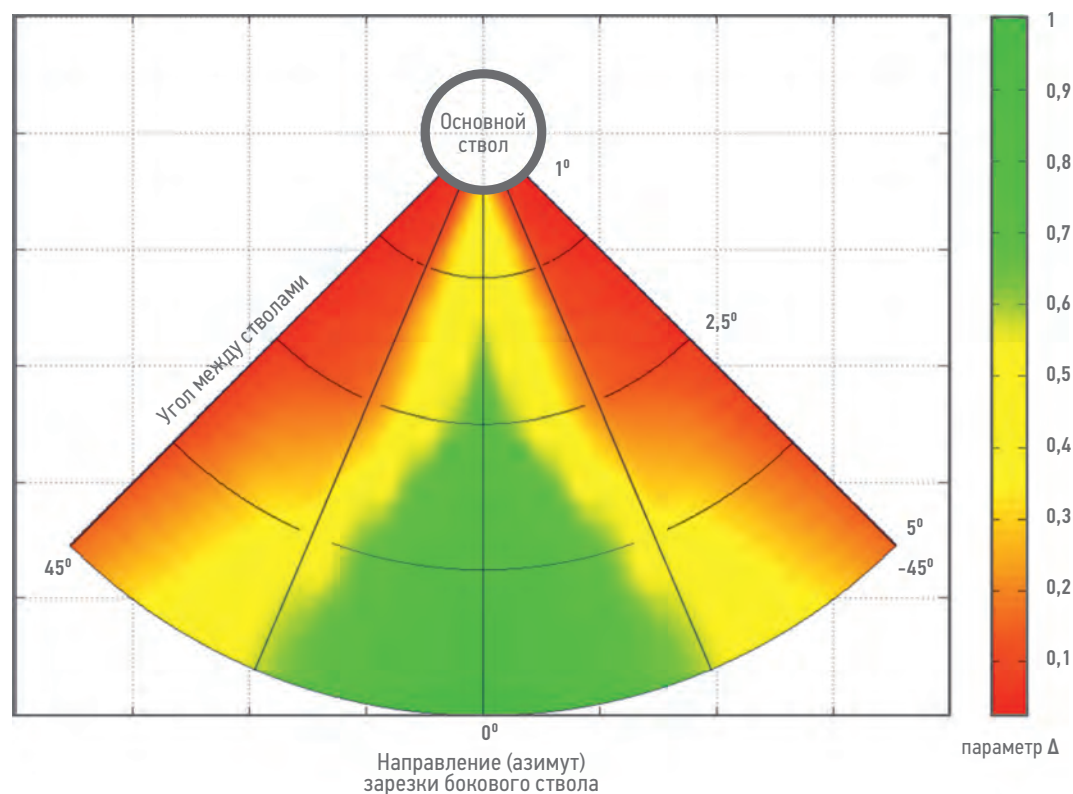


Рис. 4. Стереонет чувствительности (параметр Δ) к углу между стволами и направлению срезки из материнского
ствола. Составлено авторами

Fig. 4. Stereonet of the sensitivity parameter Δ to the angle between the main borehole and also the lateral borehole
direction from the main borehole. Prepared by the authors

Таблица 1. Рассчитанные интервалы разрушения перемычки и чувствительность для смоделированных сценариев при ориентации основного ствола (и, соответственно, срезки) в направлении SH и Sh

Table 1. The obtained results of the collapsed intervals of the bridge and the sensitivity for all modeled scenarios in the case of the orientation of the sidetracking in the both direction SH and Sh

Угол между стволами	Угол срезки относительно материнского ствола (четвертый квадрант)	Интервал разрушений перемычки, м. Направление в сторону:		Δ Направление в сторону:	
		Sh	SH	Sh	SH
1°	0°	0,45	0,45	0,34	0,34
	-22,5°	2,15	2,14	0,07	0,07
	-45°	6,14	6,1	0,025	0,025
2,5°	0°	0,21	0,21	0,726	0,726
	-22,5°	0,905	0,9	0,17	0,17
	-45°	2,72	2,75	0,056	0,055
5°	0°	0,15	0,15	1	1
	-22,5°	0,26	0,26	0,586	0,586
	-45°	0,956	0,95	0,16	0,16

ствола на устойчивость зоны сочленения. При расчетах азимут максимального горизонтального напряжения принят равным 160°, зенитный угол основного ствола — 86°, азимут основного ствола — 145°, угол между основным и боковым стволами — 2,5°. Боковой ствол направлен в 4 квадрант под углом -45°. Результаты моделирования свидетельствуют о незначительных изменениях устойчивости зоны сочленения при уменьшении диаметра бокового ствола со 155,6 до 152,4 мм при диаметре материнского ствола 155,6 мм (рис. 6). Интервал разрушения на расстоянии в области 6 м

уменьшился на 0,08 м, что составляет около 1,3%.

Сценарий 4. Расчет давления, при котором необсаженный ствол начнет схлопываться. В результате моделирования данного сценария исследовано влияние забойного давления при эксплуатации скважины на степень разрушения материнского ствола и зоны сочленения. При расчетах азимут максимального горизонтального напряжения принят равным 160°, зенитный угол основного ствола — 86°, азимут основного ствола — 145°, угол между основным и боковым стволами — 1°. Боковой ствол направлен под углом — 0°, т.е. срезка

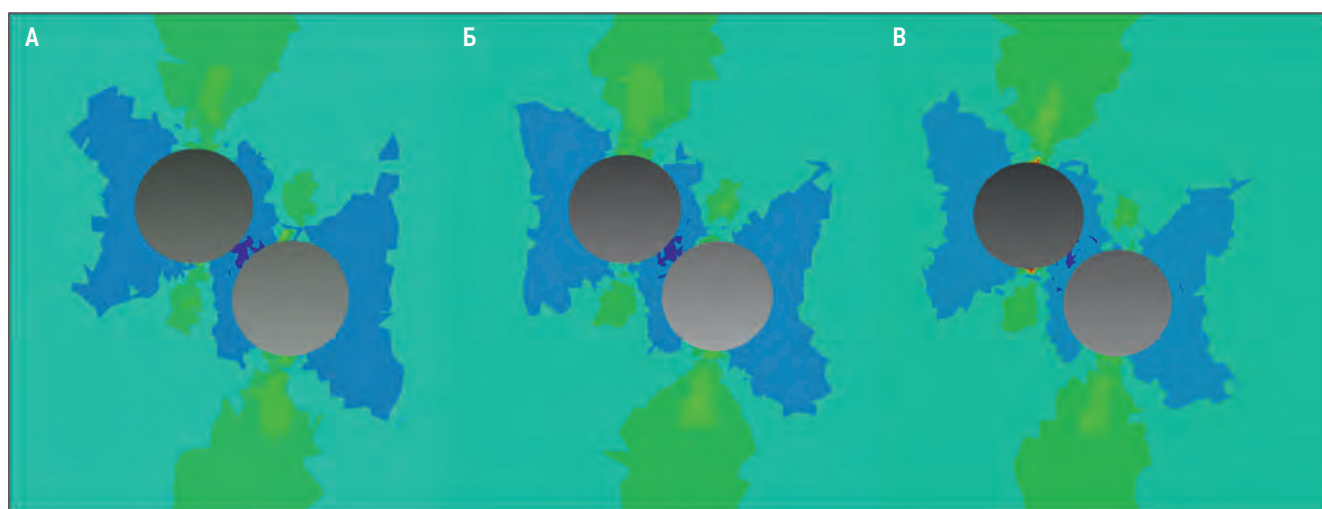


Рис. 5. Анализ чувствительности зоны сочленения к зенитному углу 86° (А), 89° (Б), 92° (В). Расстояние от места срезки в направлении SH 1,95 метра. Перемычка между стволами все еще подвержена разрушению. Легенда представлена на рис. 3. Составлено авторами

Fig. 5. The sensitivity analysis of the junction zone to the deviation angle 86° (A), 89° (B), 92° (V). The distance after the junction (kick-off) point (in the SH direction) is 1,95 meters. The bridge between the boreholes is still subject to collapse. The legend is shown on Fig. 3. Prepared by the authors

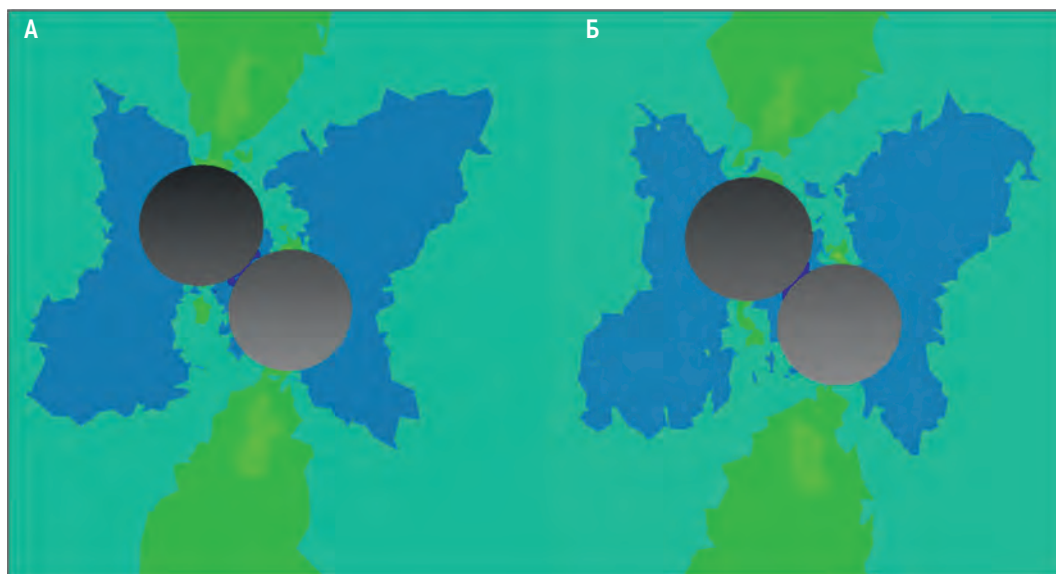


Рис. 6. Влияние диаметра бокового ствола на устойчивость зоны сочленения. Kstab рассчитан в плоскости, секущей зону сочленения основного и бокового стволов в 3,4 метра от точки срезки. Диаметр материнского ствола 155,6 мм; диаметр бокового ствола — 155,6 мм (А) и 152,4 мм (Б). При расхождении стволов возникает перемычка, которая начинает разрушаться. Легенда представлена на Рис. 3. Составлено авторами

Fig. 6. Results of the lateral borehole diameter influence analysis on the stability of the junction zone. Diameter of the main borehole is 155.6 mm; diameter of the lateral borehole is 155.6 mm (A) and 152.4 mm (B). The distance after the junction (kick-off) point is 3,4 meters. The bridge appears when the boreholes are diverged. The legend is shown on Fig. 3. Prepared by the authors

проводится строго вниз. Расчеты проводились при забойных давлениях в скважине равных 96, 77 и 67 % от пластовых (или 0,7, 0,8, 1 г/см³ в пересчете на удельный вес бурового раствора). Также для сравнения приведен результат с текущим (использованным в модели) удельным весом бурового раствора в статике — 1,08 г/см³.

Результаты моделирования показали, что при забойном давлении равном 77% от пластового, могут появляться зоны не только частичного разрушения материнского ствола, перемычки и разобращенных стволов, но и весьма значительные разрушения в области боковых стенок в зоне сочленения сложной геометрической формы, образующей овал (рис. 7). В случае, когда забойное давление составляет 67% от пластового, наблюдается полное разрушение стенок по всей окружности ствола при всех рассматриваемых сценариях.

Оценка местоположения точки срезки и устойчивости зоны сочленения в реальном времени. Для оперативной корректировки местоположения точки начала срезки применялось комплексное геомеханическое моделирование. Предбуровая модель расчета устойчивости стенки скважины (РУСС), построенная для каждого ствола многоствольной скважины на базе трехмерной геомеханической модели, обновлялась по данным, поступающим непосредственно

в процессе бурения в реальном времени, и была задействована далее для корректировки последующей точки срезки (КОР — Kick-off point).

На рис. 8 (а) представлена предбуровая модель материнского ствола с плановыми точками срезки. Полученные свойства модели МСДН участвовали в 3D-моделировании устойчивости зоны сочленения (средний рисунок, рис. 8), где можно видеть, что обрушения меняются не только на стенке скважин, но и в зоне перемычки двух стволов. Рекомендации по изменению точки срезки основывались на этом первичном результате, но дополнительным аргументом были результаты постбуровых РУСС для близлежащих, уже пробуренных ранее боковых стволов скважины типа fork.

На рис. 8 (б) представлен постбуровой РУСС близлежащего бокового ствола №3, корректным образом перенесенный на предбуровую модель для интервала срезки МТЛ #4 (sidetrack ST#3), где прослеживается соответствие тренду предбуровой модели (оранжевая заливка и зеленая кривая).

В результате заказчику предложен перенос точки срезки МЛТ №4 на 11 м выше по стволу в интервал с меньшим градиентом обрушения. Принятые рекомендации подтверждены постбуровой моделью и успешным продолжительным периодом добычи.

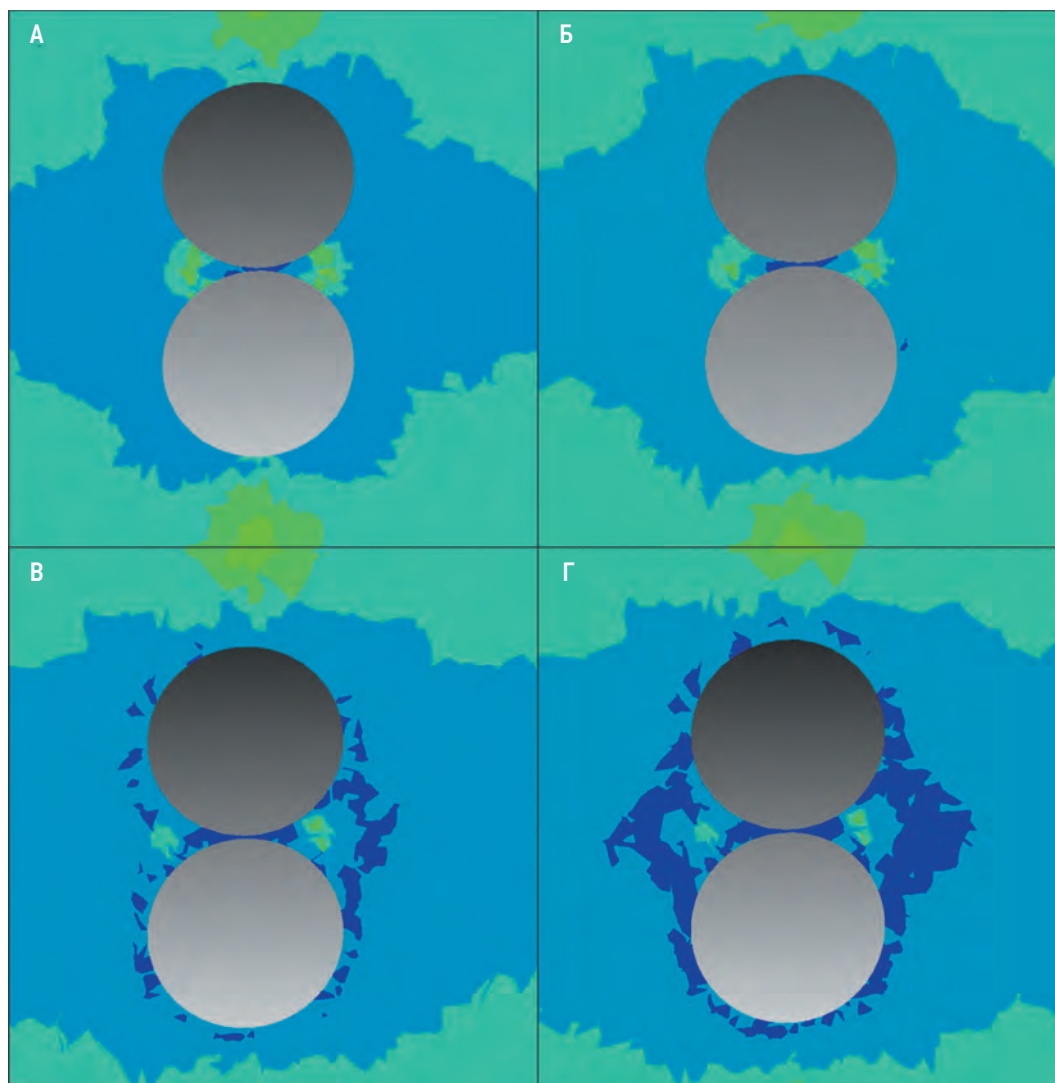


Рис. 7. Расчет НДС горного массива в околоскважинном пространстве для забойного давления (в пересчете на удельный вес бурового раствора): А) 1,08 г/см³; Б) 1 г/см³ (96% от пластового давления); В) 0,8 г/см³ (77% от пластового); Г) 0,7 г/см³ (67% от пластового). Легенда представлена на рис. 3. Расстояние от места срезки бокового ствола 8,5 м. При расхождении стволов возникает перемычка. Составлено авторами

Fig. 7. Simulation of the stress-strain behavior around the borehole for bottom hole pressure equal to А) 1,08 g/cc; Б) 1 g/cc (96% formation pressure); В) 0,8 g/cc (77% of formation); Г) 0,7 g/cc (67% of formation). The legend is presented in Fig. 3. 96%, 77% and 67% of the reservoir pressure during drilling and at the beginning of production. The distance after the junction (kick-off) point is 8,5 meters. The bridge appears when the boreholes diverge. Prepared by the authors

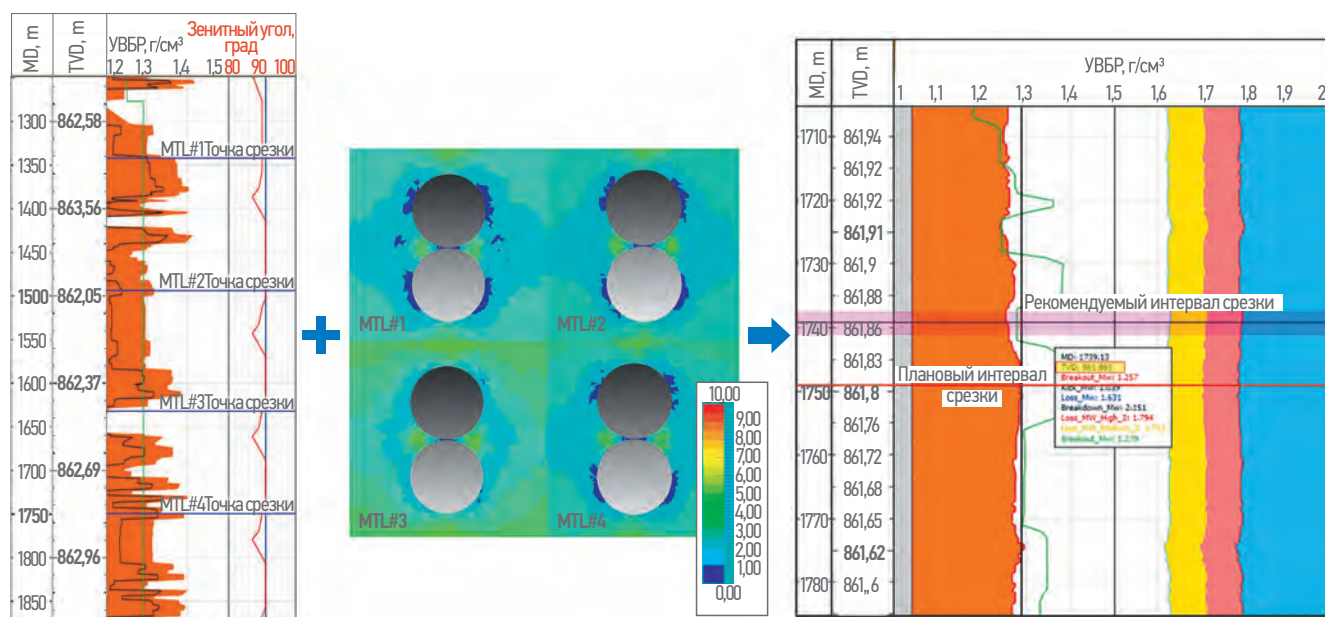
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ полученных результатов позволил оценить влияние каждого из входных параметров модели и получить нужную комбинацию, при которой наблюдаются минимальные разрушения в зоне сочленения стволов. На примере строительства ГС многоствольных скважин на одном из месторождений Западной Сибири выявлены следующие фундаментальные зависимости:

- разница в устойчивости зоны сочленения зависит от зенитного угла и азимута материнского ствола;
- в случае слабой анизотропии напряженного состояния (при условии

нормального режима напряжений) наблюдается симметричная картина разрушений для направления бокового ствола в 3-й и 4-й квадрант;

- зона сочленения основного и бокового стволов меньше подвержена разрушениям при увеличении угла между стволами;
- срезка в направлении нулевого азимута или близкого к нему (срезка строго вниз) наиболее предпочтительна ввиду меньшего разрушения в зоне сочленения;
- разница в устойчивости зоны сочленения при направлении срезки в сторону минимальных или максимальных горизонтальных напряжений незначительна и составляет ~1–2 %;



Условные обозначения:

- Удельный вес бурового раствора
- Пороговое давление
- Пороговое обрушения
- Градиент поглощений
- Градиент разрыва
- Средний риск поглощений
- Высокий риск поглощений
- Предбуровой градиент обрушения ST#4

Рис. 8. Алгоритм комплексного геомеханического моделирования, позволяющий в режиме реального времени корректировать плановую глубину точки срезки следующего бокового ствола. Слева — предбуровой РУСС для основного ствола; посередине — результат моделирования зоны сочленения двух стволов по параметрам 1Д ГММ; справа — постбуровой РУСС ST#4 и рекомендация по изменению точки срезки бокового ствола. Составлено авторами

Fig. 8. Algorithm of complex geomechanical modeling that allows adjustment of the planned depth of kick-off point for the next sidetrack. On the left — pre-drill wellbore stability (WBS) for the main borehole with four MTL kick-off points; in the middle — result of 3D modeling the junction zone stability using the result of 1D GMM parameters; on the right — post-drill WBS for MTL#4 kick-off point interval and recommendation to move KOP a little bit up by trajectory. This interval will be safer for both borehole wall and bridge between two boreholes. Prepared by the authors

- уменьшение диаметра бокового ствола сокращает интервал разрушений перемычки в зоне сочленения;
- определено забойное давление, при котором необсаженный ствол скважины в начале эксплуатации начинает неконтролируемо разрушаться.

Сопровождение бурения и оперативная выдача рекомендаций непосредственно при подходе текущего забоя к плановой зоне сочленения позволило корректировать плановые интервалы срезов вдоль материнского горизонтального ствола в наиболее безопасные интервалы в терминах устойчивости как для перемычки между стволами, так и для стенок скважин. Учет этих рекомендаций в процессе строительства скважины позволил осуществить безаварийное бурение. Корректность проведенного анализа подтверждена успешно

проведенными срезками и продолжительной устойчивостью зоны сочленения при дальнейшей добыче. Также разработан специализированный способ оценки и визуализации результатов анализа в виде чувствительности — параметра Δ , определяемого как отношение текущего диаметра скважины к длине интервала разрушения перемычки.

При строительстве многоствольных скважин комплексное трехмерное моделирование зоны сочленения с учетом результатов одномерного моделирования механических свойств, давлений и напряжений позволяет оптимизировать срезку бокового ствола, принимая во внимание как плановые, так и предпочтительные (по результатам моделирования) направления боковых стволов, а также наиболее безопасное направление интервала срезки.

Список литературы

1. Aadnøy B.S., Edland C. Borehole stability of multilateral junctions. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2001, no. 30, pp. 245–255. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(01\)00137-1](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(01)00137-1)
2. Aadnøy B.S., Froiland T.S. Stability of adjacent boreholes. Journal of Petroleum Science and Engineering. 1991, no. 6, pp. 37–43. [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(91\)90022-F](https://doi.org/10.1016/0920-4105(91)90022-F)
3. Assef Mohamad-Hussein, Juliane Heiland. 3D finite element modelling of multilateral junction wellbore stability. Journal of Petroleum Science. 2018. <https://doi.org/10.1007/s12182-018-0251-0>

4. Сeryakov A.V., Podberezhnyy M.Yu. Оценка оптимальных условий расположения горизонтальных скважин-фишбонов в условиях разработки месторождения Ямало-Ненецкого автономного округа // Георесурсы. — 2023. — № 25(1). — С. 130–139. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.1.13>
5. Горностаев Д.И., Неведов А.В., Непов Р.К., Смирнов Н.Ю., Шемякин Д.Н., Ишмуратов Р.И. Инженерный подход и особенности строительства горизонтальных скважин в условиях динамического истощения пласта. — РОЭК, 2023.

References

1. Aadnoy B.S., Edland C. Borehole stability of multilateral junctions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2001, no. 30, pp. 245–255. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(01\)00137-1](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(01)00137-1)
2. Aadnoy B.S., Froitland T.S. Stability of adjacent boreholes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 1991, no. 6, pp. 37–43. [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(91\)90022-F](https://doi.org/10.1016/0920-4105(91)90022-F)
3. Assef Mohamad-Hussein, Juliane Heiland. 3D finite element modelling of multilateral junction wellbore stability. *Journal of Petroleum Science*. 2018. <https://doi.org/10.1007/s12182-018-0251-0>
4. Seryakov A.V., Podberezhnyy M.Yu. Estimation of the fishbone optimal orientation for a Yamalo-Nenets Autonomous District oilfield. *Georesources*, 2023, no. 25(1), pp. 130–139. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2023.1.13>
5. Gornostalev D.I., Nefedov A.V., Nepov R.K., Smirnov N.Yu., Shemyakin D.N., Ishmuratov R.I. *Engineering approach and specific features of horizontal well construction under dynamic reservoir depletion conditions*. ROEC 2023. (In Russ.)

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Д.А. Тазьба — осуществил построение модели МСДН и проинтерпретировал полученные результаты, оптимизировал точки срезок в процессе сопровождения бурения скважин месторождения, разработал концепцию и подготовил текст статьи, согласен принять на себя ответственность за представленные аспекты работы.

Р.К. Непов — оказал экспертную поддержку в интерпретации полученных результатов, окончательно утвердил публикуемую версию статьи.

Н.Ю. Смирнов — оказал экспертную поддержку в области геомеханического моделирования и построения МСДН модели, анализе полученных результатов, окончательно утвердил публикуемую версию статьи.

Dmitry A. Tazba — developed the MSDN model and interpreted the results, optimized the kick-off points during the real-time drilling support, developed the concept and prepared the manuscript. Agreed to take responsibility for the aspects of the work presented.

Roman K. Nepov — provided expert support in interpreting the results and approved the final published version of the article.

Nikolay Y. Smirnov — provided expert support in geomechanical modeling and MSDN model construction, analyzed the results and approved the final published version of the article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дмитрий Алексеевич Тазьба* — инженер-геомеханик, ООО «ПетроГМ»
630090, Россия, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, д. 2/2.
e-mail: tazba.da@petrogm.com

Роман Кириллович Непов — старший инженер-геомеханик, ООО «ПетроГМ»

Николай Юрьевич Смирнов — главный инженер, ООО «ПетроГМ»

Dmitry A. Tazba — Geomechanics engineer, PetroGM LLC
2/2, Academician Lavrentyev Ave., 630090, Novosibirsk, Russia.
e-mail: tazba.da@petrogm.com

Roman K. Nepov — Senior engineer, PetroGM LLC

Nikolay Y. Smirnov — Chief engineer, PetroGM LLC

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author