

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики
Кафедра «Теоретическая механика»

Работа допущена к защите

Зав. кафедрой, д.ф.-м.н., чл.-корр.РАН

_____ **А. М. Кривцов**

" _____ " _____

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание академической степени

МАГИСТРА

Тема: Математическое моделирование устойчивости ствола скважины
 для задач бурения

Направление: 01.04.03 — Механика и математическое моделирование

Выполнил студент гр. 63604/2 _____ А.Е.Глазырина

Руководитель, к.ф.-м.н., _____ С.В.Лукин
 руководитель направления
 Отдела геомеханического моделирования
 ООО Газпромнефть НТЦ

Руководитель, к.ф.-м.н.,
 доцент кафедры
 “Теоретическая механика” СПбПУ, _____ О.С.Лобода

Консультант по вопросам
 охраны труда _____ В. В. Монашков

Санкт-Петербург
 2017

РЕФЕРАТ

47 с., 25 рис., 10 табл., 0 приложений, 25 источников

Объектом исследований данной работы является напряженно-деформированное состояние области вокруг ствола скважины. В среде Matlab исследуются распределения напряжений по контуру кругового отверстия для реверсивного, сдвигового и сбросового режимов напряжений. Рассматриваются скважины с различным отклонением от вертикальной оси (от вертикальных до горизонтальных стволов) и различной ориентацией относительно направления максимальных горизонтальных напряжений. Для выбранных параметров горной породы, исследуется значение требуемой плотности бурового раствора (давление на стенку скважины) по 6 критериям прочности. Полученные стереограммы, которые показывают значение плотности для скважин с различной девиацией и азимутальным углом при выбранном направлении максимального горизонтального напряжения.

Проведено решение плоской задачи о распределении напряжений по контуру скважины методом конечных элементов. Полученная по критериям прочности плотность бурового раствора подается в качестве граничного условия по давлению на внутреннюю поверхность цилиндра. После чего проводится серия расчетов для различных значений плотности с целью определения участков обвалообразования на трехмерной модели. Исследуется погрешность расчетов для квадратной сетки при использовании различных размеров элемента. Погрешность численного расчета оценивается в сравнении с аналитическим решением для плоской задачи. Приведен график сходимости численного решения к аналитическому в зависимости от выбранного типа сетки и степени дискретизации околоскважинной зоны. Выбраны размеры сетки, при которых погрешность расчета не превышает 4%.

По результатам исследования определено, что в условиях взбросового и сдвигового тектонических режимов, наиболее устойчивы горизонтальные скважины, пробуренные в направлении максимального горизонтального напряжения. В условиях нормального тектонического режима, наибольшей устойчивостью обладают вертикальные скважины.

По анализу влияния азимута максимального горизонтального напряжения получено, что для реверсивного режима напряжений допустимый азимут составляет 30° . Для сдвигового режима напряжений лучшей устойчивостью обладают горизонтальные скважины, проходящие в направлении максимального горизонтального напряжения (для отношения горизонтальных напряжений более 1,125) и горизонтальные скважины с азимутом 45° (для отношения горизонтальных напряжений более 1,04). В нормальном режиме напряжений рекомендуется проводить бурение скважин с углам наклона до 30° в направлении минимального горизонтального напряжения.

По анализу рассмотренных критериев прочности, критерии Треска и критерий Друкера-Прагера (для описанной окружности) дают значительно завышенные значения плотности бурового раствора. Широко применяемый критерий Мора-Кулона показал погрешность 6% от требуемой плотности, тогда как критерии Ладе и Друкера-Прагера (для вписанной окружности) 0,9% и 0,05% соответственно.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	6
Обзор литературы.....	8
ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ	10
Подготовка исходных данных	10
Упругая задача	11
Критерии прочности.....	13
Метод конечных элементов	20
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	23
Зависимость напряжений по контуру скважины от тектонического режима.....	23
Реверсивный или взбросовый режим напряжений (REVERSE).....	23
Сдвиговый режим напряжений (STRIKE-SLIP)	25
Нормальный или сбросовый режим напряжений (NORMAL)	27
Расчет по критериям прочности	29
Решение методом конечных элементов.....	32
Проверка сходимости численного решения.....	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	37
ОХРАНА ТРУДА	38
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	46

Перечень таблиц

Таблица 1 Режимы напряжений в горной породе.....	12
Таблица 2. Параметры модели для режимов revers, strike-slip и normal.....	23
Таблица 3. Размеры элементов сетки.....	35
Таблица 4. Оптимальная высота сидения и подставки для ног.....	40
Таблица 5. Оптимальные параметры микроклимата.....	41
Таблица 6. Допустимые параметры микроклимата.....	41
Таблица 7. Нормы подачи воздуха.....	41
Таблица 8. Предельно-допустимые уровни шума.....	42
Таблица 9. Допустимые значения неионизирующих электромагнитных излучений.....	44
Таблица 10. Характеристики приборов контроля.....	45

Перечень рисунков

Рисунок 1. Основные проблемы при бурении скважин.....	6
Рисунок 2. Преобразование системы координат для линейного участка наклонной скважины произвольно ориентированной в пространстве.....	11
Рисунок 3. Ориентация цилиндра для случая вертикальной и горизонтальной скважин...13	
Рисунок 4. Линейный критерий прочности Мора-Кулона. а) в пространстве главных напряжений; б) в девиаторной плоскости. (Mohr–Coulomb Failure Criterion Joseph) F. Labuz Arno Zang.....	15
Рисунок 5. Предельная поверхность Друкера-Прагера.	17
Рисунок 6. Вид предельной поверхности по модифицированному критерию Ладе. [16]...18	
Рисунок 7. Предельная поверхность Треска [18].	19
Рисунок 8. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру кругового отверстия для скважины с различным наклоном и проходящей в направлении S_{HMAX} . Тектонический режим reverse.	24
Рисунок 9. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру кругового отверстия для скважины с различным наклоном проходящей в направлении S_{Hmin} . Тектонический режим reverse. ...24	
Рисунок 10. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру скважин, проходящей под углами 30 и 60 градусов и различной ориентации относительно S_{HMAX} . Тектонический режим reverse. 25	
Рисунок 11. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру кругового отверстия для скважины, проходящей в направлении S_{HMAX} и S_{Hmin} . Тектонический режим strike-slip.26	
Рисунок 12. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру скважины, проходящей под углами 30 и 60 градусов и различной ориентации относительно S_{HMAX} . Тектонический режим strike-slip.26	
Рисунок 13. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру кругового отверстия для скважины, проходящей в направлении S_{HMAX} . Тектонический режим normal.....27	
Рисунок 14. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру кругового отверстия для скважины, проходящей в направлении S_{Hmin} . Тектонический режим normal.28	
Рисунок 15. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру скважины для углов наклона $10^\circ, 20^\circ$ и 30° ..28	
Рисунок 16. Плотность бурового раствора, рассчитанная по критериям прочности для тектонического режима reverse.30	
Рисунок 17. Плотность бурового раствора, рассчитанная по критериям прочности для тектонического режима normal.31	
Рисунок 18. Стереодиаграмма плотности бурового раствора для скважины в тектоническом режиме reverse, азимут $S_{HMAX} 0^\circ$31	
Рисунок 19. Стереодиаграмма плотности бурового раствора для скважины в тектоническом режиме strike-slip, азимут $S_{HMAX} 0^\circ$31	
Рисунок 20. Стереодиаграмма плотности бурового раствора для скважины в тектоническом режиме normal, азимут $S_{HMAX} 0^\circ$32	
Рисунок 21. Распределение свойств по глубине по данным геофизических исследований скважин.....33	
Рисунок 22. Граничные условия и КЭ сетка расчетной области.34	

Рисунок 23. Расположение контуров a , b и c в околоскважинной зоне.	34
Рисунок 24. Сходимость численного решения к аналитическому в зависимости от размера элемента по контурам a , b и c	35
Рисунок 25. Зависимость тангенциальных напряжений на контуре скважины (a) от разбиения области квадратными элементами.	36

ВВЕДЕНИЕ

Нарушение устойчивости ствола скважины является широко распространенной проблемой при бурении скважин. Нередки случаи потери циркуляции, водо- и газопроявления, посадки и затяжки при спуско-подъемных операциях. Нестабильность стенок скважины приводит к значительному увеличению непродуктивного времени бурения по геологическим причинам, связанному с проработками и обратными проработками, прихватами или затрудненной проходкой приборов каротажа до проектного забоя, дополнительным шаблонировкам ствола скважины и прихватам колонны бурильных и обсадных труб.

Физические процессы при бурении, разработке и эксплуатации нефтяных месторождений ставят задачи, которые требуют подхода механики деформируемого твердого тела.

Потеря устойчивости стенки скважины происходит, если напряжения в околоскважинной области превышают предел прочности материала. При бурении скважин существуют три основных типа проблем устойчивости, которые могут возникнуть, осыпи и кавернообразования, сужение ствола скважины при проходе через глинистые интервалы и разрыв пласта (автоГРП). Эти проблемы обычно связаны с плотностью и составом бурового раствора. Часто потеря устойчивости наблюдается при бурении в слабосцементированных породах, в интервалах пород с низкой прочностью и при высоких углах наклона скважины.

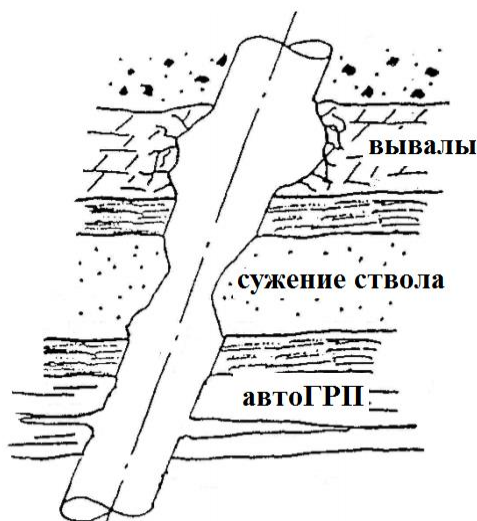


Рисунок 1. Основные проблемы при бурении скважин.

При бурении скважин происходит нарушение сплошности горной породы и перераспределение напряжений вблизи выработки. Следствием этого являются процессы, приводящие к потере устойчивости ствола скважины.

Главными параметрами для обеспечения устойчивости ствола скважины являются ее ориентация относительно главных напряжений, угол наклона и плотность бурового раствора, которая определяется на основании критерия прочности. Требуемая плотность бурового раствора, в зависимости от критерия прочности, будет различна. В стандартном подходе напряжения на стенке скважины получают из решения уравнений Кирша для пластины с круговым отверстием в поле внешних сил. Такая постановка задачи накладывает ряд ограничений, связанных с формой отверстия, а, следовательно, с тем

сечением, в котором проводится оценка напряженного состояния. Наиболее распространенные критерии прочности, используемые для расчета устойчивости горных пород: критерий Мора-Кулона (Mohr-Coulomb), Мого-Кулона (Mogi-Coulomb), модифицированный критерий Ладе (Modified Lade), критерий Друкера-Прагера (Drucker-Prager) и критерий Треска (Tresca).

Целью настоящей работы является исследование напряженно-деформированного состояния на контуре скважины в зависимости от тектонического режима, наклона скважины и ориентации максимального горизонтального напряжения. В работе приводится сравнение требуемой плотности бурового раствора по шести критериям прочности, что позволяет определить оптимальные параметры бурения скважины.

Обзор литературы

Первая скважина на нефть была пробурена на Апшеронском полуострове в 1847 г. под руководством В.Н.Семенова. В США первая скважина на нефть (25м) была пробурена в Пенсильвании Дэвидом Дрейком в 1959г. Этот год считается началом развития нефтедобывающей промышленности в США. Развитие российской нефтяной промышленности принято отсчитывать от 1964г., когда на Кубани в долине р.Кудако под руководством А.Н.Новосильцева была пробурена скважина на нефть глубиной 55м. Стоит отметить, что технологии бурения развивались задолго до рождения нефтедобывающей промышленности. Например, метод выноса пробуренной породы циркулирующим потоком был предложен в 1848г. французским инженером Фовеллем и впервые применен при бурении артезианской скважины в монастыре св.Доминика [1].

Выражения, описывающие распределение напряжений для упругой пластины с круговым отверстием, были получены в 1898г немецким инженером Эрнстом Густавом Киршем [2]. Hubbert и Willis [3] в 1957г используя уравнения [2] получили аналитические выражения для решения задачи о распределении напряжений вокруг вертикальной скважины в неоднородном поле напряжений и постоянном давлении жидкости в стволе скважины. пороупругая модель В середине XX века активно шли исследования поведения материала под нагрузкой. Результатом этих исследований стали труды Вестергарда[4], Мухелишвилли[5], Тимошенко[6].

Помимо фундаментального подхода, критерии прочности получены по результатам ряда экспериментальных исследований.

В 1979г Bradley рассмотрел задачу об устойчивости ствола наклонной скважины в поле сжимающих напряжений с целью подобрать оптимальное давление бурового раствора [7]. В своих исследованиях Bradley использовал трансверсально-изотропную модель среды, принимая максимальным главное вертикальное напряжение. В работах Ewy 1999г [8] проведено сравнение исследований предельных напряжения на стенке скважины рассчитанных по критериям Мора-Кулона, модифицированному критерию Ладе и критерию Друкера-Прагера. Он показал, что для рассматриваемых им случаев напряженного состояния и деформационных характеристик пород, модифицированный критерий Ладе показывает наименее консервативные результаты. Awal в 2001г заметил, что, в зависимости от режима напряжений (normal, strike-slip, reverse [9]) существует оптимальное направление бурения (вертикальная, наклонная или горизонтальная скважины).

Al-Ajmi and Zimmerman [12] получили критерий разрушения при трехосном сжатии, называемый модифицированный критерий Моги-Кулона. Данный критерий представляет собой линейную аппроксимацию поверхности Моги в пространстве октаэдрических напряжений ($\tau_{oct} - \sigma_{m,2}$), и включает в себя прочностные параметры, используемые в критерии Мора-Кулона: когезию и угол внутреннего трения. Он подтвержден на экспериментальных данных, полученных при испытании образцов на трехосное сжатие. В 2004г Al-Ajmi and Zimmerman [12] представили полный трехосный критерий прочности Моги-Кулона и в 2006г опубликовали аналитические выражения для пространственной модели, которая основана на линейной зависимости напряжений и деформаций и критерии прочности Моги-Кулона. В своей работе они получили более широкое окно плотности бурового раствора, чем по критерию Мора-Кулона. Этим авторы показали

влияние учета среднего значения главного напряжения на значение прочности горной породы. По вопросу сравнения критериев прочности существует множество работ [12, 13]. В 2010 г Zhang с соавторами [13] провели сравнение значений критического напряжения для пяти критериев прочности и образцах различных литотипов. По результатам их исследований, наилучшие показатели для описания разрушения образцов горных пород дают критерии Гука-Брауна и Мого-Кулона.

Для моделирования поля напряжений в околоскважинной зоне также используется численное моделирование. Например, уже в 1994г. McLean и Addis опубликовали работу, в которой они описывают применение метода конечных элементов для расчета параметров устойчивости. Wang and Sterling (2007) [14] получили численное решение для устойчивости горизонтальной скважины в процессе бурения. В том же году Muller представил работу, в которой описывается совмещенная механо-гидродинамическая модель и упруго-пластическая модель материала.

ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ

Подготовка исходных данных

Подготовка данных для геомеханического анализа является очень важным этапом. Под входными данными понимают наборы полевых и лабораторных исследований, которые позволяют сформировать представление о породах от устья до целевого интервала и по площади месторождения, а также формируют понимание о реакции горной породы на техногенное воздействие бурением или гидроразрывом пласта. От количества и качества информации о породе напрямую зависит достоверность результатов геомеханических прогнозов и рекомендаций.

Большой набор информации дают комплексные геофизические исследования (ГИС). С помощью этого метода получают информацию о плотности, электрической проводимости, радиоактивности, прочностных и деформационных свойствах пород. К ГИС также относятся акустические исследования, которые, для задач геомеханики, можно выделить отдельным блоком. Интерпретация широкополосного акустического каротажа (АКШ) позволяет получить информацию об анизотропии свойств.

Методы 2D и 3D сейсморазведки дают масштабное представление о исследуемой территории. С помощью них получают представление о структурной неоднородности и разломах.

Получить данных о фильтрационно-емкостных свойствах породы и величине и ориентации действующих пластовых напряжений, позволяют гидродинамические исследования скважин: тест на давление закрытия трещин миниГРП, тест на утечки (Leak-off test) несет информацию о величине пластового давления и о возможности наличия зоны АВПД (аномально высоких пластовых давлений)

Комплексные геофизические исследования скважин (ядерно-магнитный, плотностной, акустический, нейтронный, радиоактивный, электрический каротажи и профилометрия);

Помимо полевых замеров, выполняются лабораторные исследования отобранных образцов керна направленные на изучение деформационных и прочностных, а также фильтрационно-емкостных свойств породы. стандартные керновые исследования включают тесты на одноосное, трехосное сжатие, одноосное растяжение и многостадийное трехосное сжатие. по результатам керновых исследований строится паспорт прочности, с помощью которого определяют угол внутреннего трения. Образцы керна также несут информацию о трещиноватости, наличии и угле падения ослабленных напластований. Ориентированный керн дает представление об ориентации максимальных горизонтальных напряжений.

Упругая задача

Рассмотрим аналитическое решение задачи распределения напряжений вокруг ствола скважины. Будем рассматривать решение следующих постановок задачи:

Уравнения равновесия в декартовой системе координат имеют вид:

$$\sigma_{ij,j} + \rho F_j = 0 \quad (1)$$

Поскольку нас интересуют напряжения вокруг цилиндрического отверстия, потребуется цилиндрическая система координат с осью z , направленной вдоль оси скважины. Система уравнений (1) преобразуется:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \rho f_r = 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + \rho f_\theta = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \rho f_z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Напряжения по контуру прямолинейного участка скважины, произвольно ориентированной в пространстве, могут быть получены по закону преобразования компонент тензора напряжений при повороте системы координат с помощью направляющих косинусов (рис. 2). λ_{ij} означает косинус угла между осями i и j' (3). –(6). Расположение отверстия задается 2 поворотами относительно главных направлений стресса. i – угол между осью отверстия и направлением главного вертикального напряжения – инклинометрия (σ_v), α – угол поворота относительно главных горизонтальных напряжений – азимут (максимальное горизонтальное напряжение S_H направлено вдоль оси x).

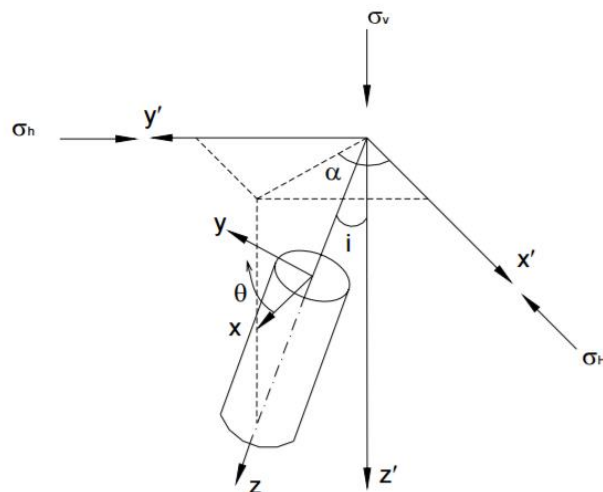


Рисунок 2. Преобразование системы координат для линейного участка наклонной скважины произвольно ориентированной в пространстве.

$$\begin{aligned}
\lambda_{xx} &= \cos \alpha \cos i & \lambda_{xy} &= \sin \alpha \cos i & \lambda_{xz} &= -\sin i \\
\lambda_{yx} &= -\sin \alpha & \lambda_{yy} &= \cos \alpha & \lambda_{yz} &= 0 \\
\lambda_{zx} &= \cos \alpha \sin i & \lambda_{zy} &= \sin \alpha \sin i & \lambda_{zz} &= \cos i
\end{aligned} \tag{3}$$

Вертикальное и два горизонтальных напряжения – это главные компоненты тензора напряжений, действующие по нормали к границе. Касательные компоненты равны нулю, за значение главных компонент соответствует неравенству $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Литологические условия характеризуются тем, что могут существовать различные режимы напряженного состояния: normal, strike-slip и reverse. Каждый режим характеризуется преобладанием определенной компоненты тензора напряжений таблица ...: например, при режиме normal, выполняется условие $\sigma_V > \sigma_H > \sigma_h$, для режима напряжений strike-slip $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$, а режиму reverse соответствует неравенство $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$ [9].

Таблица 1 Режимы напряжений в горной породе.

	σ_1	σ_2	σ_3
Normal	σ_V	σ_H	σ_h
Strike-slip	σ_H	σ_V	σ_h
Reverse	σ_H	σ_h	σ_V

Для удобства использования любого режима напряжений, преобразование системы координат будем проводить в главных компонентах тензора напряжений (4).

$$\begin{pmatrix} \sigma_H & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_h & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_V \end{pmatrix} \tag{4}$$

Получим выражения для компонент тензора напряжений в системе координат $X'Y'Z'$, связанной с осью скважины (6). Угол α – азимутальный угол, i – отклонение оси скважины от географической вертикальной оси (инклинометрия).

$$\Omega' = \Lambda \Omega \Lambda^T \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_x' &= (\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha) \cos^2 i + \sigma_V \sin^2 i \\
\sigma_y^0 &= \sigma_H \sin^2 \alpha + \sigma_h \cos^2 \alpha \\
\sigma_z^0 &= (\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha) \sin^2 i + \sigma_V \cos^2 i \\
\sigma_{xy}^0 &= 0.5(\sigma_h - \sigma_H) \sin 2\alpha \cos i \\
\sigma_{xz}^0 &= 0.5(\sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha - \sigma_V) \sin 2i \\
\sigma_{yz}^0 &= 0.5(\sigma_h - \sigma_H) \sin 2\alpha \sin i
\end{aligned} \tag{6}$$

Для решения системы уравнений (2) нам потребуются выражения компонент тензора в цилиндрической системе координат. Рассматривается задача о плоской деформации.

Такая задача включает в себя требования равенства нулю деформаций по z :

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zx} = 0 \quad (7)$$

тогда, по закону Гука $\frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)) = 0$, напряжения вдоль оси z будут выражаться зависимостью $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$.

В случае плоско-деформированного состояния, компоненты тензора эффективных напряжений в цилиндрической системе координат для прямолинейного участка скважины, произвольно ориентированного в пространстве, имеет вид (8) (контур скважины). Полный вид уравнений для напряжений в околоскважинной области приведен в приложении 1.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= P_w \\ \sigma_\theta &= \sigma_x^0 + \sigma_y^0 - 2(\sigma_x^0 - \sigma_y^0)\cos 2\theta - 4\sigma_{xy}^0 \sin 2\theta - P_w \\ \sigma_z &= \sigma_z^i - \nu[2\sigma_x^i - \sigma_y^i]\cos 2\theta + 4\sigma_{xy}^i \sin 2\theta \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнения (6) – (8) могут быть преобразованы для случаев вертикальной и горизонтальной скважин, если принять, что, в случае вертикальной скважины $i = 0$, а в случае горизонтальной скважины $i = \pi/2$.

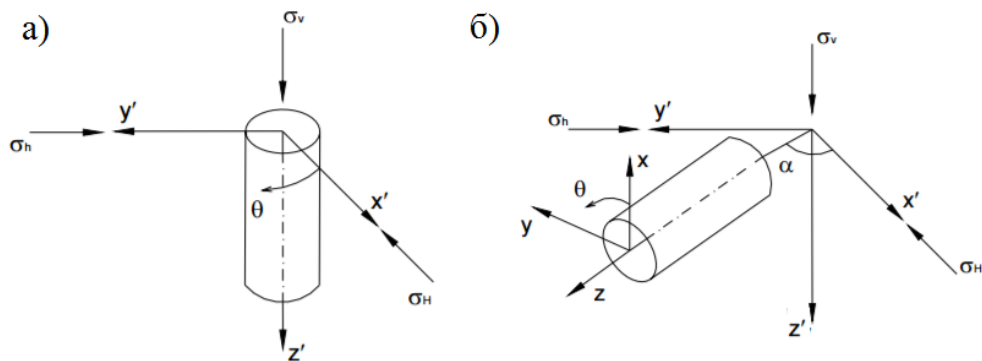


Рисунок 3. Ориентация цилиндра для случая вертикальной и горизонтальной скважин.

Критерии прочности

Для расчета требуемой плотности бурового раствора, с которой проводится бурение скважин, необходимо иметь представление о том, как порода ведет себя под нагрузкой. В общем случае, прочность породы является функцией трех главных эффективных напряжений и может быть представлена в виде поверхности в пространстве главных напряжений. Для изотропной породы функция нагружения должна быть симметрической функцией главных напряжений:

$$f(\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3) = 0 \quad (9)$$

где $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$ – главные компоненты тензора эффективных напряжений.

Следуя определению Терцаги и Био, эффективные напряжения для пористых насыщенных пород имеют вид:

$$\sigma' = \sigma - \alpha P_p \quad (10)$$

σ' – эффективные напряжения, σ - полные напряжения, α - константа Био, P_p - поровое давление.

Критерий прочности Мора-Кулона (Mohr-Coulomb)

Разрушение материала наступает, если на некоторой площадке тела с нормалью n , на которой действует нормальное σ_n и касательное τ_n напряжения возникает предельное состояние в виде неупругого сдвига (скольжения). При этом, промежуточная компонента тензора напряжений не учитывается в описании напряженного состояния. Исходя из этого предположения, любое напряженное состояние можно представить одним кругом Мора, построенным на главных напряжениях σ_1 и σ_3 . Теория Мора не только характеризует предельное напряженное состояние материала, при котором происходит разрушение, но и предсказывает ориентацию предельной площадки, на которой реализуется предельное состояние.

Для оценки напряженного состояния, возникающего в породе, по критерию Мора-Кулона, используется выражение через главные и касательные напряжения:

$$\tau = f(\sigma_n) \quad (11)$$

$$\tau = C + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi \quad (12)$$

τ – касательное напряжение, σ_n – нормальное напряжение, φ – угол внутреннего трения, C – когезия.

Критерием начала разрушения по модели Мора-Кулона будет такая комбинация напряжений в околоскважинной зоне, при которой значение функции F будет меньше или равным нулю:

$$F = C \cdot \cos \varphi + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (13)$$

На рисунке 4 показана предельная поверхность линейного критерия Мора-Кулона в меридиональной плоскости, в пространстве главных напряжений и в девиаторной плоскости. Точки на графике используются в выводе уравнений в приложении 1. T_0 – предел прочности при одноосном растяжении; C_0 – предел прочности при одноосном сжатии; S_0 - когезия; φ - угол внутреннего трения. Точка касания круга Мора и предельной поверхности характеризует разрушение.

Большое количество задач в механике горных пород решено с применением прямолинейной огибающей. Для выяснения степени влияния среднего по величине нормального напряжения σ_2 проведены опыты [21, 22], которые показали, что ошибка от не учета σ_2 не превышает 10-15%. Для хрупких анизотропных пород влияние σ_2

несколько увеличивается [23]. Исследования, выполненные С.А. Батугиным и В.А. Похилько в работе [24], показали, что упругопластические задачи весьма чувствительны к виду условия прочности. Особенно неустойчивы их решения в случае применения именно прямолинейной огибающей кругов главных напряжений.

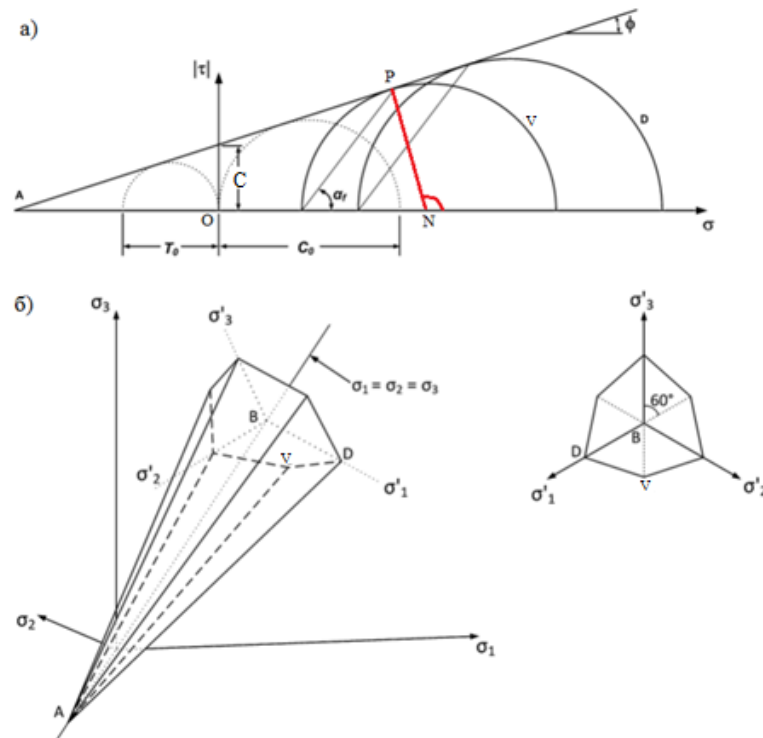


Рисунок 4. Линейный критерий прочности Мора-Кулона. а) в пространстве главных напряжений; б) в девиаторной плоскости. (Mohr–Coulomb Failure Criterion Joseph) F. Labuz Arno Zang

Критерий прочности Мого-Кулона (Mogi-Coulomb)

Как и критерий Мора-Кулона, данный критерий описывает механизм сдвигового разрушения и получен на экспериментальных данных. В своих работах Мого исследовал влияние промежуточного главного напряжения и пришел к выводу, что оно влияет на укрепление материала. Общий вид уравнения предельной поверхности имеет вид:

$$\tau_{oct} = f(\sigma_{m,2}) \quad (14)$$

где τ_{oct} - октаэдрическое касательное напряжение; $\sigma_{m,2}$ - промежуточное главное напряжение. Функция f соответствует степенному закону.

Впоследствии, данный критерий был пересмотрен Al-Ajmi и Zimmerman, которые в 2005г предложили заменить степенную функцию линейной аппроксимацией (вывод коэффициентов показан в приложении 1). Выражение для предельной поверхности принимает вид:

$$\tau_{oct} = a + b\sigma_{m,2} \quad (15)$$

В терминах главных напряжений:

$$\tau_{oct} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \left(C \cdot \cos \varphi + \sin \varphi \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \quad (16)$$

где C – когезия, φ – угол внутреннего трения.

Октаэдрические касательные напряжения могут быть получены через главные компоненты тензора напряжений:

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (17)$$

Критерием начала разрушения по модели Мого-Кулона будет такая комбинация напряжений в околоскважинной зоне, при которой значение функции F будет меньше или равным нулю:

$$F = \frac{2\sqrt{2}}{3} \left(C \cdot \cos \varphi + \sin \varphi \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) - \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (18)$$

Закон Друкера-Прагера (Drucker-Prager)

В 1952 году Друкер и Прагер в продолжении работ Мизеса и Кулона, предложили критерий (19), разрушения горной породы, который учитывает влияние промежуточного главного напряжения.

$$\sqrt{J_2} = A + BJ_1 \quad (19)$$

где коэффициенты A и B зависят от прочностных параметров горной породы, $J_1 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ первый инвариант девиатора тензора напряжений, $J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$ второй инвариант девиатора тензора напряжений, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные компоненты тензора напряжений.

По критерию Друкера-Прагера разрушение материала наступает когда октаэдрическое касательное напряжение $\tau_{oct} = \sqrt{\frac{3}{2}J_2}$ достигает критического значения, зависящего от октаэдрического нормального напряжения. Проекция предельной поверхности Друкера-Прагера (рис. 5) на девиаторную плоскость представляет собой окружность, которая может быть, описанной, так и вписанной для призмы Мора-Кулона. В зависимости от этого определяются коэффициенты A и B .

Коэффициенты A и B могут быть выражены через угол внутреннего трения и когезию. Для вписанной окружности коэффициенты определяются как:

$$A = \frac{6C \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)} \quad B = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)} \quad (20)$$

$$A = \frac{6C \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad B = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (21)$$

где C – когезия, φ – угол внутреннего трения.

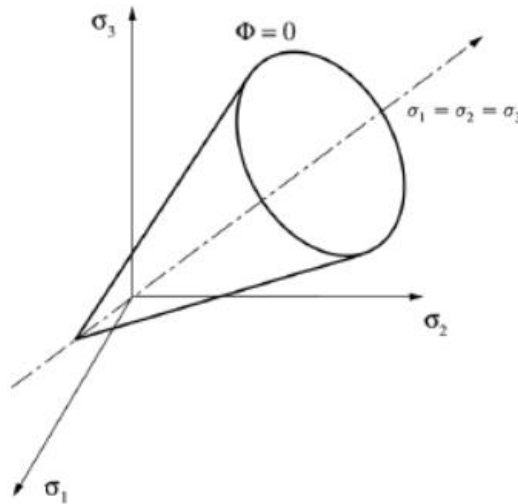


Рисунок 5. Предельная поверхность Друкера-Прагера.

Критерием начала разрушения по модели Друкера-Прагера будет такая комбинация напряжений в околоскважинной зоне, при которой значение функции F будет меньше или равным нулю. Уравнение (22) характеризует вписанную окружность, а уравнение (23) – описанную.

$$F = \frac{6C \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)} + \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (22)$$

$$F = \frac{6C \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} + \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (23)$$

Критерий прочности Ладе (Lade)

Классический критерий Ладе (24) получен для образцов с очень низким значение сцепления [16] и только позднее в работе [17] он был модифицирован для более широкого набора горных пород.

$$\left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^m = \eta_1 \quad (24)$$

$I_1 = \sum_{i=1}^3 \sigma_i'$, $I_3 = \prod_{i=1}^3 \sigma_i'$ - первый и третий инварианты тензора эффективных напряжений,
 p_a - атмосферное давления, ap_a приблизительно равен прочности при одноосном растяжении (бразильский тест).

Модифицированный критерий Ладе (Modified Laде)

Еву 1999 предложил упрощенный критерий Ладе, который позволяет описать наступление предельного состояния для горных пород:

$$\frac{I_1''^3}{I_3''} - 27 = \eta_1 \quad (25)$$

Был введен параметр S_a , который выражается через когезию и угол внутреннего трения по аналогии с критерием Мора-Кулона, коэффициент m не учитывается.

$$I_1'' = \sum_{i=1}^3 (\sigma_i + S_a - P_p) \quad I_3'' = \prod_{i=1}^3 (\sigma_i + S_a - P_p) \quad (26)$$

$$S_a = \frac{C}{\operatorname{tg} \varphi} \quad (27)$$

$$\eta = 4 \operatorname{tg}^2 \varphi \frac{9 - 7 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (28)$$

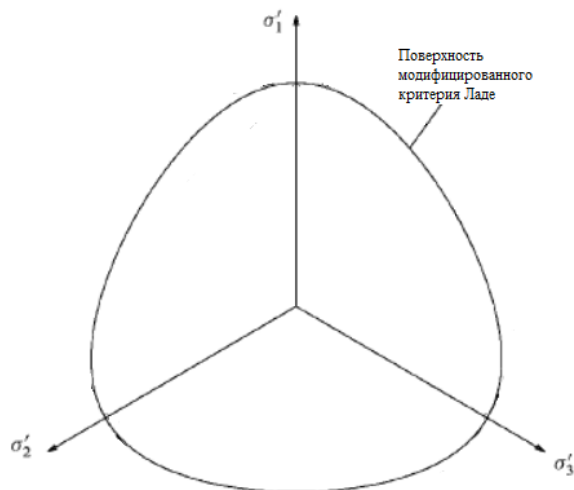


Рисунок 6. Вид предельной поверхности по модифицированному критерию Ладе. [16]

Критерием начала разрушения по модели Мора-Кулона будет такая комбинация напряжений в околоскважинной зоне, при которой значение функции F будет меньше или равным нулю:

$$F = 4 \operatorname{tg}^2 \varphi \frac{9 - 7 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - \frac{\left[\sum_{i=1}^3 \left(\sigma_i + \frac{C}{\operatorname{tg} \varphi} - P_p \right) \right]^3}{\prod_{i=1}^3 \left(\sigma_i + \frac{C}{\operatorname{tg} \varphi} - P_p \right)} - 27 \quad (29)$$

Критерий разрушения Треска (Tresca)

В 1864 году французский инженер Треска, анализируя результаты экспериментов по штамповке и выдавливанию заготовок из свинца, выдвинул гипотезу, согласно которой, пластическое течение возникает при достижении максимальным касательным напряжением предельного значения [18] и, за пределом упругости, во всех точках среды максимальное касательное напряжение имеет одно и то же значение для данного материала:

$$|\tau_{\max}| = \frac{|\sigma_i - \sigma_j|}{2} \quad (30)$$

В пространстве главных напряжений критерий Треска формирует шестигранную призму, равно наклонённую к гидростатической оси ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$), которая является предельной поверхностью (рис. 7а). В девиаторной плоскости сечение призмы Треска представляет собой правильный шестиугольник (рис. 7б).

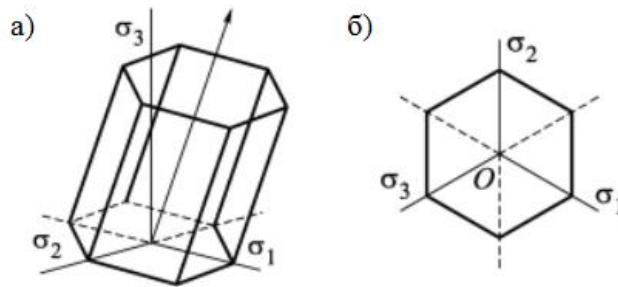


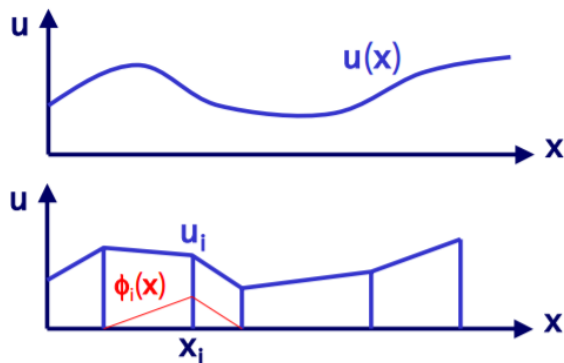
Рисунок 7. Предельная поверхность Треска [18].

Метод конечных элементов

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния околоскважинной области проводилось методом конечных элементов (МКЭ). Возникновение этого метода связано с решением задач космических исследований (1950г.). Впервые он был опубликован в работе Тернера, Клужа, Мартина и Топпа [19]. Позднее был опубликован ряд других работ с применением метода конечных элементов в области строительной механики и механики сплошной среды [22].

МКЭ позволяет получить численное (приближенное) решение задачи с определенной точностью. для проверки точности решения, когда это возможно, проводят сопоставление с аналитическим решением, но всегда выполняют проверку на сходимость, которая зависит от степени дискретизации расчетной области.

Особенностью МКЭ является то, что базисные функции не задаются одним выражением для всей рассматриваемой области, а определяются для отдельных элементов.



В результате аппроксимация строится кусочная функция отдельно на каждом элементе. Число элементов зависит от типа разбиения расчетной области. Непрерывная величина на элементе может быть описана линейной или квадратичной функцией. Подстановка аппроксимаций в определяющие дифференциальные уравнения дает систему уравнений относительно узловых значений искомой величины. Искомыми переменными являются перемещения узлов конечно-элементной сетки. После определения перемещений узлов элементов вычисляются деформации и, используя определяющие соотношения (например, закон Гука), напряжения во внутренних точках элемента.

Рассмотрим решение квазистатической задачи линейной теории упругости с помощью метода конечных элементов. Уравнение равновесия в перемещениях заключается для тела V будет иметь вид:

$$\nabla \cdot ({}^4 \underline{C}(r) \cdot \nabla u(r)) + \underline{f}_v = 0 \quad (31)$$

где \underline{r} – вектор-радиус рассматриваемой точки; $\underline{u} = u_k e_k$ – вектор перемещения; $\nabla = e_k \frac{\partial}{\partial x_k}$ – набла-оператор Гамильтона; ${}^4 \underline{C}(r) = C_{ijkl} e_i e_j e_k e_l$ – тензор упругих модулей; $\underline{f}_v = f_{vk} e_k$ – вектор объемных сил.

Наш объем V ограничен поверхностью S , на которой задаются граничные условия. В нашем случае будут поставлены смешанные граничные условия (на части тела заданы условия на вектор перемещений, на других частях – на вектор внешних сил).

$$\underline{u}|_{S_1} = \underline{u}_{s_1}(r), \quad \underline{n} \cdot \left({}^4 \underline{C}(r) \cdot \nabla \underline{u} \right) |_{S_2} = \underline{f}_{s_2}, \quad S = S_1 \cup S_2 \quad (32)$$

где $\underline{u}|_{S_1}$ – перемещения на границе S_1 , $\underline{f}_{s_2} = f_{s_2k} \underline{e}_k$ – вектор внешних сил, приложенный на поверхности S_2 , $\underline{n} = n_k \underline{e}_k$ – единичный вектор внешней нормали к поверхности тела.

Ищем решение, в предположении малости деформаций $|\nabla \underline{u}| \ll 1$, тогда закон о совместности деформаций:

$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon_{ij} \underline{e}_i \underline{e}_j = \frac{1}{2} \left(\nabla \underline{u} + (\nabla \underline{u})^T \right) = \underline{\varepsilon}^T = (\nabla \underline{u})^S = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \underline{e}_i \underline{e}_j \quad (33)$$

Теперь запишем определяющее соотношение для линейной гетерогенной анизотропной упругой среды записывается формулой Грина:

$$\underline{\sigma} = \sigma_{ij} \underline{e}_i \underline{e}_j = \frac{\partial W(\underline{\varepsilon})}{\partial \underline{\varepsilon}} = {}^4 \underline{C}(r) \cdot \underline{\varepsilon} = C_{ijmn} \varepsilon_{nm} \underline{e}_i \underline{e}_j \quad (34)$$

– $\underline{\sigma} = \underline{\sigma}^T$ – тензор напряжений, ${}^4 \underline{C}(r)$ – тензор упругих модулей, тензор 4-го ранга, $W(\underline{\varepsilon})$ – удельная потенциальная энергия деформации линейно-упругого тела.

Теперь проведем дискретизацию области. Положим, что область V представима, как совокупность дискретных элементов, которые имеют общие узлы, тогда $V^{(e)}, e = \overline{1, n^e}$ – число элементов. Глобальный вектор координат узлов: $X^T = \{ \dots, X_j^T, \dots \}_{j=\overline{1, n_p}}$, где n_p – число узловых точек. Локальный вектор координат узлов формируется из глобального вектора при помощи матрицы инцидентности $a_g^{(e)}$:

$$x^{(e)} = \{ \dots, x^{(e)T}, \dots \}_{i=\overline{1, m_g}} = a_g^{(e)} X \quad (35)$$

Такие же преобразования проводятся с вектором перемещений. Выражение для локального вектора перемещений формируется при помощи матрицы кинематических связей $a_f^{(e)}$:

$$u^{(e)T} = \{ \dots, u^{(e)T}, \dots \}_{i=\overline{1, m_g}} = a_f^{(e)} U \quad (36)$$

В произвольной точке с радиус-вектором $x^T = (x_1, x_2, x_3)$ перемещения выражаются, как:

$$\underline{U}(x) = N^{f^{(e)}} \mathbf{u}^{(e)} = N^{f^{(e)}} a_f^{(e)} U, \quad (37)$$

а сам радиус-вектор $x = N^{g^{(e)}} x^{(e)} = N^{g^{(e)}} a_g^{(e)} X$, $N^{f^{(e)}}$ – матрица интерполяционных полиномов, $N^{g^{(e)}}$ – матрица аппроксимирующих функций (функций формы).

Используя гипотезу о малости деформаций, выполним переход к дискретному представлению неизвестной функции. При этом набла-оператор заменим матрицей $B^{(e)}$ и вектор деформаций примет вид:

$$\varepsilon = B^{(e)} u^{(e)} = B^{(e)} a_f^{(e)} U \quad (38)$$

Аналогичным способом преобразуем соотношение упругости (для примера, термоупругости):

$$\sigma = D^{(e)} \varepsilon = D^{(e)} B^{(e)} a_f^{(e)} U \quad (39)$$

(для термоупругости $\sigma = D^{(e)}(D^{(e)} B^{(e)} a_f^{(e)} U - \varepsilon_0) + \sigma_0$)

В основе метода конечных элементов лежит принцип возможных перемещений:

$$\int_V \delta \varepsilon^T \cdot \sigma dV = \int_V \delta u^T \cdot f_V dV + \int_S \delta u^T \cdot f_S dS \quad (40)$$

где f_V и f_S – j, объемные и поверхностные силы, соответственно.

После несложных преобразований приходим к следующему равенству:

$$\delta U^T \left[\sum_{e=1}^{n_e} a_f^{(e)T} \left(\int_{V^{(e)}} B^{(e)T} D^{(e)} B^{(e)} dV \right) a_f^{(e)} \right] U = \delta U^T \sum_{e=1}^{n_e} a_f^{(e)T} \left(\int_{V^{(e)}} N^{f^{(e)T}} f_V dV + \int_S N^{f^{(e)T}} f_S dS \right) \quad (41)$$

В силу того, что δU – любое возможное перемещение, получаем систему линейных алгебраических уравнений $KU = F$. В этом матричном выражении присутствуют: глобальная матрица жесткости (K), выражаемая через матрицу жесткости элемента (k), глобальный вектор узловых сил (F), состоящий из объемной и поверхностной составляющих.

$$K = \sum_{e=1}^{n_e} a_f^{(e)T} k^{(e)} a_f^{(e)}, \quad k^{(e)} = \int_{V^{(e)}} B^{(e)T} D^{(e)} B^{(e)} dV, \quad F = \sum_{e=1}^{n_e} a_f^{(e)T} f^{(e)} = \sum_e a_f^{(e)T} (f_V^{(e)} + f_S^{(e)}) \quad (42)$$

$$f_V^{(e)} = \int_{V^{(e)}} N^{f^{(e)T}} f_V dV, \quad f_S^{(e)} = \int_{S^{(e)}} N^{f^{(e)T}} f_S dS \quad (43)$$

Решение уравнения проводится с помощью численного метода (матрица жесткости сильно разрежена и имеет высокое число обусловленности, поэтому декомпозиция проводится, например, методом Холецкого). В ходе решения системы КЭ уравнений выполняется условие, чтобы глобальный вектор узловых неизвестных U удовлетворял главным граничным условиям.

Итак, решив систему уравнений, мы нашли глобальный вектор узловых перемещений U. Теперь можно определить перемещения, деформации и напряжения в любой точке тела по формулам:

$$\begin{aligned} u &= N f^{(e)} u^{(e)} = N f^{(e)} a_f^{(e)} U \\ \varepsilon &= B^{(e)} u^{(e)} = B^{(e)} a_f^{(e)} U \\ \sigma &= D^{(e)} (\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 = D^{(e)} (B^{(e)} a_f^{(e)} \delta U - \varepsilon_0) + \sigma_0 \end{aligned} \quad (44)$$

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Зависимость напряжений по контуру скважины от тектонического режима

Рассматривается решение задачи Кирша о распределении напряжений на контуре кругового отверстия при трех возможных тектонических режимах напряжений. В таблице 2 приведены параметры материала и значения главных действующих в породе напряжений. Вертикальное напряжение рассчитывалось, как литостатическое на глубине 2000м при средней плотности вышележащих пород 2000 г/см³, поровое давление равно гидростатическому, отношение горизонтальных напряжений принято 1:1,125.

Таблица 2. Параметры модели для режимов revers, strike-slip и normal

Название параметра	Reverse	Strike-slip	Normal	Ед.измерения
Модуль Юнга	13			ГПа
Коеф. Пуассона	0,2			–
Плотность	2000			г/см ³
Глубина (TVD)	2000			м
S _v	39.24	39.24	39.24	МПа
S _H	46.125	44.145	34.88	МПа
S _h	41	37.73	29.31	МПа
P _p	20.601			МПа

Реверсивный или взбросовый режим напряжений (REVERSE)

При режиме reverse максимальным главным напряжением является S_{HMAX} , минимальным – вертикальное S_v . Для разных углов наклона скважины, проходящей в направлении S_{HMAX} , рассчитаны тангенциальные напряжения на контуре кругового отверстия (рис.8).

На рисунке 8а показано полученное показано распределение тангенциальных напряжений по контуру скважины для углов наклона от 0 до 90°.

Для вертикальных скважин вывалы образуются в направлении S_{Hmin} ($\theta = 90 + \pi/2$), трещины – в направлении S_{HMAX} (0 градусов). С увеличением отклонения скважины от вертикальной оси в направлении S_{HMAX} , влияние максимального горизонтального напряжения снижается. В случае горизонтальной скважины, направленной вдоль S_{HMAX} , напряженное состояние на ее поверхности определяется соотношением S_v и S_{Hmin} . Из условия тектонического режима получаем, что верхняя и нижняя стенки скважины более подвержены обвалообразованию, а боковые стенки – трещинам автоГРП. Наименее стабильна вертикальная скважина, так как напряженное состояние на контуре формируется под действием максимальной и минимальной главных компонент тензора напряжений. Наименьшее значение $\sigma_{\theta\theta}$ достигает в случае горизонтальной скважины. На рисунках 8а и 8б рассмотрены случаи, когда $\sigma_{HMAX}/\sigma_{Hmin} = 1,125$, $\sigma_{Hmin}/\sigma_v = 1,04$ и

$\sigma_{HMAX} / \sigma_{HMIN} = 1,125, \sigma_{HMIN} / \sigma_v = 1,125$. Можно сделать общий вывод о том, что для режима reverse и бурения вдоль максимального горизонтального напряжения наиболее устойчивы скважины, угол наклона которых превышает 45° . Чем меньше соотношение σ_2 / σ_3 , тем менее скважина подвержена обрушению.

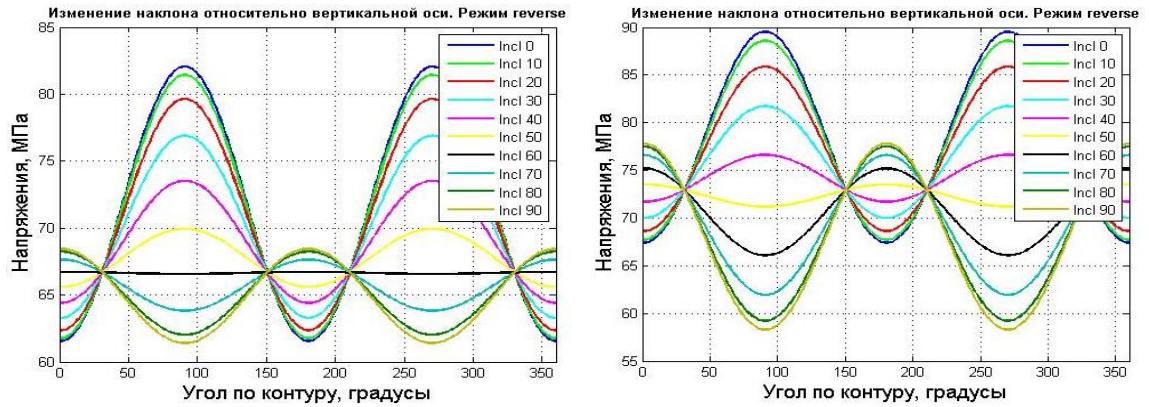


Рисунок 8. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру кругового отверстия для скважины с различным наклоном и проходящей в направлении S_{HMAX} . Тектонический режим reverse.

Наибольшие сложности для данного тектонического режима возникнут при бурении скважин в направлении минимального горизонтального напряжения. На графике (рис.9) $\theta = 0$ соответствует направлению минимального горизонтального напряжения, а угол $\theta = 90 + \pi/2$ – максимального горизонтального. Увеличение угла наклона способствует росту сжимающих и растягивающих тангенциальных напряжений на поверхности скважины. Для горизонтальных скважин в направлении S_{HMIN} напряженное состояние на контуре зависит от максимального и минимального главных напряжений (S_{HMAX} и S_v), что приводит к значительным концентрациям сжимающих и растягивающих тангенциальных напряжений.

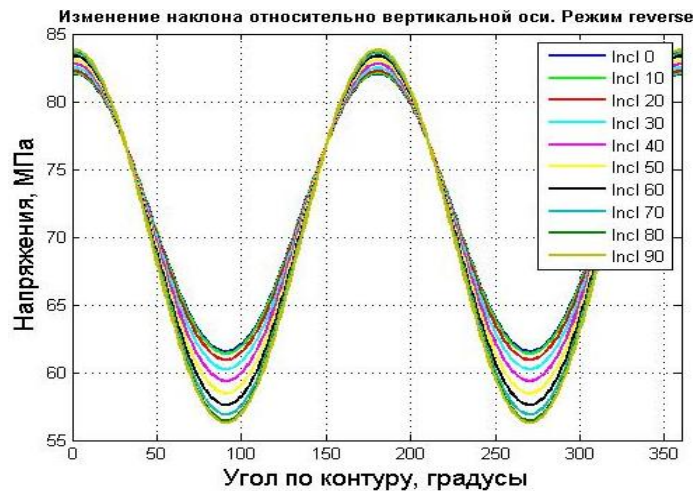


Рисунок 9. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру кругового отверстия для скважины с различным наклоном проходящей в направлении S_{HMIN} . Тектонический режим reverse.

Вывод. Из рассмотренных случаев бурения в направлении одного и главных компонент тензора напряжений, для тектонического режима reverse, более устойчивы скважины с углом наклона более 45 градусов проходящие в направлении S_{HMAX} .

На устойчивость скважины также влияет ее ориентация (азимут) скважины относительно главных горизонтальных напряжений. Рассмотрены два типа скважин: с наклоном 30° и 60° в режиме reverse. Направление относительно максимального горизонтального напряжения $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ и 90° . Результаты расчета приведены в виде графиков распределения тангенциальных напряжений по контуру кругового отверстия (рис. 10а,б). По мере возрастания азимутального угла, увеличивается влияние S_{HMAX} , как $r_{well} \sin Azim$, что приводит к увеличению вариации напряжений на поверхности скважины. из графиков (рис. 10а, б) видно, для скважин в тектоническом режиме reverse необходимо проводить в направлении до 30 градусов от направления максимального горизонтального напряжения.

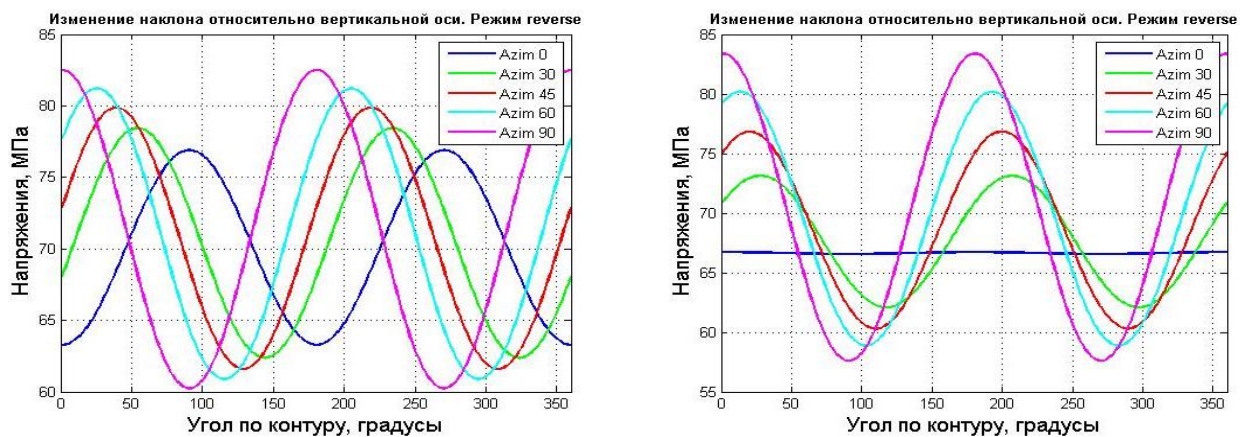


Рисунок 10. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру скважин, проходящей под углами 30 и 60 градусов и различной ориентации относительно S_{HMAX} . Тектонический режим reverse.

Вывод. Для тектонического режима reverse более устойчивы скважины с углом наклона больше 45° и азимутом относительно максимальных горизонтальных напряжений до 30° .

Сдвиговый режим напряжений (STRIKE-SLIP)

Для тектонического режима strike-slip $\sigma_1 = S_{HMAX}$, $\sigma_3 = S_{Hmin}$. На рисунке 11 показано полученное распределение тангенциальных напряжений по контуру скважины для углов наклона от 0 до 90° .

В случае горизонтальной скважины, направленной вдоль S_{HMAX} , как и в режиме reverse, напряженное состояние на поверхности скважины формируется под действием промежуточного и минимального главных компонент тензора напряжений. Отличие состоит в том, что образованию вывалов подвержена боковая стенка горизонтальной скважины, а трещины автоГРП инициируются в направлении вертикального напряжения.

В тектоническом режиме strike-slip наименее стабильна вертикальная скважина. Минимальное значение тангенциального напряжения достигается в случае горизонтальной скважины, проходящей в направлении S_{HMAX} (рис. 11).

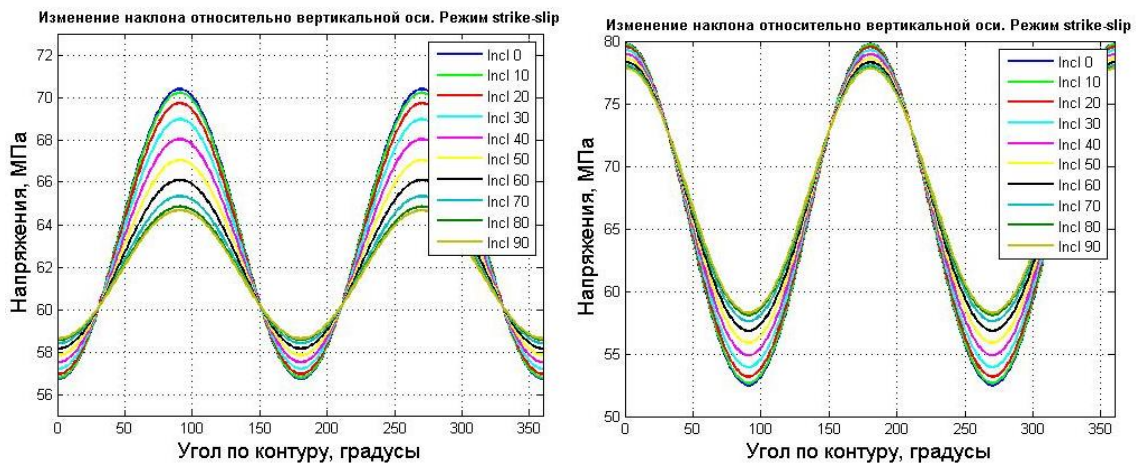


Рисунок 11. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру кругового отверстия для скважины, проходящей в направлении S_{HMAX} и S_{Hmin} . Тектонический режим strike-slip.

Для скважин, направленных вдоль S_{Hmin} , наклон 90° обеспечивает наименьшие значения сжимающих напряжений, но эти значения выше, чем для аналогичной скважины, направленной вдоль максимального горизонтального напряжения.

Исследовано влияние ориентации ствола скважины относительно максимальных горизонтальных напряжений. Рассмотрены две скважины с наклоном 30° и 60° . Тангенциальные напряжения для скважины с углом наклона 30° в целом выше при любом азимуте относительно максимальных горизонтальных напряжений, чем для скважины, пробуренной под 60° . Значения напряжений по контуру скважины с наклоном 60° зависят от ориентации относительно максимального горизонтального напряжения. Наиболее устойчивы скважины с азимутом до 30° .

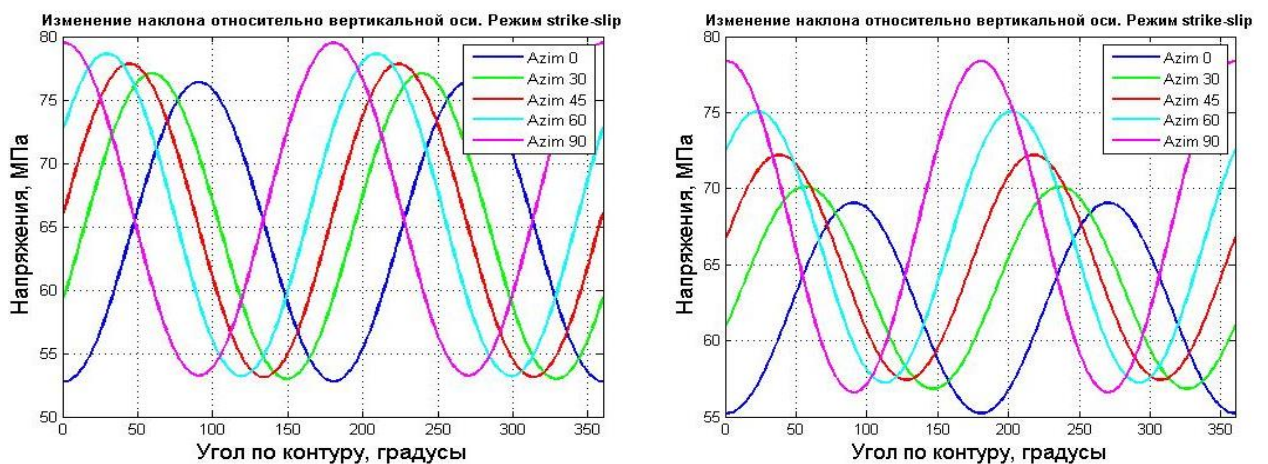


Рисунок 12. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру скважины, проходящей под углами 30 и 60 градусов и различной ориентации относительно S_{HMAX} . Тектонический режим strike-slip.

Вывод. Для тектонического режима strike-slip лучшей устойчивостью обладают горизонтальные скважины, проходящие в направлении максимального горизонтального напряжения. Допустимо отклонение по азимуту скважина до 30° от направления максимального горизонтального напряжения.

Нормальный или сбросовый режим напряжений (NORMAL)

Для тектонического режима normal $\sigma_1 = S_v$, $\sigma_3 = S_{H\min}$. На рисунке 13 показано полученное распределение тангенциальных напряжений по контуру скважины для $\sigma_v \neq \sigma_H \neq \sigma_h$ и $\sigma_v \neq \sigma_H = \sigma_h$.

Из графика видно, что, в отличие от предыдущих режимов напряжений, в режиме normal вертикальная скважина большей устойчивостью, в сравнении с наклонными. С увеличением наклона скважины возрастает влияние вертикального давления на ее стенку. Так как вертикальные напряжения для режима normal является максимальным – стенки скважины становятся более подвержены разрушению. Для трансверсально-изотропного напряженного состояния породы (рис. 13б) напряжения в целом ниже, чем при анизотропном напряженном состоянии. Для вертикальной скважины и скважины с углом наклона 30° увеличение тангенциальных напряжений составляет около 3 МПа.

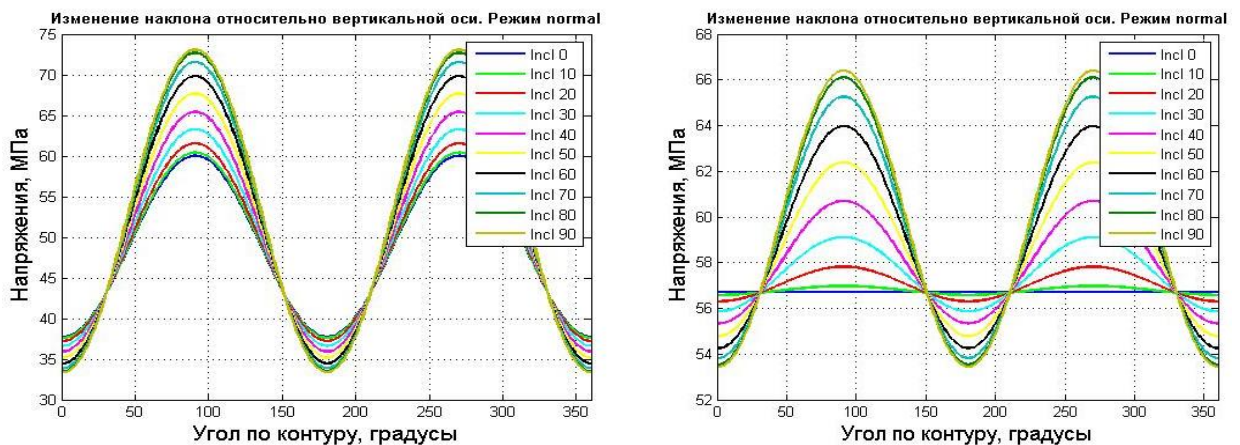


Рисунок 13. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру кругового отверстия для скважины, проходящей в направлении $S_{H\max}$. Тектонический режим normal

Для горизонтальной скважины, направленной вдоль $S_{H\max}$, напряженное состояние на ее поверхности определяется соотношением S_v и $S_{H\min}$. Так как вертикальное напряжение является максимальным, образованию вывалов подвержены боковые стенки скважины.

На рисунке 14 показаны полученные распределения тангенциальных напряжений по контуру скважины для случаев различного угла наклона ствола скважины проходящих в направлении максимального горизонтального напряжения. Минимальные значения тангенциальных напряжений характерны для вертикальной скважины. для скважины с углом наклона 30° напряжения на контуре практически равномерны и определяются соотношением главных напряжений. В рассмотренном случае $\sigma_1 = 1.125\sigma_2$.

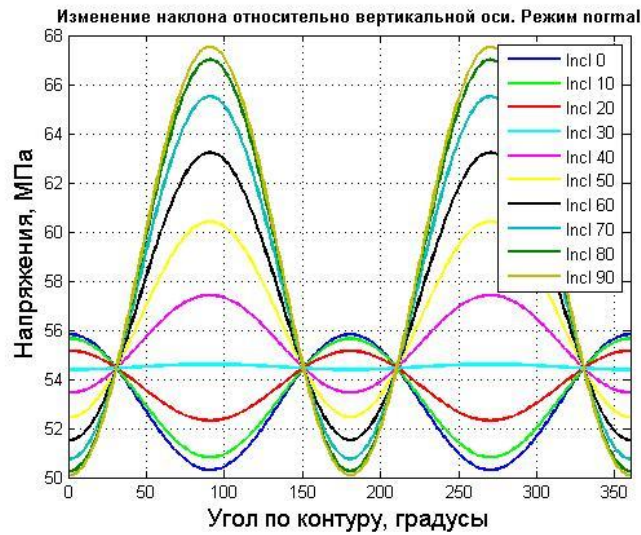


Рисунок 14. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру кругового отверстия для скважины, проходящей в направлении $S_{H\min}$. Тектонический режим normal.

На практике вертикальные скважины встречаются намного реже, чем наклонные или горизонтальные. Проведен анализ влияния азимута ствола скважины (направления относительно $S_{H\max}$) на распределение напряжений по контуру для скважин с наклоном 10, 20 и 30 (рис. 15).

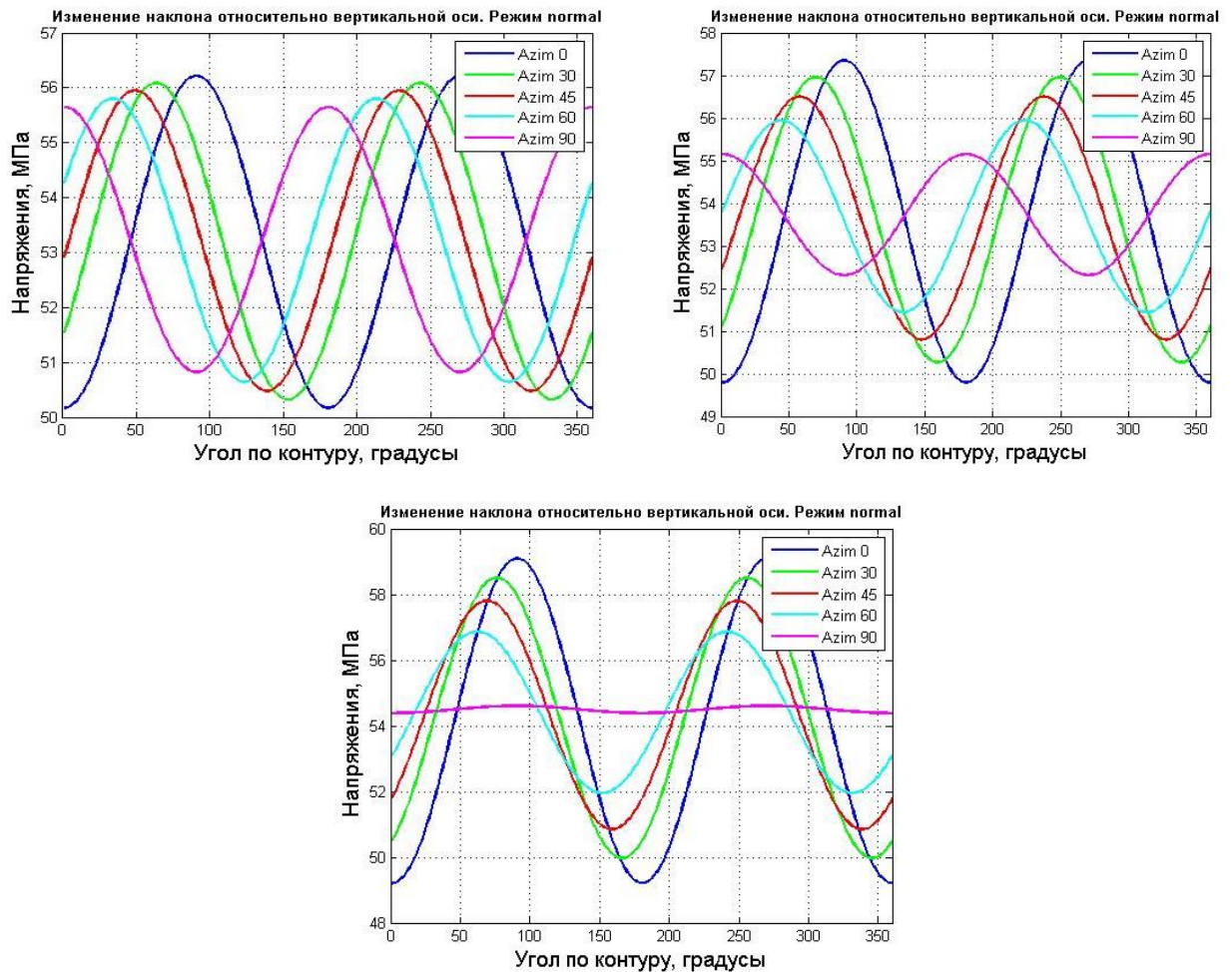


Рисунок 15. Распределение $\sigma_{\theta\theta}$ по контуру скважины для углов наклона 10° , 20° и 30°

Как и показывали предыдущие расчеты, с увеличением угла наклона скважины, растут напряжения на ее контуре. Так для скважины с углом наклона 10° с изменением азимута, наблюдается изменение напряжений на 0,1 МПа на 30° поворота. Угол наклона скважины 20° приводит к росту тангенциальных напряжений на 1 МПа, в сравнении с аналогичным типом скважины в предыдущем расчете, а зависимость от азимута составляет 0,3 МПа на 30° поворота. Если продолжить увеличивать угол наклона скважины, то станет видно, что относительно предыдущего расчета, напряжения на контуре вертикальной скважины возросли также на 1 МПа, но изменение напряжений по азимуту уже составляет на 0,5 МПа на 30° поворота. Для скважины в направлении минимальных горизонтальных напряжений с ростом угла наклона наблюдается снижение вариации напряжений по контуру. с углом наклона 30° . Этот эффект объясняется тем, что с увеличением угла наклона возрастает влияние вертикального напряжения и напряженное состояние на контуре скважины формируется под действием S_v и S_{HMAX} . Соответственно, степень вариации тангенциальных напряжений в таком случае определяется соотношением σ_1/σ_2 . В отличие от предыдущих режимов напряжения, наклонная скважина в направлении максимального горизонтального напряжения будет менее устойчива, чем в направлении S_{Hmin} .

Расчет по критериям прочности

В работе рассматриваются 6 критериев прочности: Мора–Кулона, Мого–Кулона, модифицированный критерий Ладе, критерий Друкера–Прагера для вписанной и описанной предельных поверхностей, критерий Треска.

Расчет требуемой плотности бурового раствора проводился в программе Matlab. В качестве исходных данных подавались значения главных компонент тензора напряжения и величина порового давления на фиксированной глубине. Азимут и инклинометрия задавались массивами (0, 360) и (0,90) соответственно.

Методика расчета:

- исходный тензор напряжений преобразуется в географическую систему координат так, чтобы направление максимального горизонтального напряжения было со направлено с осью X,
- полученный тензор преобразуется в систему координат, связанную со скважиной, используя азимут и угол наклона.
- вычисляются компоненты тензора напряжений в цилиндрической системе координат
- Рассчитывается функция F, определяющая критерий разрушения. При этом давление бурового раствора изначально равно нулю
- Для каждого критерия прочность проверяется условие на функцию F, если значение меньше или равно нулю, плотность бурового раствора увеличивается на 0,01 МПа.

На рисунке 16 приведен результат расчета требуемой плотности бурового раствора по разным критериям прочности. Расчет проводился для тектонического режима reverse,

азимут максимального горизонтального напряжения 0° . На рисунке 17 – аналогичный расчет для тектонического режима normal в направлении минимальных горизонтальных напряжений. Для режима reverse минимальная плотность бурового раствора требуется при бурении скважины с наклоном 50° в направлении максимального горизонтального напряжения. Вертикальная скважина в таком режиме менее устойчива. Отличие плотности для вертикальной и горизонтальной скважин в среднем составляет $0,05 \text{ г/см}^3$. В режиме normal более устойчивы вертикальные скважины. минимальная плотность бурового раствора требуется для скважины с наклоном 20° в направлении минимального горизонтального напряжения. Критерии прочности учитывают прочностные параметры породы такие как угол внутреннего трения и когезию. Значения этих параметров влияют на угол наклона, при котором требуется минимальная плотность бурового раствора.

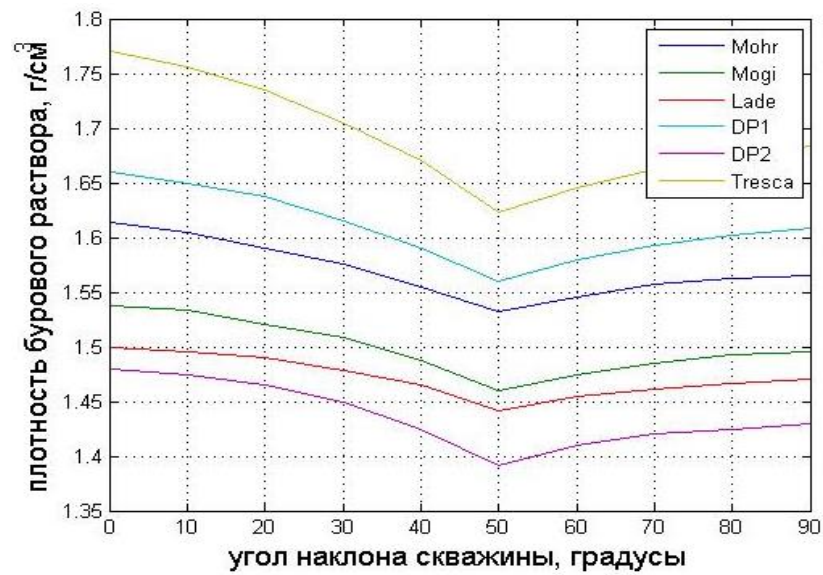


Рисунок 16. Плотность бурового раствора, рассчитанная по критериям прочности для тектонического режима reverse.

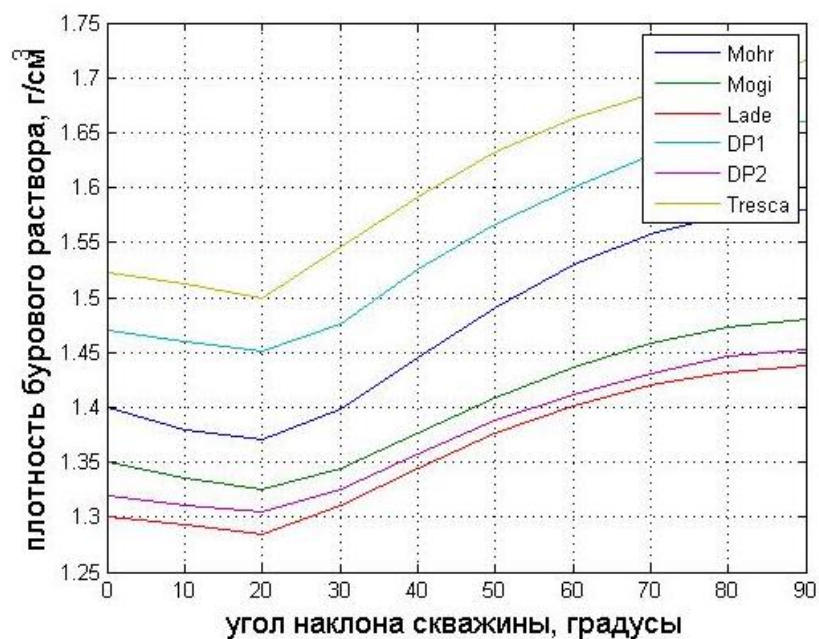


Рисунок 17. Плотность бурового раствора, рассчитанная по критериям прочности для тектонического режима normal.

Более наглядное представление о плотности бурового раствора в зависимости от угла наклона, азимута и критерия прочности можно получить с помощью стереограмм. Для построения стереограмм код программы в Matlab, для плотности бурового раствора, расширен дополнительным циклом по азимуту скважины. Стереограммы (рис. 17 – 19) позволяют рассчитать плотность бурового раствора по различным критериям прочности и определить оптимальное направление и угол наклона скважины на фиксированной глубине для каждого режима напряжений. Такая возможность может быть полезна как при расчете устойчивости, так и при планировании траектории скважины.

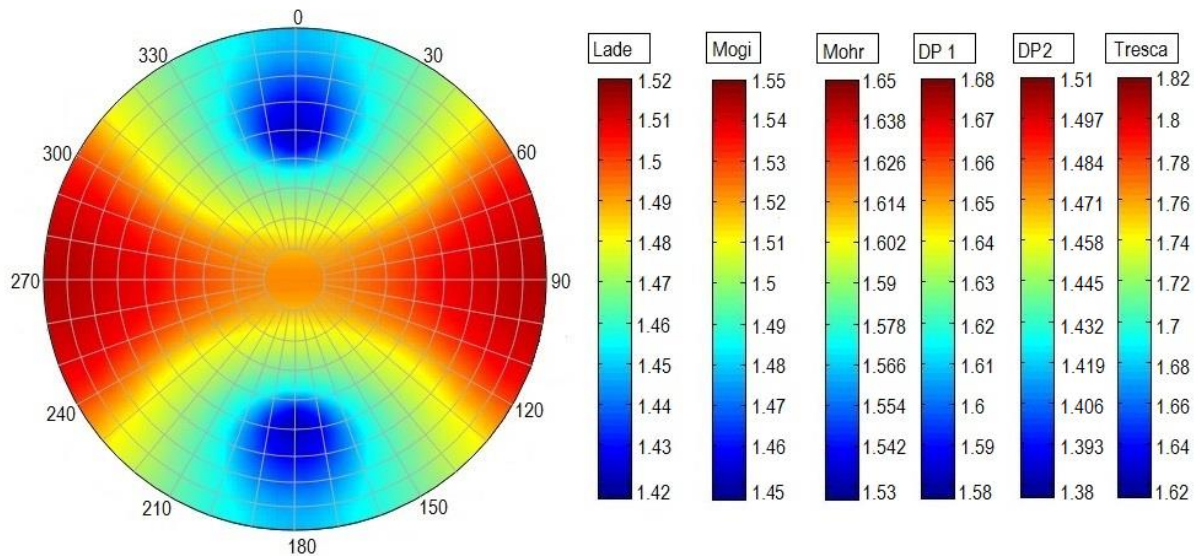


Рисунок 18. Стереодиаграмма плотности бурового раствора для скважины в тектоническом режиме reverse, азимут $S_{HMAX} 0^\circ$.

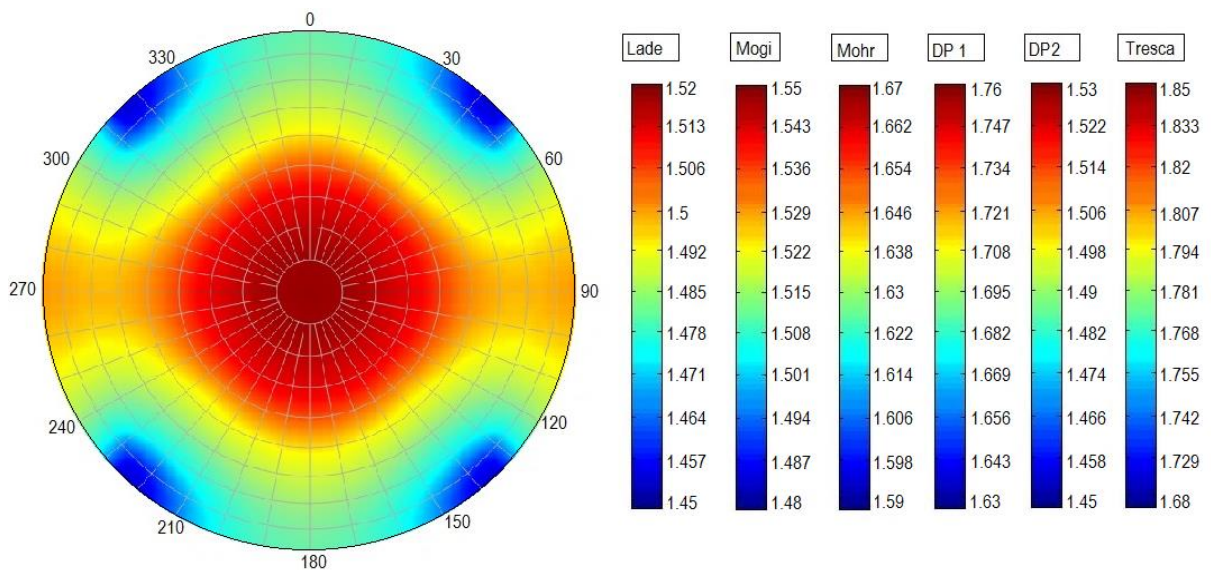


Рисунок 19. Стереодиаграмма плотности бурового раствора для скважины в тектоническом режиме strike-slip, азимут $S_{HMAX} 0^\circ$.

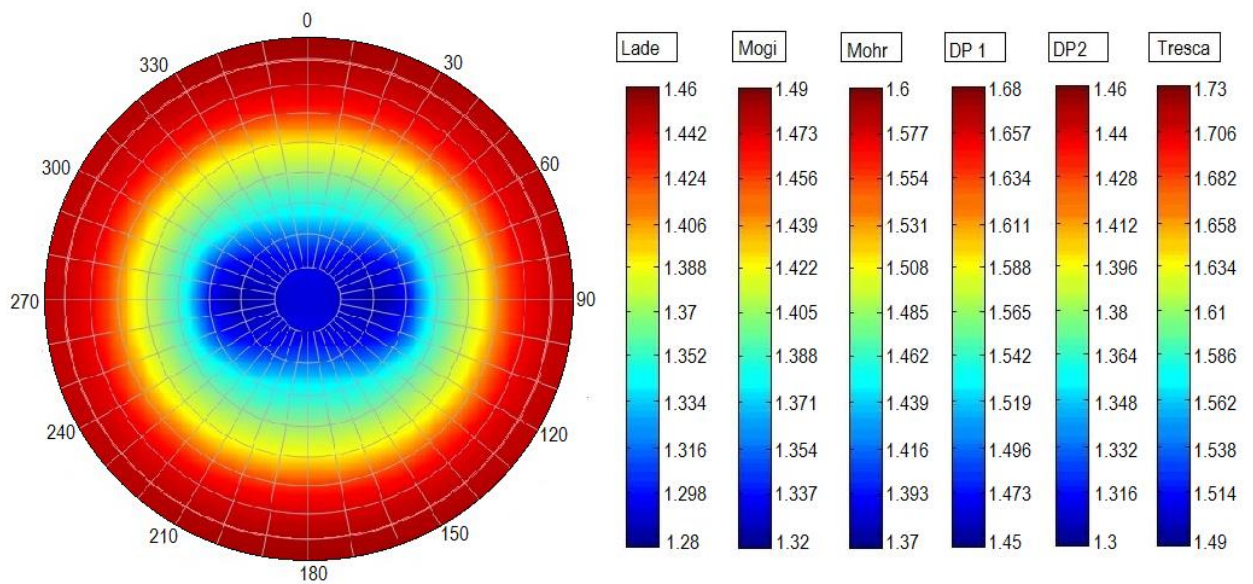


Рисунок 20. Стереограмма плотности бурового раствора для скважины в тектоническом режиме normal , азимут $S_{\text{HMAX}} 0^\circ$.

Результаты расчета проверены на вертикальной скважине для нормального режима напряжений. При бурении скважины в интервале 850м статическая плотность бурового раствора составила 1,31 г/см³. По показаниям каверномера, при бурении с данной плотностью на стенках скважины не наблюдалось разрушений. Исходя из расчетов по критериям прочность, наилучшее описание геомеханических условий для рассматриваемого случая показывает критерий Ладе и Друкера-Прагера (для вписанной окружности). По критерию Ладе значение требуемой плотности ниже реальной на 0,9% или 0,012г/см³, по критерию Друкера-Прагера получаем значение плотности выше на 0,006г/см³ или на 0,5%. По критерию Мора-Кулона, требуемая плотность бурового раствора составляет 1,39 г/см³, что расходится с реальной плотностью на 6%. Для рассматриваемого объекта, разрушение пород наилучшим образом описывает критерий Друкера-Прагера для вписанной окружности.

Решение методом конечных элементов

Для оценки стабильности ствола скважины на практике, мы имеем дело с неоднородной средой. Информация об упруго-прочностных свойствах породы является результатом обработки геофизических исследований скважин, разрешение которых составляет около 20 см по глубине (рис. 21). Для моделирования околоскважинной зоны выбираются участки от 10 до 100 метров. Такие модели включают массивы свойств размером от 50 до 500 значений. В частных случаях, когда рассматривается задача с наличием ориентированных плоскостей ослабления, при исследовании интервалов потенциальных обвалообразований, может рассматриваться более локальная модель.

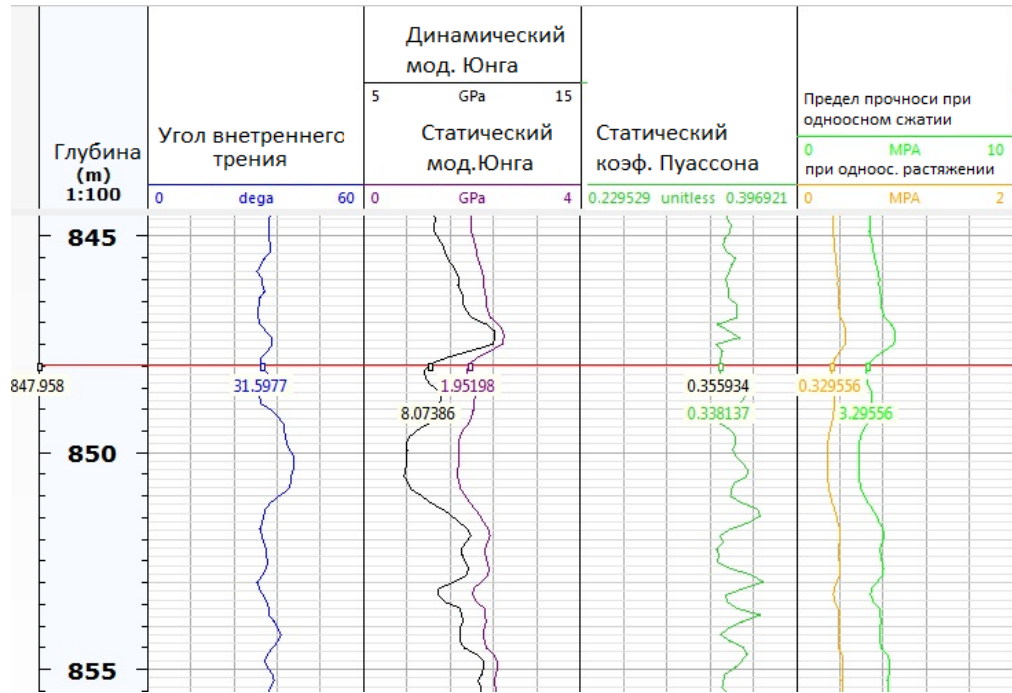


Рисунок 21. Распределение свойств по глубине по данным геофизических исследований скважин.

Уравнения Кирша позволяют получить решение в плоскости, перпендикулярной к оси скважины. Такой подход наилучшим образом применим для вертикальных или почти вертикальных скважин, угол наклона которых не превышает 10 градусов, а также горизонтальных стволов. Существует подход, описанный в работе Мухелишвили, на основе которого можно получить решение в виде распределения напряжений по контуру отверстия в виде эллипса, что значительно расширяет класс рассматриваемых типов скважин.

Если порода находится в под действием нагрузок, превышающих предел упругости материала, деформирование горной породы происходит по нелинейному закону. В зоне пластических деформаций происходит диссипация энергии. В случае пористой среды, этот эффект влияет на фильтрационно-емкостные свойства и приводит к изменению проницаемости призабойной зоны. Для описания таких процессов используется не линеаризованный критерий прочности, а неассоциированный закон течения. В случае пластических деформаций, напряжения на контуре скважины существенно ниже, чем при решении задачи в упругой постановке. Критическое значение напряжений достигается около границы зоны пластических деформаций.

В данной работе рассматривалась только упругая постановка задачи.

Постановка задачи для конечно-элементного моделирования.

В качестве среды для проведения численного расчета в работе использовался пакет SIMULIA ABAQUS. Околоскважинная область моделируется параллелепипедом, стороны которого располагаются по нормали к осям в глобальной системе координат. В таком объеме выделяется цилиндрическое отверстие, поверхность которого соответствует поверхности не обсаженного ствола скважины. Расстояние от цилиндра до внешних границ объема выбирается по принципу Сен-Венана, таким образом, чтобы на внешней границе можно было считать затухшим геомеханическое возмущение от вынутой из ствола породы и приложенного на внутреннюю стенку давления. На внешних границах

параллелепипеда задаются главные компоненты тензора напряжений, преобразованного в географическую систему координат так, что S_{HMAX} совпадает с направлением оси X, S_{hmin} – с направлением оси Y, S_v – с направлением оси Z. На нижней границе модели устанавливается условие равенства нулю вектора перемещений. Нагрузка на поверхность скважины задается на основании расчетов по критериям прочности.

Проверка сходимости численного решения

Численное решение является приближенным решением. Возникает вопрос о величине погрешности получаемых результатов. При численном моделировании проводится аппроксимация непрерывной величины кусочными функциями отдельно на каждом элементе. Точность численного расчета зависит от типа разбиения расчетной области и размера элементов. Исследования зависимости решения от дискретизации расчетной области проводилось для задачи в плоской деформации.

На рисунке 22 показаны размеры расчетной области, а также нагрузки и КЭ сетка.

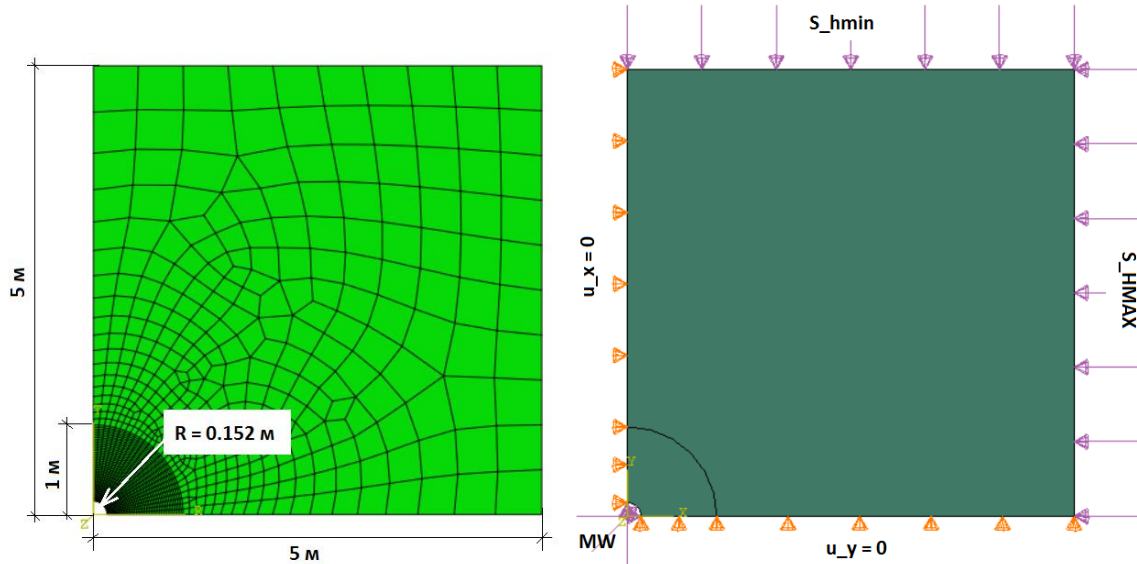


Рисунок 22. Граничные условия и КЭ сетка расчетной области.

Около кругового отверстия выделена концентрическая область радиусом 1 м (рис. 23), для которой исследовалось влияние размера элементов. Для расчета строилась квадратная сетка, для околоскважинной зоны использовался алгоритм построения структурированной сетки.

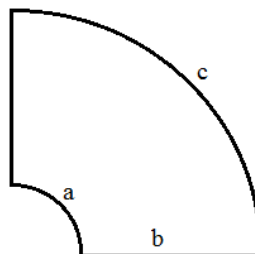


Рисунок 23. Расположение контуров а, b и с в околоскважинной зоне.

В проведенных расчетах изменялся размер элемента по контурам а, b и с. По контуру скважины диапазон изменения размера элемента составляет 5,97 – 0,5 см, по

линии b – от 10,6 до 1,77 см. В таблице 4 приведены используемые разбиения и характерный размер элемента на контуре кругового отверстия.

Таблица 3. Размеры элементов сетки.

ID расчета	a	Размер, см	b	Размер, см	c	Размер, см
1	4	5.97	8	10.60	4	39.27
2	6	3.98	8	10.60	6	26.18
3	8	3.0	8	10.60	8	19.63
4	8	3.0	10	8.48	8	19.63
5	8	3.0	12	7.07	8	19.63
6	18	1.33	16	5.30	18	8.73
7	26	0.92	24	3.53	26	6.04
8	26	0.92	36	2.36	26	6.04
9	48	0.5	36	2.36	48	3.27
10	48	0.5	48	1.77	48	3.27

На рисунке 24 показан график зависимости тангенциальных напряжений от размера элемента на контуре кругового отверстия и сходимости численного решения к аналитическому.

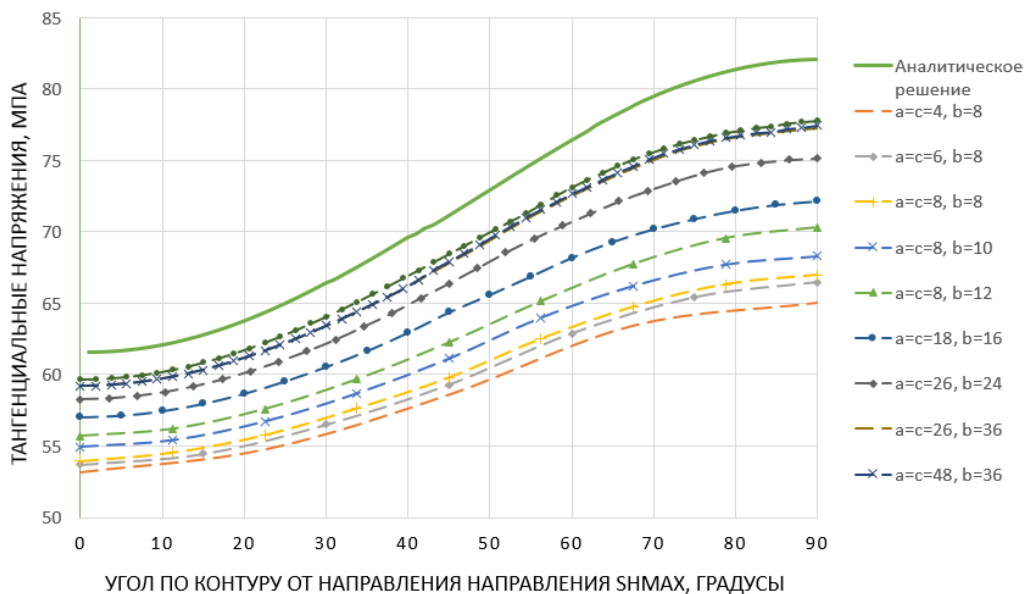


Рисунок 24. Сходимость численного решения к аналитическому в зависимости от размера элемента по контурам a , b и c .

В процессе исследования проводились 3 серии расчетов, целью каждой из которых было – выявить влияния направления уменьшения размера элемента на степень увеличения точности расчета (рис. 25).

В расчете «1» размер элемента по контуру 5,97 см, что составляет 0,065 длины окружности (Cw), точки располагаются через 22.5° , размер элемента по контуру b 10,6 см или $0,7Rw$. При такой дискретизации околоскважинной зоны точность расчета составляет 13,6%, отличие значений полных тангенциальных напряжений от аналитического решения – 8,36 МПа.

В расчетах «1»–«3» изменялся только размер элемента по контуру кругового отверстия. Разница размеров элементов по контуру a в расчетах «1» и «3» составляет 2,97

см, это эквивалентно 49.7%. В расчете «3» размер элемента 3,0 см ($0.0314 R_w$, точки располагаются через $11,25^\circ$). При сравнении с аналитическим решением, точность решения составляет 12,5%. Отличие значений полных тангенциальных напряжений от аналитического решения – 7,6 МПа.

В серии расчетов «3» – «5» размер элемента по контуру a сохранялся со значением 3,0 см, изменение по контуру b составило 3.53см (33.3%). В расчете «3» – 10,6см, в расчете «5» – 7,07см. Такое изменение размера элемента позволило увеличить точность к аналитическому решению до 9,5%. Отличие значений полных тангенциальных напряжений от аналитического решения – 5,8 МПа.

В расчетах «7» и «8» наблюдается зависимость аналогичная расчетам «3» – «5». При размере элемента по контуру кругового отверстия около 1 см ($0.0096 S_w$) численное и аналитическое решения отличаются на 3,8%, что по значениям напряжений составляет 2,3 МПа.

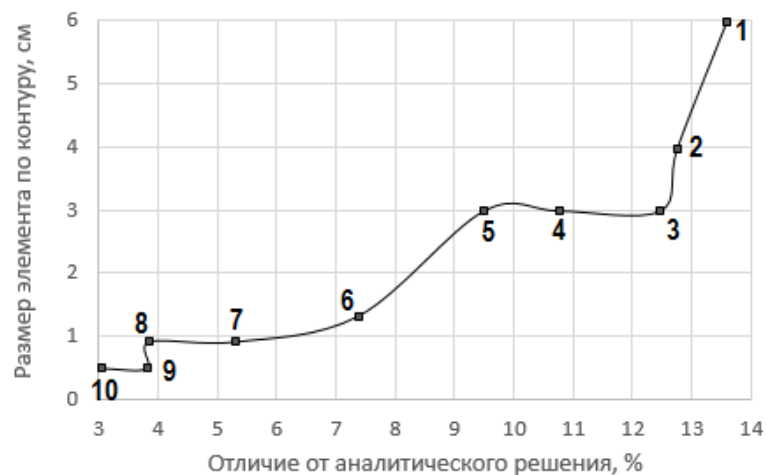


Рисунок 25. Зависимость тангенциальных напряжений на контуре скважины (а) от разбиения области квадратными элементами.

В процессе анализа зависимости численного решения от степени дискретизации расчетной области, было проведено изменение размера элемента по контуру a на 5см и на 8.83см по контуру b . Такое преобразование расчетной сетки позволило получить численное решение с погрешностью 3,8% от аналитического решения. Уменьшение размера элемента по контуру b способствует более значительному увеличению точности расчета. Можно сделать вывод, что для исследования околоскважинной области, при расчете на квадратной сетке, необходимо создавать сетку размером 1 см на контуре «а» и 2,4см на контуре «б».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы сделаны следующие выводы:

1. В условиях взбросового и сдвигового тектонических режимов, наиболее устойчивы горизонтальные скважины, пробуренные в направлении максимального горизонтального напряжения

2. В условиях нормального тектонического режима, наибольшей устойчивостью обладают вертикальные скважины. Наклонные скважины в таком режиме напряжений нужно прокладывать в направлении минимального горизонтального напряжения.

3. По анализу рассмотренных критериев прочности, критерии Треска и критерий Друкера-Прагера (для описанной окружности) дают значительно завышенные значения плотности бурового раствора. Широко применяемый критерий Мора-Кулона показал погрешность 6% от требуемой плотности, тогда как критерии Ладе и Друкера-Прагера (для вписанной окружности) 0,9% и 0,05% соответственно.

4. Анализ напряженного состояния на контуре скважины для трех тектонических режимов показывает, что для реверсивного режима напряжений наиболее устойчивы скважины с углом наклона более 45° проходящие с азимутом относительно направления максимального горизонтального напряжения до 30° .

5. Для сдвигового режима напряжений бурение с малым наклоном также приведет к высоким значениям тангенциальных напряжений на контуре скважины и развитию зон вывалов, а также рискам автоГРП. Для такого режима лучшей устойчивостью обладают горизонтальные скважины, проходящие в направлении максимального горизонтального напряжения (для отношения горизонтальных напряжений более 1,125) и горизонтальные скважины с азимутом 45° (для отношения горизонтальных напряжений более 1,04). При отношении главных горизонтальных напряжений 1,125 допустимо отклонение по азимуту 30° .

6. В нормальном режиме напряжений минимальные значения тангенциальных напряжений характерны для вертикальной скважины. Для скважин с углом наклона 30° напряжения на контуре практически равномерны. Горизонтальные скважины в таком режиме мало устойчивы. Бурение наклонных скважин следует проводить в направлении минимального горизонтального напряжения.

7. При решении задачи методом конечных элементов рекомендуется использовать квадратную структурированную сетку для дискретизации околоскважинной области. В таком случае достигается минимизация погрешности численного решения.

ОХРАНА ТРУДА

Вопросы охраны труда и эргономики при проведении научно-исследовательских работ

Дипломная работа носит научно-исследовательский характер, которая требует большую часть рабочего времени проводить за компьютером. Сложность работы за компьютером подтверждается как субъективными ощущениями пользователей, так и объективными исследованиями различных реакций на воздействие тех или иных производственных факторов. Работа за компьютером связана с восприятием изображения на экране и с одновременным различением текста рукописных или печатных материалов, с выполнением машинописных графических работ и других операций, что способствует зрительному утомлению, которое усиливается из-за бликов, мерцаний и других отклонений визуальных параметров экрана и световой среды помещения. Основные вредные и опасные факторы при работе с компьютером: нервное напряжение; повышенное зрительное напряжение; электромагнитные поля и последствия их воздействия; костно-мышечные напряжения; Указанные факторы приводят к тому, что постоянная работа за компьютером по степени развития утомления занимает второе место среди всех видов деятельности. Для оптимального варианта организации работы необходимо свести к минимуму его неблагоприятное воздействие на здоровье пользователя, то есть привести рабочее место в соответствие с требованиями эргономики и охраны труда. Зрительное напряжение Повышенная нагрузка на зрение способствует возникновению близорукости, приводит к переутомлению глаз, к мигрени и головной боли, повышает раздражительность, нервное напряжение, может вызвать стресс.

Критериями выбора оптимального варианта организации работы оператора является техническая эффективность и соответствие требованиям эргономики и охраны труда. Эргономикой изучаются возможности и особенности деятельности человека в процессе труда с целью создания таких условий, методов и организаций трудовой деятельности, которые делают трудовой процесс наиболее производительным и вместе с тем обеспечивают безопасность и удобство работающему, сохраняют его здоровье и работоспособность.

Общая характеристика санитарно-гигиенических условий труда

Научная и исследовательская работа преимущественное количество времени проводится на рабочем месте, т.е. в помещении, оснащённом соответствующим для этого оборудованием. Все рабочие места не реже двух раз в пять лет подлежат аттестации. По результатам аттестации рабочие места подразделяются на три группы:

– аттестованные – рабочие места, показатели которых полностью соответствуют предъявленным требованиям;

– подлежащие рационализации – рабочие места, несоответствующие показатели которых могут быть доведены до уровня этих требований в процессе рационализации;

– подлежащие ликвидации – рабочие места, показатели которых не соответствуют и не могут быть доведены до уровня установленных требований [24].

В результате проведенной аттестации рабочего места программиста имеем следующие данные по условиям труда. Микроклимат производственного помещения

определяется температурой (°C), относительной влажностью (%), скоростью движения воздуха (м/с). Согласно [24] к категории 1а относятся работы, производимые сидя и не требующие физического напряжения, при которых расход энергии составляет до 120 ккал/ч; к категории 1б относятся работы, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением, при которых расход энергии составляет от 120 до 150 ккал/ч. Проведение научно-исследовательских работ на данном рабочем месте относится по величине энергозатрат к категории 1а.

Эргономические требования к рабочему месту оператора ЭВМ

Работы оператора ЭВМ проводятся сидя и имеют ежедневную продолжительность порядка 8 часов. Такие условия являются причиной пониженной мышечной активности и высоким уровнем статического мышечного напряжения, которое возникает по причине долгого нахождения в положении сидя. Нерациональная высота рабочей поверхности стола и сидения, отсутствие опорной спинки и подлокотников, неудобные углы сгибания в плечевом и локтевом суставах, неудобное размещение документов, видеотерминала и клавиатуры, неправильный угол наклона экрана, отсутствие пространства и подставки для ног способствует увеличению утомления.

В соответствии с требованиями эргономики, рабочее место должно быть приспособлено для конкретного вида труда и для работников определённой квалификации с учётом их физических и психических возможностей и особенностей. Конструкция рабочего места должна обеспечивать быстроту, безопасность, простоту и экономичность технического обслуживания в нормальных и аварийных условиях; полностью отвечать функциональным требованиям и предполагаемым условиям эксплуатации. При размещении ВТ на рабочем месте учитываются границы полей зрения оператора, которые определяются положением глаз и головы. Различают зоны зрительного наблюдения в вертикальной плоскости, ограниченные определёнными углами, в которых располагают экран ВТ (45°–60°), пюпитр (35°–45°) и клавиатура. При периодическом наблюдении за экраном рекомендуется располагать элементы оборудования так, чтобы экран находился справа, клавиатура — напротив правого плеча, а документы — в центре угла обзора. При постоянной работе экран должен быть расположен в центре поля обзора, документы — слева на столе или специальной подставке (ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ»).

Общие эргономические требования:

– рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600мм, шириной – не менее 500мм, глубиной на уровне колен – не менее 450мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650мм.

– рабочий стул (кресло) должен быть подъёмно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона и по расстоянию спинки от переднего края сиденья, его конструкция должна обеспечивать ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400мм; регулировку высоты поверхности сиденья в пределах 400 – 450мм; углы наклона вперёд 15° и назад 5°; высоту опорной поверхности спинки 30 ± 20 мм; ширину опорной поверхности спинки не менее 380мм; 28 радиус кривизны горизонтальной плоскости – 400мм; пределы угла наклона спинки в вертикальной плоскости $0 \pm 30^\circ$. Высота сидения от пола должна регулироваться в пределах 42–55 см. По желанию программиста может быть установлена подставка для ног размером 40х30х15 см и углом наклона 0–20° с не скользящим покрытием и не перемещаемая по полу (Таблица 4).

Таблица 4. Оптимальная высота сидения и подставки для ног

	Рост (см.)						
	150	155	160	165	170	175	180
Высота сидения и подставки (см)	59/22	57/18	55/14	53/10	51/6	49/2	47/0
	58/21	56/17	54/13	52/9	50/5	48/1	46/0
	57/20	55/16	53/12	51/8	49/4	47/0	45/0
	56/19	54/15	52/11	50/7	48/3	46/0	44/0
	55/18	53/14	51/10	49/6	47/2	45/0	43/0
	54/17	52/13	50/9	48/5	46/1	44/0	42/0
	53/16	51/12	49/8	47/4	45/0	43/0	41/0
	52/15	50/11	48/7	46/3	44/0	42/0	40/0
	51/14	49/10	47/6	45/2	43/0	41/0	39/0
	50/13	48/9	46/5	44/1	42/0	40/0	38/0
	49/12	47/8	45/4	43/0	41/0	39/0	37/0
	48/11	46/7	44/3	42/0	40/0	38/0	36/0
	47/10	45/6	43/2	41/0	39/0	37/0	35/0
	46/9	44/5	42/1	40/0	38/0	36/0	34/0
	45/8	43/4	41/0	39/0	37/0	35/0	33/0

Покрывало стола должно быть матовым (с коэффициентом отражения 20–50%) и легко чиститься; углы и передняя грань доски должны быть закругленными. Высота пространства под столом для ног рекомендуется порядка 60 см на уровне колен и не менее 80 см на уровне ступней. Тип рабочего кресла выбирается в зависимости от продолжительности работы. При длительной работе кресло должно быть массивным, при кратковременной — легкой конструкции, свободно отодвигающееся.

Микроклиматические условия

Устанавливаемые СанПиН 2.2.4.548-96 оптимальные нормы температуры (23–25°C) и относительной влажности (60–40%) для теплого периода года, а также (22–24 °C) и (60–40 %) соответственно для холодного и переходного, скорости движения воздуха соблюдаются благодаря наличию системы кондиционирования, работающей в режиме автоматического регулирования. Скорость движения воздуха не превышает допустимого значения (<0.1 м/с, как для холодного, так и для теплого периода). Оптимальные и допустимые параметры микроклимата согласно приведены соответственно в таблицах (Таблица 3, Таблица 4).

Таблица 5. Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Категория работ	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	Легкая 1а	22-24	40-60	0.1
	Легкая 1б	21-23	40-60	0.1
Теплый	Легкая 1а	23-25	40-60	0.1
	Легкая 1б	22-24	40-60	0.2

Таблица 6. Допустимые параметры микроклимата

Период года	Категория работ	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	Легкая	19-25	не более 75	<0.2
Теплый	Легкая	не более чем на 3°С выше средн. Температуры наружного воздуха в 13 ч. самого жаркого месяца, но не более 28°С	24°С: <75 25°С: <70 26°С: <65 27°С: <60 28°С: <55	<0.2-0.5

В помещении отсутствуют выделения вредных веществ, поэтому вентиляция служит для удаления, насыщенного углекислым газом и пылью, воздуха и подачи свежего. Концентрация пыли должна быть не более 0.3 мг/м³ при размере частиц не более 5 микрон [25]. В таблице (Таблица 5) приведены нормы подачи свежего воздуха в помещение в зависимости от объема на одного работающего, в соответствии с [24].

Таблица 7. Нормы подачи воздуха

Объем помещения на одного работающего, м ³	Норма подачи воздуха, м ³ /ч
До 20 20 – 40 от 40	не менее 30 не менее 20 естественная вентиляция

Уровень шума

На рабочем месте оператора источником шума является вычислительная машина, производящая постоянный небольшой шум. Шум представляет собой сочетание звуков, различных по интенсивности и частоте в частотном диапазоне 16–20 кГц, не несущих полезной информации. Шум вредно воздействует не только на органы слуха, но и на весь организм человека в целом через центральную нервную систему. Шум – причина преждевременного утомления, ослабления внимания, памяти. Характеристикой постоянного шума на рабочих местах является уровень звукового давления в децибелах в установленных октавных полосах:

$$L = 20 * 1g \left(\frac{P}{P_0} \right),$$

где P – среднеквадратическое значение звукового давления (Па), $P_0 = 2 * 10^5$ Па.

Характеристикой непостоянного шума является интегральный критерий – эквивалентный уровень звукового давления L (дБА), измеряемый по шкале А, имитирующей кривую чувствительности уха человека.

При нормировании по предельному спектру шума учитываются уровни звукового давления в восьми октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц. Этот метод является основным для постоянных шумов. Постоянным считается шум, уровень звука которого за 8-часовой рабочий день изменяется во времени не более чем на 5дБА. В Таблице 6 приведены предельно допустимые значения уровня шума для данного производственного помещения в отдельных октавных полосах, в соответствии с [24].

Таблица 8. Предельно-допустимые уровни шума

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							
63	125	250	300	1000	2000	4000	8000
Уровни звукового давления, дБА							
79	70	63	58	55	52	50	49

Предельно допустимый эквивалентный уровень звука 60 дБ (для помещения в котором осуществляется эксплуатация ЭВМ, [24]). Для данного помещения уровень звука не превышает допустимого, поэтому применение специальных звукоизоляционных материалов не требуется. Воздействие вибрации, инфра- и ультразвука в помещении отсутствует.

Выбор системы освещения

Освещение рабочих мест и помещений, где расположены компьютеры, является важным фактором, влияющим на степень зрительного утомления. Помещения с персональными электронно-вычислительными машинами (ПЭВМ) и видеодисплейными

терминалами ВДТ) [24], должны иметь естественное и искусственное освещение. Искусственное освещение в помещениях эксплуатации ВДТ и ПЭВМ должно осуществляться системой общего равномерного освещения. В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, допускается применение системы комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов). Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа составляет 300-500 лк [24].

Допускается установка светильников местного освещения для подсветки документов. Местное освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана и увеличивать освещенность экрана более 300 лк. Освещение рабочих поверхностей осуществляется с помощью люминесцентных ламп ЛБ белого света, которые предназначены для помещений с нормальными условиями труда.

При создании расчетных моделей, программировании и работе с текстовыми документами осуществляется ввод данных с клавиатуры, визуальный контроль символьной и графической информации, отображаемой на дисплее, следовательно, для освещения необходимо применение системы комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов). Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 400–500 лк [24], норма освещенности рабочего места в системе общего освещения — 150–200 лк. Местное освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана и увеличивать освещенность экрана более 300 лк.

На рабочем месте обычно применяют совмещенное (естественное и искусственное) освещение, причем естественное — в виде бокового. Наиболее благоприятна северная ориентация светопроемов в помещениях. При выполнении работ указанного характера искусственное освещение осуществляется в виде одного общего освещения. В связи с тем, что при работе с ПЭВМ особую роль играет равномерность распределения световой энергии (для исключения частых переадаптаций глаз), светильники общего освещения следует располагать над рабочими поверхностями в равномерно прямоугольном порядке.

Для искусственного освещения помещений следует использовать главным образом люминесцентные лампы, у которых высокая световая отдача (до 120 лм/Вт и более), продолжительный срок службы (до 10000 ч.), малая яркость светящейся поверхности, близкий к естественному спектральный состав излучаемого света, что обеспечивает хорошую светопередачу. Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения $50 - 90^\circ$ с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200кд/м, защитный угол светильников должен быть не менее 40° . Светильники местного освещения должны иметь не просвечивающий отражатель с защитным углом не менее 40° . Наиболее приемлемыми являются лампы люминесцентные ЛБ (белого света) и ЛТБ (тепло-белого) мощностью 40 или 80 Вт. Т. к. данное помещение является помещением с нормальными условиями среды, то это позволяет использовать в системе освещения светильники ЛСПО 2 (пыле- и водо-незащищенное исполнение) с люминесцентными лампами ЛХБ 40 Вт со световым потоком 2780 лм по ГОСТ 6825-91.

Электромагнитное излучение

Электромагнитные поля и излучения. ПЭВМ генерирует в окружающее пространство широкий спектр ЭМП различной интенсивности, в том числе:

электростатическое поле, переменные низкочастотные ЭМП, электромагнитное излучение радиочастотного диапазона, ультрафиолетовое (УФ) и рентгеновское излучения ЭЛТ. Кроме того, на рабочем месте пользователя всегда присутствует электромагнитный фон промышленной частоты, обусловленный как ПЭВМ, так и сторонними источниками. Уровни данных излучений не превышают допустимые нормы, но работа за компьютером, особенно длительное время, вредит зрению.

Временные допустимые уровни электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых ПК, не должны превышать значений:

- напряженность электрического поля (в диапазоне частот 5Гц–2кГц) — 25Вт/м;
- напряженность электрического поля (в диапазоне частот 5кГц – 400кГц) — 2.5Вт/м;
- плотность магнитного потока (в диапазоне частот 5Гц – 2кГц) — 250нТл;
- плотность магнитного потока (в диапазоне частот 5кГц – 400кГц) — 25нТл;
- поверхностный электростатический потенциал экрана видеомонитора — 500В.

Допустимые уровни излучения регламентированы “Гигиеническими требованиями к видеодисплеям, терминалам, персональным ЭВМ и организации работы” (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03), введенными с 30.06.03

Таблица 9. Допустимые значения неионизирующих электромагнитных излучений

Наименование параметров	Допустимое значение
Напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на расстоянии 50 см от поверхности видеомонитора	10 В/м
Напряженность электромагнитного поля по магнитной составляющей на расстоянии 50 см от поверхности видеомонитора	0,3 А/м
- Напряженность электростатического поля для взрослых пользователей не должна превышать	20 кВ/м
Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг ВДТ по электрической составляющей должна быть не более:	
- в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц;	25 В/м
- в диапазоне частот 2 - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока должна быть не более:	
- в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц;	250 нТл
- в диапазоне частот 2 - 400 кГц	25 нТл
Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать	500 В

Электробезопасность

По степени поражения людей электрическим током помещение относится к категории помещений без повышенной опасности, поскольку является сухим, нежарким,

не пыльным, с нетокопроводящим полом, возможность случайного одновременного прикосновения к токоведущим частям и заземленным конструкциям присутствует лишь в случае грубейшего нарушения ТБ при техническом обслуживании ЭВМ и ПУ. В связи с этим требуется соблюдение необходимых мер предосторожности, в т. ч. использование средств индивидуальной защиты (при техническом обслуживании оборудования), что закреплено в инструкции по ТБ, в соответствии с ГОСТ 12.1.038-82.

Электропитание осуществляется от однофазной сети переменного тока номинальным напряжением 220 В и частотой переменного тока 50 Гц с заземленной нейтралью. Предельные отклонения по напряжению и частоте соответствуют ГОСТ 21552-84. Все оборудование имеет предохранители в цепи питания.

При прикосновении в ВЦ к любому из элементов ПЭВМ могут возникнуть разрядные токи статического электричества. Для снижения возникающих статических зарядов в ВЦ покрытие полов следует выполнять из однослойного поливинилхлоридного линолеума. Не рекомендуется носить одежду из синтетических тканей. К общим мероприятиям защиты от статического электричества в ВЦ можно отнести общее и местное увлажнение воздуха (до 50%), ионизацию воздуха.

Методика и приборы контроля параметров среды

Метрологическое обеспечение в области безопасности труда осуществляется на основе положений ГОСТ 12.0.005-84 «Метрологическое обеспечение в области безопасности труда.» Основные положения», системы стандартов безопасности труда, санитарных норм и правил Минздрава РФ и др. Приборы для контроля микроклимата, шума, освещенности, концентрации пыли, сопротивления изоляции приведены в Таблице 8.

Уровень освещенности следует проверять не реже одного раза в год в контрольных точках производственного помещения после очередной чистки светильников и замены перегоревших ламп.

Таблица 10. Характеристики приборов контроля

Измеряемая величина, единица измерений	Доп. погрешность	Рабочие средства измерений			Погрешность измерений
		Тип	Частотный Диапазон	Динамический диапазон	
Температура, °С и отн. влажность воздуха, %	0,2 °С 5,0 %	Психрометр МВ – 4М		-35...51 °С 10...100 %	0,1 °С 5 %
Скорость движения Воздуха, м/с	0,1 м/с	Кататермометр	-	0,02...1 м/с	-
Уровень звукового давления, дБ		Шумомер типа	2 – 20000 Гц	25 - 140 дБ	1 дБ
Освещенность, Лк	5 %	Люксметр Ю – 116	0,38 - 0,7 мкМ	50 – 100000 лк	20 %
Сопротивление изоляции, МОм	1 %	Мегаом-метр М 110211	-	0 – 200 МОм	1 %

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев А.Ю. ТПУ «основы технологии бурения скважин», учебное пособие, изд. томского политехнического университета 2008
2. Kirsch, G., 1898. Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre. Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 42 (28): 797–807
3. Hubbert, M. K. and Willis, D. G., 1957. Mechanics of hydraulic fracturing, J. of Petroleum Technology, Trans. AIME 210: 153-166
4. Westergaard, H.M. (1940). Plastic state of stress around a deep well. J. Boston Soc. of Civ. Engrs., Vol.27, No.1, Jan., pp.1-5.
5. Muskhelishvili, N.I., 1954. Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity, Noordhof Ltd., Groningen, The Netherlands
6. Timoshenko, S.P., and Goodier, J.N., 1970. Theory of Elasticity (3rd ed.).
7. Bradley WB (1979) Failure of inclined boreholes. J Energy Res Technol 101:232–239
8. Ewy RT (1999) Wellbore stability predictions by use of a modified lade criterion. SPE Drilling & Completion, pp 85–91
9. Zoback, Reservoir geomechanics.
10. ARMA 10-432
11. Al-Ajmi AM, Zimmerman RW (2004) Relation between the Mogi and the Coulomb failure criteria. Int J Rock Mech Min Sci 42:431–439
12. Al-Ajmi AM, Zimmerman RW (2006) Wellbore stability analysis based on a new true-triaxial failure criterion. Dissertation, University of KTH, Oklahoma
13. Zhang L, Cao P, Radha KC (2010) Evaluation of rock strength criteria for wellbore stability analysis. Int J Rock Mech Min Sci 47:1304–1316
14. Wang, X. and Sterling R.L., 2007. Stability analysis of a borehole wall during horizontal directional drilling. Tunnelling and Underground Space Technology, 22, 620-63
15. Erling Fjar R.M. Holt A.M. Raaen R. Risnes P. Horsrud. Petroleum Related Rock Mechanics, 2nd Edition, Elsevier 2008
16. Lade PV (1977) Elasto-plastic stress–strain theory for cohesionless soils with curved yield surfaces. Int J Solids Struct 13:1019– 1035
17. Kim MK, Lade PV (1984) Modeling rock strength in three dimensions. Int J Rock Mech Min Sci Geom Abstr 21:21–33
18. Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория пластичности. — М.: Физматлит, 2001. — 704 с. Обэн Ж.П. приближенное решение эллиптических краевых задач. — М. Мир, 1977
19. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. — М.: Мир, 1979. — 392с.
20. Берон А.И., Чирков С.Е. Исследование прочности горных пород в условиях трехосного неравномерного сжатия // Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского, 1969.— С. 33-38.
21. Чирков С.Е. Прочность горных пород при трехосном неравнокомпонентном сжатии // ФТПРПИ.— 1976.— №1.— С. 11-17.
22. Кузнецов Г.Н., Будько И.Н. Исследование предельных состояний хрупкого материала в различных условиях трехосного сжатия // В кн. Проблемы механики горных пород.— Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР.— 1971.— С. 266-217.
23. Батугин С.А., Похилько В.А. Области существования и устойчивости решений упругопластических задач для выработок круглой формы // ФТПРПИ.— 1972.— №3.— С. 10-16.

24. «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» (СанПиН 2.2.2.1340-03)
25. Охрана труда и окружающей среды, Учебное пособие. [Текст] / Л.А. Нейман, В.В. Румянцев, В.И. Евдокимов, В.И. Козаченко // СПГААП СПб. — 1993.