Министерство образования и науки Российской Федерации
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

«____» _____ 2018 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

«ОЦЕНКА ПОВЕДЕНИЯ ОКОЛОСКВАЖИННОГО ПРОСТРАНСТВА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПЛАСТОВЫХ УСЛОВИЯХ ДЛЯ ХАРАКТЕРНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛАБОКОНСОЛИДИРОВАННОГО КОЛЛЕКТОРА»

по направлению 01.04.03 «Механика и математическое моделирование»
по образовательной программе
01.04.03_01«Механика деформируемого твердого тела»

Выполнила
студентка гр.23642/1 _____А.А. Шаповалова

Руководитель,
доцент кафедры
«Теоретическая механика» СПбПУ, к. ф.–м.н. _____Е.А. Подольская

Консультант,
руководитель направления
Управления геомеханического моделирования
ООО «Газпромнефть НТЦ» _____ О.Ю. Калинин

Санкт–Петербург

2018

Министерство образования и науки Российской Федерации
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

«____» _____ 2018 г.

ЗАДАНИЕ
по выполнению выпускной квалификационной работы

студенту
Шаповаловой Алине Александровне, группы 23642/1
фамилия, имя, отчество (при наличии), номер группы

1. Тема работы: оценка поведения околоскважинного пространства при различных пластовых условиях для характерных механических свойств слабоконсолидированного коллектора.

2. Срок сдачи студентом законченной работы: 08.06.2018

3. Исходные данные по работе: исследования керна, траектория скважины, кавернометр, имиджер.

4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): определение механических свойств пласта и напряжений вдоль ствола скважины. Разработка расчетной модели и методики оценки и прогноза выноса твердой фазы. Сравнение результатов численного моделирования и фактических данных. Изучение влияния пластового давления на околоскважинное пространство.

5. Консультанты по работе: О.Ю. Калинин

6. Дата выдачи задания: 01.02.2018

Руководитель ВКР _____ Е.А. Подольская
(подпись)

Задание принял к исполнению _____
(дата)

Студент _____ А.А. Шаповалова
(подпись)

РЕФЕРАТ

На 46 с., 17 рисунков, 5 таблицы

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОЧНОСТЬ СТЕНОК СКВАЖИНЫ, СЛАБОСЦЕМЕНТИРОВАННЫЕ ПОРОДЫ, КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ СЕТКА, РАЗРУШЕНИЕ КОЛЛЕКТОРА

Настоящая работа посвящена созданию геомеханической модели как инструмента анализа и оптимизации разработки месторождений. В работе выполнено численное моделирование процесса вывода скважины на режим, построена расчетная модель в конечно-элементном пакете, проведено сравнение с фактическими данными. Изучено влияние забойного давления с целью прогноза пескопроявления в слабоконсолидированном коллекторе

THE ABSTRACT

46 pages, 17 pictures, 5 tables

GEOMECHANICAL SIMULATION, WELLBORE STABILITY, UNCONSOLIDATED FORMATIONS, FINITE ELEMENT MESH, RESERVOIR DESTRUCTION

This work is devoted to the creation of a coupled geomechanical model as a tool for analysis and optimization of field development. In this paper, a numerical modeling of the bringing the well on to stable production, a computational model was constructed using the finite-element package, a comparison was made with the real-data. The effect of buttonhole pressure sand prediction in the weakly consolidated reservoir.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5
Глава 1. Математическое описание поведения ствола скважины 8
1.1. Аналитические модели горной породы 8
1.2. Гипотезы о поведении материала 11
Глава 2. Оценка поведения околоскважинного пространства 15
2.1. Анализ методов прогноза выноса твердой фазы 15
2.2. Геомеханический метод 17
2.3. Разработка скрипта для реализации модели скважины 27
Глава 3. Результаты 28
3.1. Оценка напряженно-деформированного состояния 29
3.2. Сравнение с фактическими данными 33
3.3. Определение наиболее безопасных депрессий 34
Заключение 40
Охрана труда 41
Список использованных источников 45

ВВЕДЕНИЕ

Геомеханическое моделирование в нефтегазовой отрасли воссоздает физические процессы при бурении, разработке и эксплуатации месторождений. Процесс моделирования природных резервуаров является комплексным подходом, который позволяет решить ряд важных задач: безаварийное бурение многоствольных скважин в сложных геологических условиях, сопряженных с рисками поглощения бурового раствора, кавернообразования, обрушения стенок скважины в неустойчивых интервалах (Рис.1.1), формирование рекомендаций по депрессиям, по параметрам гидроразрыва пласта, выводу на режим и заканчиванию скважин.

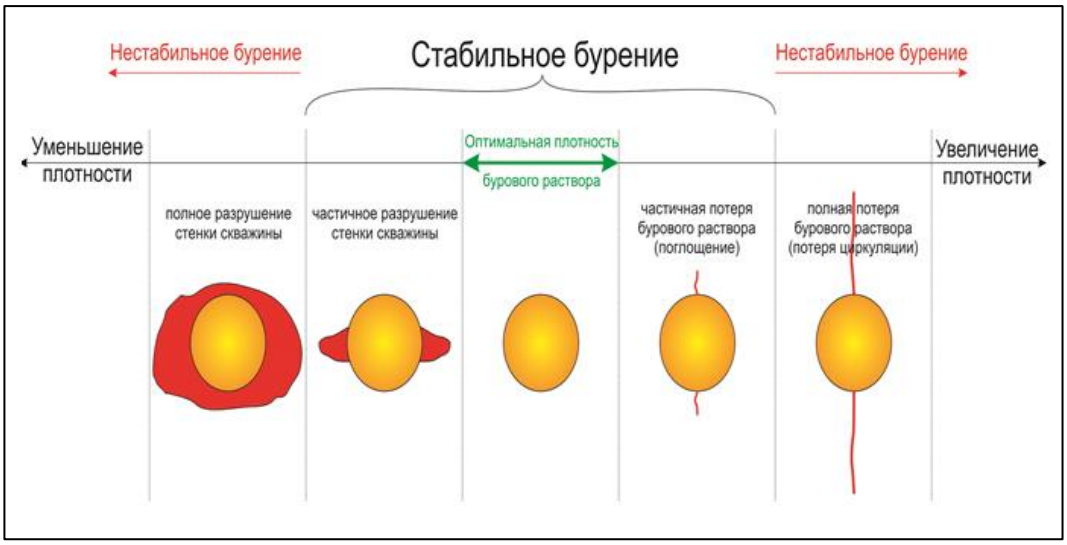

Рис.1.2 Параметры безаварийного бурения

На одном из месторождений Западной Сибири на сегодняшний момент, реализуется проект по строительству многоствольных горизонтальных скважин, представленных на (Рис.1.3) с помощью технологии “fishbone”, целью которого является приобщение к разработке максимального количества пропластков вертикально расчлененного разреза. Технология предполагает эксплуатацию боковых ответвлений открытым забоем, что существенно упрощает процесс строительства, снимает ограничения по сложности траектории в контексте дальнейшего спуска хвостовиков, однако несет вместе с

этим ряд ограничений и рисков, связанных с необходимостью адресно подбирать параметры вывода скважин на режим и определять депрессии, позволяющие оптимально эксплуатировать скважину в течении всего ее жизненного цикла.

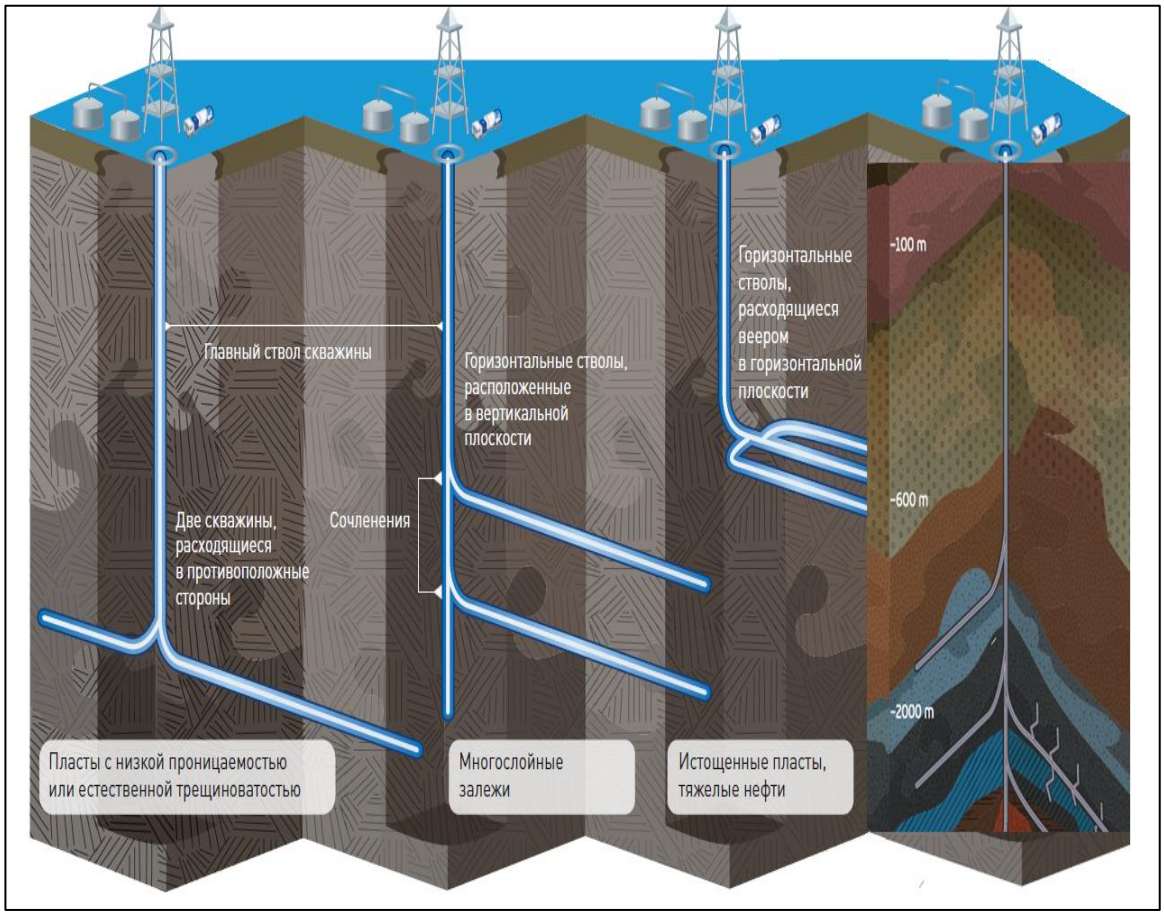

Рис.1.3 Многоствольные горизонтальные скважины

Одной из весьма острых проблем при разработке и эксплуатации многоствольных горизонтальных скважин, пласты которых образованы песками и слабоконсолидированными породами, является потеря прочности околоскважинного пространства и поступление в скважину твёрдой фракции, что ведёт к образованию глинисто–песчаных пробок на забое и в насосно–компрессорных трубах. Это приводит к снижению дебита, разрушению обсадных колонн и фильтров, износу внутрискважинного и наземного оборудования, влечет значительные экономические потери вследствие снижения производительности, увеличения затрат на текущий и капитальный ремонт скважины, очистку нефти от механических примесей.

Решение данной проблемы является актуальной задачей и требует разработки комплексной методики оценки и прогноза количества выносимых частиц для оптимизации параметров продуктивности скважин.

Основные цели исследования: определение наиболее безопасных депрессий для максимального сохранения прочности скважины в процессе эксплуатации, разработка метода прогноза выноса твердой фазы. Для реализации поставленной цели решён ряд задач: рассчитана трёхмерная конечно–элементная модель участка ствола многоствольной горизонтальной скважины типа “ fishbone ”, разработан скрипт для реализации данной модели скважины на языке программирования CUBIT и python, проведен анализ количества выносимых твёрдых частиц с сопоставлением с фактическими данными.

Апробация результатов исследования.

• Выступление на VII научно–технической конференции молодых ученых Научно–технического центра «Газпром нефти»

Глава 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СТВОЛА СКВАЖИНЫ

Развитие математических моделей горных пород повлияло на построение и анализ геомеханических расчетов. В научной литературе выделяют простые модели горной породы [1], требующие минимального количества входных данных. Анализ таких моделей относительно прост, однако плохо согласован с фактическими наборами данных. Модифицированные модели корректнее описывают поведение горной породы и предоставляют возможность варьировать большим набором входных параметров – прочность породы, когезия, угол внутреннего трения и другими параметрами.

1.1. Аналитические модели горной породы

Поле напряжений, создаваемое круговым отверстием в упругой пластине, впервые было получено в работе [2]. Отталкиваясь от общего решения задачи теории упругости [2] первым приближением для решения задачи устойчивости ствола скважины является аналитическое решение, предложенное в работе [3].

На ранних стадиях исследования напряженное состояние породы, которое определяется компонентами тензора напряжений в каждой ее точке, рассматривали только в упругой постановке. В монографии [4–5] впервые исследуется устойчивость околоскважинного пространства в пороупругой изотропной среде. В случае плоско–деформированного состояния изменение тензора напряжений в зависимости от радиуса скважины в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{2}\left(s_{\mathrm{H}max} + s_{h_{min}} - 2P_0\right)\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}\left(s_{\mathrm{H}max} - s_{h_{min}}\right)\left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right) cos\, 2\theta + 4 + \frac{P_0 R^2}{r^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2}\left(s_{\mathrm{H}max} + s_{h_{min}} - 2P_0\right)\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}\left(s_{\mathrm{H}max} - s_{h_{min}}\right)\left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) cos\, 2\theta + 4 + \frac{P_0 R^2}{r^2} \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2}\left(s_{\mathrm{H}max} + s_{h_{min}}\right)\left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right) sin\, 2\theta, \quad (3)$$

где $\sigma_{\theta\theta}$ – тангенциальное напряжение, σ_{rr} – радиальное напряжение, $\tau_{r\theta}$ – касательное напряжение, θ – угол между ориентацией ствола скважины и азимутом $s_{\mathrm{H}max}$, P_0 – поровое давление.

Распределение напряжений в скважине в упругой постановке с учетом давления бурового раствора, действующего на стенки горизонтальной скважины, представляют в работе [6-8]:

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_x^0 + \sigma_y^0}{2}\left(1 - \frac{R_w^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x^0 - \sigma_y^0}{2}\left(1 + 3\frac{R_w^4}{r^4} - 4\frac{R_w^2}{r^2}\right) cos2\theta + P_{mud}\frac{R_w^2}{r^2} + \tau_{xy}^0\left(1 + 3\frac{R_w^4}{r^4} - 4\frac{R_w^2}{r^2}\right) sin\, 2\theta \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_x^0 + \sigma_y^0}{2}\left(1 + \frac{R_w^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x^0 - \sigma_y^0}{2}\left(1 + 3\frac{R_w^4}{r^4}\right) cos2\theta - \tau_{xy}^0\left(1 + 3\frac{R_w^4}{r^4}\right) sin\, 2\theta - P_{mud}\frac{R_w^2}{r^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_z^0 - \nu_{fr}\left[2\left(\sigma_x^0 - \sigma_y^0\right)\frac{R_w^2}{r^2} cos2\theta + 4\tau_{xy}^0\frac{R_w^2}{r^2} sin2\theta\right] \quad (6)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_y^0 - \sigma_x^0}{2}\left(1 - 3\frac{R_w^4}{r^4} + 2\frac{R_w^2}{r^2}\right) sin2\theta + \tau_{xy}^0\left(1 - 3\frac{R_w^4}{r^4} + 2\frac{R_w^2}{r^2}\right) cos\, 2\theta \quad (7)$$

$$\tau_{\theta z} = \left(-\tau_{xz}^{0} sin2\theta + \tau_{yz}^{0} cos2\theta\right)\left(1 + \frac{R_w^2}{r^2}\right) \quad (8)$$

$$\tau_{rz} = \left(\tau_{xz}^{0} cos2\theta + \tau_{yz}^{0} sin2\theta\right)\left(1 - \frac{R_w^2}{r^2}\right), \quad (9)$$

где P_{mud} – давление бурового раствора, $\nu -$ коэффициент Пуассона.

Влияние скважины на напряженное состояние определяется слагаемыми r^2 и r^4, быстро обращающимися в нуль при увеличении r. Таким образом, влияние ствола скважины на напряженное состояние почти исчезает на расстояние трех диаметров от скважины. У стенки ствола скважины, уравнения упрощаются до вида:

$$\sigma_r = P_{mud} \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_x^0 + \sigma_y^0 - 2\left(\sigma_x^0 - \sigma_y^0\right) cos2\theta - 4\tau_{xy}^0 \, sin\, 2\theta - P_{mud} \quad (11)$$

$$\sigma_z = \sigma_z^0 - \nu_{fr}\left[2\left(\sigma_x^0 - \sigma_y^0\right) cos2\theta + 4\tau_{xy}^0 sin2\theta\right] \quad (12)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0 \quad (13)$$

$$\tau_{\theta z} = 2\left(-\tau_{xz}^0 \sin 2\theta + \tau_{yz}^0 \cos 2\theta\right) \quad (14)$$

В работах [9 – 12] проведен анализ напряженного состояния. Вводится соотношение, связывающее между собой эффективный тензор напряжений и полный тензор напряжений. Основным механизмом при действии давления, описанным в работах является перестраивание частиц горной породы, называемое уплотнением. Деформации на этом этапе являются необратимыми и возникают вследствие пластической осадки горной породы.

1.2. Гипотезы о поведении материала

Разнообразие критериев для анализа предельного состояния модифицированных моделей горных пород позволяет точнее определить начала разрушения околоскважинного пространства. Рассмотрим математическое описание основных критериев запаса прочности более подробно.

В работе [13] описана модель Мора–Кулона, состоящая из системы линейных уравнений в главных напряжениях, описывающих условия, при которых изотропный материал разрушится, пренебрегая влиянием промежуточного главного напряжения.

Критерий Кулона–Мора применяется для описания сдвиговых разрушений. Гипотеза Мора предполагает, что критическое сдвиговое напряжение τ_{max} зависит от нормального напряжения σ_n на плоскости сдвига. Условие разрушения выражается следующим образом:

$$\tau_{max} = c + B\sigma_n \tag{15}$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}\,(\sigma_1 - \sigma_3)\cos\phi, \tag{16}$$

где τ_{max} – максимально выдерживаемое касательное напряжение на плоскости сдвига,

$$\sigma_n = \frac{1}{2}\,(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}\,(\sigma_1 - \sigma_3)\sin\phi, \tag{17}$$

где σ_n – нормальное сжимающее напряжение на плоскости сдвига, ϕ – угол внутреннего трения материала, σ_1, σ_3 – главные компоненты тензора напряжений, c – когезия материала или удельное сцепление, $B = -\tan\phi$.

Если заданы пределы прочности, то когезия и угол внутреннего трения вычисляются по формулам:

$$\phi = arcsin\frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_t + \sigma_c} \tag{18}$$

$$c = \frac{\sqrt{\sigma_c \sigma_t}}{2}, \tag{19}$$

где σ_c – предел прочности на сжатие, а σ_t – предел прочности на растяжение.

Коэффициент запаса прочности, показывающий, во сколько раз нужно увеличить нагрузку, чтобы произошло разрушение согласно критерию, вычисляется по формуле:

$$n = \frac{A}{\tau_{max} - B\,\sigma_n} \tag{20}$$

Преимущество критерия Кулона–Мора заключается в том, что он имеет большую степень совпадения с данными экспериментальных исследований прочности в широком спектре действующих напряжений. Недостаток данного критерия заключается в том, что для проведения анализа необходимо знать заранее максимальную и минимальную величину среди трех главных напряжений.

В работе [14] описан критерий Моги–Кулона применяемый для описания сдвиговых разрушений в породах. Он предполагает, что критическое напряжение τ_{oct}, при котором происходит разрушение, зависит от полсуммы $\sigma_{m,2}$ первой и третьей главных компонент тензора напряжений на плоскости сдвига. Критерий выражается следующим образом:

$$\tau_{oct} = A + B\sigma_{m,2} \tag{21}$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \tag{22}$$

$$\sigma_{m,2} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \tag{23}$$

$$A = \frac{2\sqrt{2}}{3}c \tag{24}$$

$$B = -\frac{2\sqrt{2}}{3}\tan\phi \tag{25}$$

где c – когезия материала, ϕ – угол внутреннего трения материала, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные компоненты тензора напряжений. Если заданы пределы

прочности на растяжение и сжатие, то коэффициенты A и B вычисляются через них:

$$A = \frac{2\sqrt{2}}{3}\,\frac{\sigma_c\,\sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \tag{26}$$

$$B = \frac{2\sqrt{2}}{3}\,\frac{\sigma_{t-}\sigma_c}{\sigma_c + \sigma_t} \tag{27}$$

Коэффициент запаса прочности, показывающий, во сколько раз нужно увеличить нагрузку, чтобы произошло разрушение согласно критерию, вычисляется по формуле:

$$n = \frac{A}{\tau_{max} - B\,\sigma_{m,2}} \tag{28}$$

В монографии [15] критерий разрушения Друкера – Прагера был сформирован как обобщенный критерий Мора–Кулона для горных пород. Условие Мора — Кулона не исключает возможности существования умеренной величины растяжения. Если предполагается, что грунт не может выдерживать растяжения абсолютно, условие текучести изменяется таким образом, чтобы оно учитывало эту особенность. Эта гипотеза и является основной для критерия Друккера – Прагера, определяемого выражением :

$$B\sqrt{J_2} = \lambda I_1' + \kappa \tag{29}$$

где λ, κ – константы материала, I_1'– первый инвариант девиатора тензора напряжений J_2– второй инвариант девиатора тензора напряжений, и определяются следующим образом:

$$I_1' = \sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3' \tag{30}$$

$$J_2 = \frac{1}{6}((\sigma_1' - \sigma_2')^2 + (\sigma_1' - \sigma_3')^2 + (\sigma_3' - \sigma_2')^2) \tag{31}$$

$\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3'$ – эффективные главные напряжения. Для описания критерия разрушения Друкера– Прагера, когда критерий описывается в рамках октаэдрического сдвигового напряжения, τ_{oct}, и октаэдрического нормального напряжения σ_{oct}', принимает форму:

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}}\,(3\lambda\sigma'_{oct} + \kappa) \tag{32}$$

$$\sigma'_{oct} = \frac{1}{3}I'_1 \tag{33}$$

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}J_2} \tag{34}$$

Параметры λ и κ могут быть найдены через трехосный тест на сжатие и представлены через угол внутреннего трения и когезию:

$$\lambda = \frac{2sin\varphi}{\sqrt{3}\,(3 - sin\varphi)} \tag{35}$$

$$\kappa = \frac{6c\,\cos\varphi}{\sqrt{3}\,(3 - sin\varphi)} \tag{36}$$

Глава 2. ОЦЕНКА ПОВЕДЕНИЯ ОКОЛОСКВАЖИННОГО ПРОСТРАНСТВА

2.1. Анализ методов прогноза выноса твердой фазы

Факторы, воздействующие на устойчивость слабоконсолидированных пород в околоскважинной области глобально можно разделить на три группы: геологические условия залегания эксплуатируемого объекта, технологические условия освоения эксплуатационной скважины, физико-механические свойства пород. К геологическим условиям залегания можно отнести глубину залегания эксплуатационного объекта, тектоническую активность области залегания пласта, плотность горной породы. Во вторую группу факторов входят такие параметры как градиент давления, скорость фильтрации пластовых флюидов в оклоскважинной области, обводненность добываемой нефти, минерализация пластовых вод. Физико-механические свойства пород, слагающих продуктивный пласт можно отнести предел прочности и предел текучести, модуль Юнга и модуль сдвига, коэффициент Пуассона, тип цементации породы, глинистость, минералогический и гранулометрический состав, сжимаемость горных пород и их реологические свойства.

Анализируя данные факторы формально можно выделить три основных метода для оценки околоскважинного пространства: первым методом является эмпирическим методом, высокая достоверность которого может быть достигнута благодаря длительности исследований, которые могут занимать несколько лет в связи со сложностью мониторинга и регистрацией большого массива данных по всем рассматриваемым скважинам на анализируемом месторождении[16];вторым является метод, основанный на моделировании в лабораторных условиях, который зачастую применяться для уточнения аналитических или численных моделей и имеет ряд ограничений в связи с использованием природных образцов керна для исследований, так как является трудоемким и дорогостоящим мероприятием. Третьим основным методом оценки околоскважинного пространства являются численный метод,

основанный на методе дискретных элементов, представленные на Рис.2.1 или методе конечных элементов.

Моделирование методом дискретных элементов наиболее широко используется в биологии и химии, однако применяется и в исследовании взаимодействии гранул горных пород. За основу метода дискретных элементов, взята система гранул песчаника, для каждого элемента рассчитывается баланс сил, которые включают в себя силы взаимодействия с соседними элементами, гравитационные силы, а также силы взаимодействия с флюидом. Процесс расчета движения жидкости при использовании данного метода отделен от движения твердых частиц и производится благодаря параллельным вычислениям.

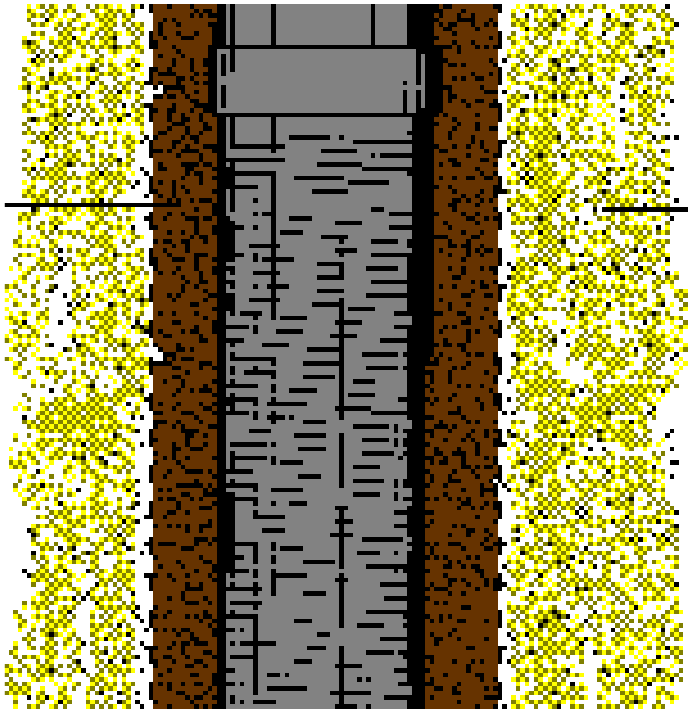

Рис.2.1 Околоскважинная область методом дискретных элементов

Преимуществом метода динамики элементов являются широкие возможности моделирования различных сил и механизмов сцепления гранул, и возможность определить положение гранул в пласте. Существенным изъяном такого моделирование является малый масштаб моделирования в пространстве и во времени, который требует больших вычислительных мощностей процессора и длительного расчета 160 – 350 часов.

2.2. Геомеханический метод

Разработка комплексной методики оценки и прогноза количества выносимых частиц для оптимизации параметров продуктивности скважин является одним из важных этапов разработки месторождения. Активность выноса твердой фракции зависит от изменения напряженно–деформированного состояния околоскважинного пространства в процессе разработки.

Предлагаемый подход к оценке количества выносимых частиц разделяется на несколько этапов:

- Восстановление динамических, статических деформационных и прочностных свойств вдоль ствола скважины с учетом текстурных особенностей пород и сложного структурно–тектонического строения региона.
- Построение 1Д геомеханических моделей в целевом пласте для переходного тектонического режима (с нормального к сдвиговому).
- Построение трехмерной конечно–элементной модели горизонтального участка ствола скважины “fishbone” в пороупрогопластичной постановке позволило оценить поле напряжений и пластические эффекты, которые возникают при изменении забойного давления.
- Проведение комплексного анализа геологической, петрофизической и геомеханической информации, а именно выявление, в каком литотипе происходит критический вынос породы и при каких технологических условиях.

Рассмотрим каждый этап более подробно.

Описание объекта моделирования

Горизонтальная скважина 1G обладает технологическими особенностями конструкции – горизонтальный ствол с несколькими боковыми отростками (Рис.2.2)

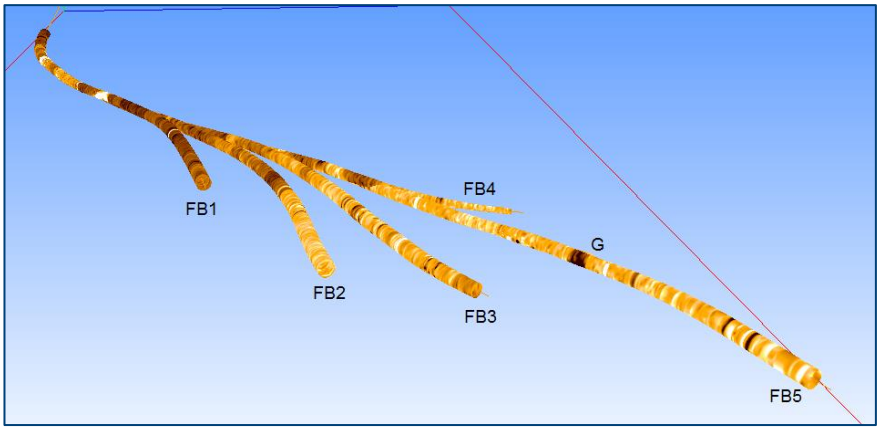

Рис.2.2 Модель интервала скважины

Бурение в этой скважине было осложнено аварийностью основного ствола и осыпанием 1G_FB2, в связи с этим был пробурен второй основной ствол. По фактическому потенциалу скважина превышает расчетный потенциал, что, предположительно, связано с работой всех пробуренных стволов.

Для конечно–элементного моделирования была принята модель интервала горизонтальной скважины. Литологические условия характеризуются тем, что могут существовать различные режимы напряженного состояния: нормальный, сдвиговый и взбросовый (Рис.2.3). Каждый режим характеризуется преобладанием определенной компоненты тензора напряжений.

Таблица 2.1

Напряжения и свойства породы, на различных рассматриваемых глубинах

Главные компоненты тензора напряжений	σ_1	σ_2	σ_3
Нормальный	σ_V	σ_H	σ_h
Сдвиговый	σ_H	σ_V	σ_h
Взбросовый	σ_H	σ_h	σ_V

Вертикальное и два горизонтальных напряжения – это главные компоненты тензора напряжений, соответствующие неравенству $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (Табл.2.1).

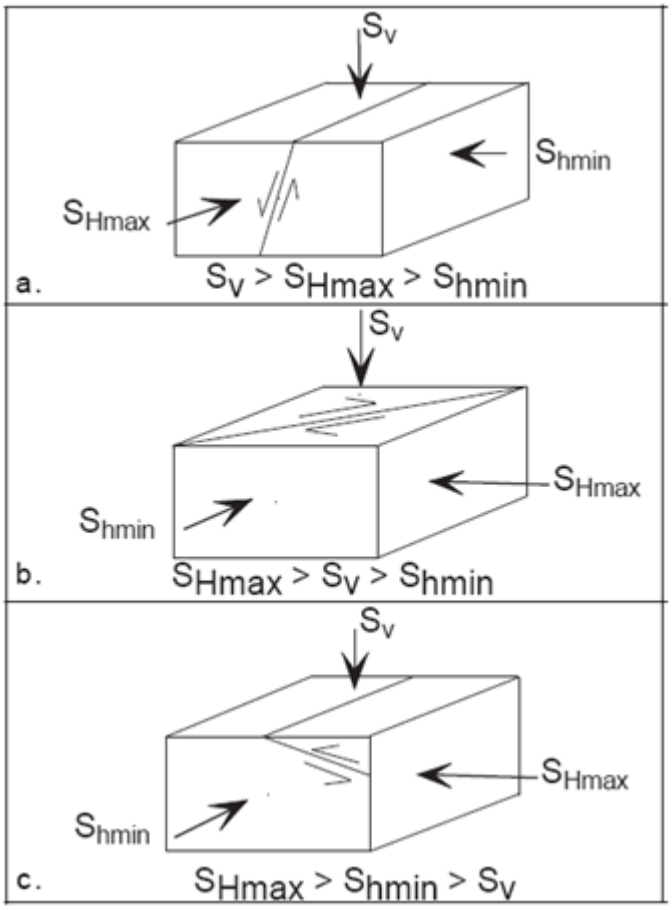

Рис.2.3 Режимы напряжений в горной породе

Скважина 1G находится в сдвиговом режиме напряженного состояния (рисунок Рис.2.3b). Общая длина ствола 4150м. Эффективная длина эксплуатируемого ствола L = 3480 м.

Геомеханическая модель устойчивости

Геомеханическая 1Д модель описывает упругие и прочные свойства горных пород, распределение напряжений и порового давления в зависимости от глубины. Для определения механических свойств пласта, порового давления, ориентации и величин напряжений для конечно–элементного моделирования, была построена 1D модель.

Входными данными для построения модели устойчивости являются

данные плотностного и акустического каротажа, по которым восстанавливаются значения динамических упругих модулей, которые могут быть пересчитаны в профили статических упругих и прочностных свойств по соответствующим корреляциям.

Переход от динамических упруго–прочностных свойств к статическим осуществляется на основе корреляций, полученных по результатам тестирования керна на механические свойства. Статические упругие деформационные и прочностные характеристики породы определяют ее реакцию при высокоамплитудных, длительных и необратимых деформациях, которым она подвергается в течение времени и, в том числе, которые происходят при нарушении целостности стенок скважины.

К статическим упруго–прочностным свойствам относятся статический модуль Юнга, статический коэффициент Пуассона, предел прочности на сжатие, предел прочности на разрыв, угол внутреннего трения.

Напряжения в массиве горных пород играют важную роль в определении критериев устойчивости ствола скважины при механическом воздействии во время бурения, влияния веса бурового раствора, и угла вскрытия пласта. Определяющее значение имеют ориентация, значение и соотношение главных напряжений, а также механические свойства горных пород. Вертикальное напряжение в любой точке пласта эквивалентно массе породы над этой точкой и вычисляется путем интегрирования плотности по формуле (46).

$$S_v = g \int_0^z \rho dz \,, \tag{46}$$

где S_v– вертикальное напряжение, g – ускорение свободного падения, ρ – плотность породы, z – глубина по абсолютной отметке.

Поровое давление было рассчитано на основе градиента давления, по оценкам измерений порового давления. Величины максимального и минимального горизонтальных напряжений определялись с использованием пороупругой модели деформаций по формулам (47 и 48):

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_V - \frac{\nu}{1-\nu}\alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2}\varepsilon_h + \frac{\nu E}{1-\nu^2}\varepsilon_H \quad (47)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_V - \frac{\nu}{1-\nu}\alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E}{1-\nu^2}\varepsilon_H + \frac{\nu E}{1-\nu^2}\varepsilon_h \quad (48)$$

где σ_H – максимальное горизонтальное напряжение, σ_h – минимальное горизонтальное напряжение, E – статический модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, σ_V – вертикальное (литостатическое) напряжение, α –константа пороупругости Био, P_p – пластовое давление (используется гидростатическое давление), ε_h – деформации в направлении минимальных горизонтальных напряжений, ε_H – деформации в направлении максимальных горизонтальных напряжений.

Для проведения численного моделирования, необходимо было определить свойства горной породы и напряжения из 1Д модели (Рис.2.4), построенной в Techlog 2016 по скважине 1G. Для анализа были взяты свойства пород и напряжения на двух участках: при глубине 1970 и 2032.9 метров.

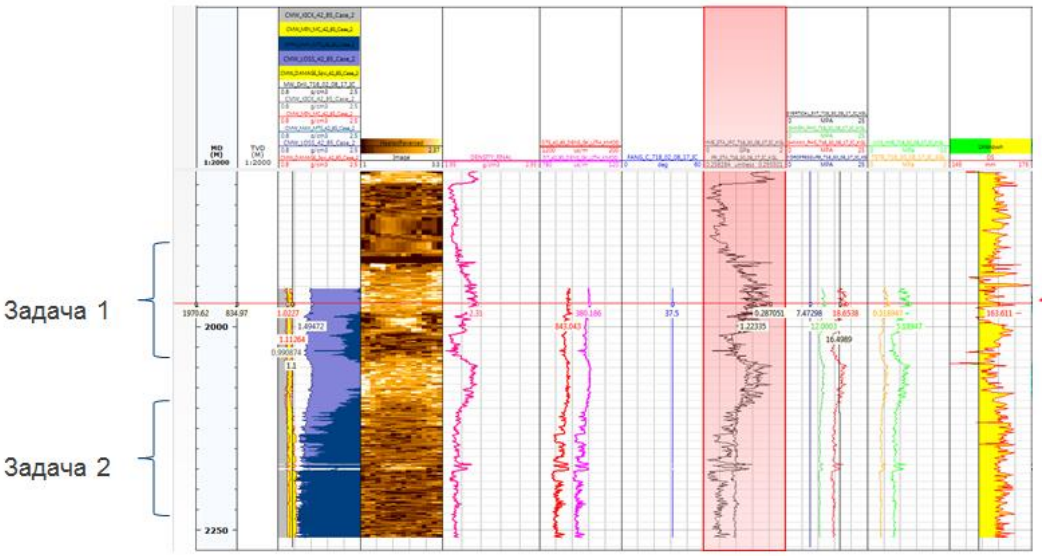

Рис.2.4. Модель механических свойств по скважине 1G.

После построения модели механических свойств по скважине, для двух случаев были определены свойства пород и напряжения, действующие в каждом из участков (Табл.2.2).

Таблица 2.2

Напряжения и свойства породы, на трех рассматриваемых глубинах

№ Задачи:	1	2
Тип литотипа	Песчаник	Глина
Глубина по стволу скважины (м)	1970	1970
Вертикальные напряжения (МПа)	15,95	16,1
Максимальные горизонтальные (МПа)	18	18
Минимальные горизонтальные (МПа)	11,2	11,9
Гидростатическое давление (атм)	78	78
Внутренний угол трения (градусы)	40	37,5
Когезия, Па	1,2e6	1,24e6
Предел прочности при одноосном сжатии (МПа)	3,34	5,1
Коэффициент Пуассона	0,29	0,32
Плотность породы (г/см^3)	2,02	2,33
Модуль Юнга (ГПа)	0,8	1,29
Проницаемость, мкм^2	1	1
Пористость	0,2	0,2
Константа Био	0,8	0,8
Вязкость флюида, Па с	0,004	0,004
Объемный модуль сжатия флюида	1,5e9	1,5e9
L – эффективная длина ствола (м)	3480	
Режим напряжений	Strike Slip	Strike Slip

Трехмерная конечно–элементная геомеханическая модель.

Построение трехмерной конечно–элементной модели горизонтального участка ствола скважины позволит оценить поле напряжений и пластические эффекты, которые возникают при изменении забойного давления.

Постановка задачи

При моделировании поведения горной породы слабоконсолидированного коллектора используются следующие допущения: околоскважинная область моделируется параллелепипедом (см. рис.2.1), стороны которого располагаются по нормали к осям системы координат. В этом объеме выделяется цилиндрическая область, поверхность которой соответствует поверхности 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.

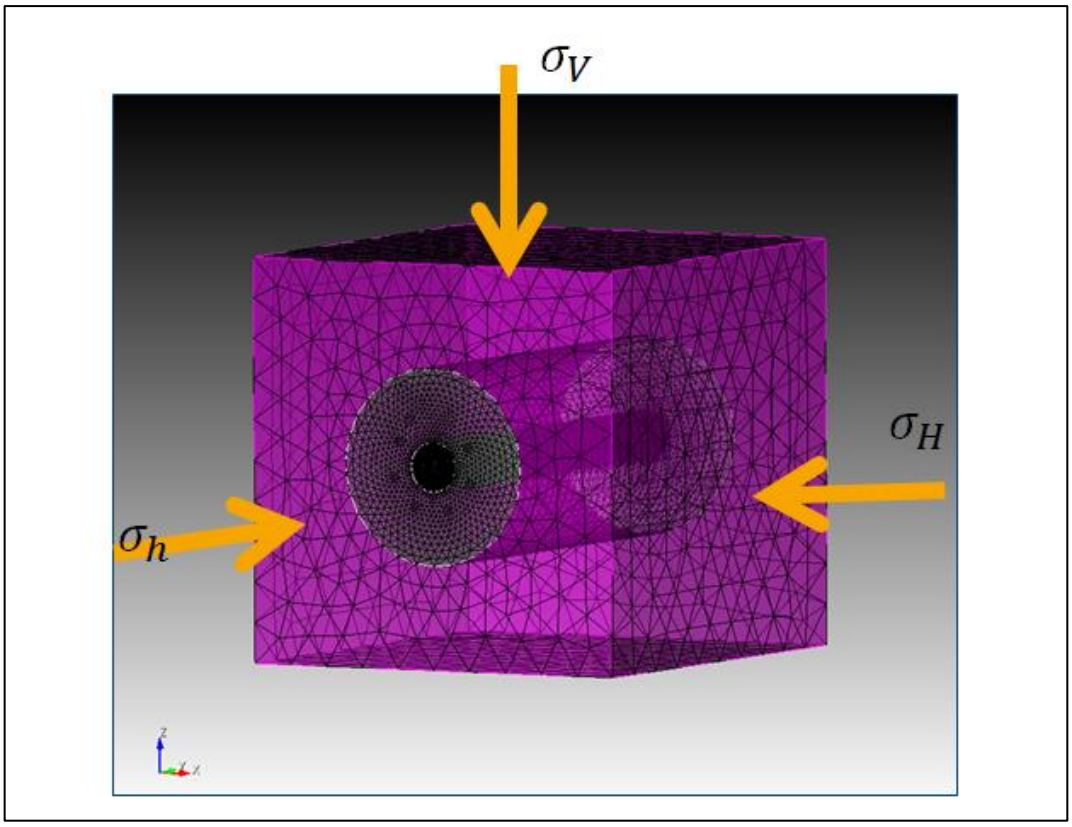

Рис. 2.1 Модель интервала скважины

На внешних границах параллелепипеда задаются главные компоненты тензора напряжений, так, что σ_{HMAX} совпадает с направлением оси X, σ_{hmin} – с направлением оси Y, σ_V – с направлением оси Z. На нижней границе модели равенства нулю вектора перемещений.

Входные данные для построения конечно–элементной модели, полученные из 1Д модели, представлены в таблице 2.2.

Расчетная сетка была построена при помощи инструмента “Построение сетки” в ПО Геомеханика. На первом этапе построения модели был проведен анализ качества сетки. Оценка качества сетки выполнена с использованием метрики качества формы.

В теории метода конечных элементов процесс поиска минимально необходимой расчетной сетки для получения качественного расчета в задаче называется исследованием сходимости по расчетной сетке. Выбирается характерный параметр (в нашем случае – это радиальные напряжения), а затем производится расчет с последовательным измельчением расчетной сетки и сопоставляется с аналитическим решением (Табл. 2.3):

Таблица 2.3

Значение σ_r, при следующих вариантах количества элементов в сетке

Тип сетки	Теоретическое значение, МПа	Тетраэдры (TETRA10)				
Количество элементов в сетке		45252	53624	69880	70103	71329
σ_r	1	0,71e06	0,79e06	0,86e06	0,93e06	0,99e06
Тип сетки		Тетраэдры (TETRA4)				
σ_r	1	0,69e06	0,73e06	0,81e06	0,89e06	0,91e06

В качестве граничных условий задавалось гидростатическое давление на стенку скважины равное 1МПа. И сравнивалось с теоретическим значением для двух типов сеток при различном числе элементов. По результатам варьирования числа элементов была выбран тип сетки TETRA 10.

Математическая модель.

Рассмотрим задачу распределения эффективных напряжений вокруг околоскваженного пространсва в упрогопластичной постановке для пористых насыщенных пород. В основе математической модели лежат уравнения для перемещения и давления, которые были получены из уравнения равновесия и уравнения неразрывности. Вектор смещения пористой среды обозначим через u, а давление фильтрующегося флюида через p. В квазистационарном приближении напряженно–деформированное состояние пористой среды описывается с помощью уравнения равновесия [17]:

$$\operatorname{div} \sigma^{ef}(\mathrm{u}, p) = 0 \tag{50}$$

Следуя определению Терцаги и Био, эффективные напряжения для пористых насыщенных пород имеют вид [3]:

$$\sigma^{ef} = \sigma - \alpha p I = 2\mu(\varepsilon - \varepsilon^{p}) + \lambda\theta_{v} I - \alpha p I \tag{51}$$

где σ^{ef}– тензор эффективного напряжения, σ – полные напряжения, α – константа Био, характеризующий связь между смещением и давлением, p – поровое давление, I – единичный тензор, ε– тензор деформации:

$$\varepsilon(u) = \frac{1}{2}(\operatorname{grad} u + \operatorname{grad} u^{T}) \tag{52}$$

μ, λ –коэффициенты Ламе (модули упругости) :

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{53}$$

$$\lambda = \frac{2\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \tag{54}$$

Модуль Юнга E описывает жесткость тела, т.е. способность тела сопротивляться одноосному сжатию, а коэффициент Пуассона ν – определят продольное расширение относительно продольного сжатия.

Объемная деформация θ_v определяется как сумма элементов главной диагонали тензора деформаций ε:

$$\theta_v = \operatorname{tr}\varepsilon = \operatorname{div} u \tag{55}$$

Далее во всех случаях будем рассматривать только эффективные напряжения и для удобства используем $\sigma^{ef} = \sigma$. В данной работе за основной критерий разрушения принят наиболее часто используемый в литературе для геомеханических задач критерий Мора–Кулона. В радиальной системе координат он записывается следующим образом :

$$\frac{\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr}}{2} - \frac{\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{rr}}{2}\, sin\varphi - C \cdot cos\varphi = 0 \tag{56}$$

где $\sigma_{\theta\theta} -$ главные тангенциальные эффективные напряжения, $\sigma_{rr} -$ главные радиальные эффективные напряжения, $\varphi -$ угол внутреннего трения, C– когезия породы.

Преобразуем критерий Кулона – Мора [3] в зависимость тангенсального напряжения от радиального, используя предел прочности на одноосное сжатие:

$$\sigma_{\theta\theta} = \left(1 + \frac{2\sin\varphi}{1 - \sin\varphi}\right) \cdot \sigma_{rr} + \left(\frac{2\, cos\,\varphi}{1 - \sin\varphi} \cdot C\right) \tag{57}$$

Уравнение равновесие преобразуем с учетом (45) :

$$\frac{d\sigma_{rr}}{dr} - \left(\frac{2\sin\varphi}{1 - \sin\varphi}\right)\frac{\sigma_{rr}}{r} = \frac{1}{r}\left(\frac{2\, cos\,\varphi}{1 - \sin\varphi} \cdot C\right) - \frac{dp}{dr} \tag{58}$$

Запишем обобщенный закон Дарси:

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{m}{k_p}\phi_p\left(v_f - v_s\right) \tag{59}$$

где $m -$ вязкость флюида, $k_p -$ проницаемость, ϕ_p– пористость, $p -$ давление, $v_f -$ скорость флюида.

Закона неразрывности потока:

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{m}{k_p}\phi_p\left(v_f - v_s\right) \tag{60}$$

Скорость флюида:

$$-\frac{Q_f}{2r\pi\phi_p} = v_f \tag{61}$$

Скорость твердого скелета v_s:

$$v_s = -\frac{Q_s}{2\pi(1-\phi_p)}\frac{r^n}{r^{n+1}} \tag{62}$$

где $n = \left(\frac{2\cos\varphi}{1-\sin\varphi}\right)$, $Q_s -$ дебит количества взвешенных частиц, в скважину в единицу времени с одного метра пласта, $Q_f -$ дебит флюида, приходящийся на один метр пласта.

После проведенных преобразований уравнение (46) принимает вид 4:

$$\frac{d\sigma_{rr}}{dr} - \left(\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}\right)\frac{\sigma_{rr}}{r} = \frac{1}{r}\left(\frac{2\cos\varphi}{1-\sin\varphi}\cdot C\right) - \frac{m}{k_p}\frac{Q_f}{2\pi r} + \frac{m}{k_p}\frac{Q_s\phi_p}{2\pi(1-\phi_p)}\frac{r^n}{r^{n+1}} \tag{63}$$

Решением уравнения (51) является распределением радиальных напряжений:

$$\sigma_{rr} = \left(\frac{\left(\frac{2\cos\varphi}{1-\sin\varphi}\cdot C\right) - \frac{m}{k_p}\frac{Q_f}{2\pi r}}{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}}\right)\left(\left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} - 1\right) + \frac{m}{k_p}\frac{Q_s\phi_p}{2\pi(1-\phi_p)\left(\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}+n\right)}\left(\left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}} - \left(\frac{R}{r}\right)^{\mathrm{n}}\right) \tag{64}$$

2.3. Разработка скрипта для реализации модели скважины

Внутри CUBIT имеется поддержка языка программирования, называемого APREPRO (алгебраический препроцессор для параметризации анализа конечных элементов).

Скрипт, написанный на языке APREPRO (ПРИЛОЖЕНИЕ), позволяет осуществить построение геометрии модели, с заданными свойствами породы, граничными условиями, осуществляет генерацию сетки, а также обеспечивает существенное ускорение процесса построения модели и проведение большого числа расчетов.

Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Качественная оценка поведения околоскважинной области в слабоконсолидированных коллекторах повышает эффективность на этапе разработки и эксплуатации месторождения. В данной главе результаты численного моделирования сравниваются с фактическими данными. Исследуется влияние забойного давления с целью прогноза пескопроявления в слабоконсолидированном коллекторе

Геомеханическая конечно–элементная модель описывает упругие и прочностные свойства слабоконсолидированного коллектора, распределение эффективных напряжений и порового давления в зависимости от глубины. Для анализа предельного состояния массива горных пород в данной работе рассмотрен критерий запаса прочности по теории Кулона–Мора.

Комплексная оценка околоскважинного пространства производилась для характерных механических свойств табл.3.1 слабоконсолидированного коллектора, таких как модуль Юнга, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения, и другие.

Таблица 3.1

Характерные механические свойства

Геомеханические параметры	Диапазон
Модуль Юнга (ГПа)	0.4 – 2.5
Коэффициент Пуассона	0.25 – 0.38
Предел прочности при одноосном сжатии UCS (МПа)	2 – 5.25
Предел прочности при одноосном растяжении TSTR (МПа)	0.25–0.85
Внутренний угол трения FANG (градусы)	37.5 – 45

Именно с помощью такой вариативной оценки количества взвешенных частиц (КВЧ) в зависимости от состояния, в котором находиться разные

интервалы многоствольной горизонтальной скважины была оптимизирована схема определения наиболее безопасных депрессий для максимального сохранения прочности скважины и минимизации выноса КВЧ в процессе эксплуатации.

Оценка околоскважинного пространства проведена для минимизации выноса КВЧ в упругой, пороупругой и пороупругопластичной постановках. Рассмотрим результаты анализа околоскважинной зоны в каждую постановке более подробно.

3.1. Оценка напряженно-деформированного состояния

Оценка КВЧ в ПО Геомеханика была проведена в упругой постановке. В случае плоско–деформированного состояния, компоненты тензора напряжений в цилиндрической системе координат для горизонтального участка скважины имеет вид (10) – (14). Моделирование околоскважинного пространства интервала горизонтальной скважины проведено в режиме напряжений strike–slip $\sigma_{HMAX} > \sigma_V$ со свойствами из таблицы 2.2. Время одного расчета в данной постановке занимает от 1 – 1,5 часа.

Для выбранных параметров горной породы, исследуется прочность стенок скважины и влияние снижения плотности бурового раствора, а именно со снижением забойного давления по табл. 3.1

.

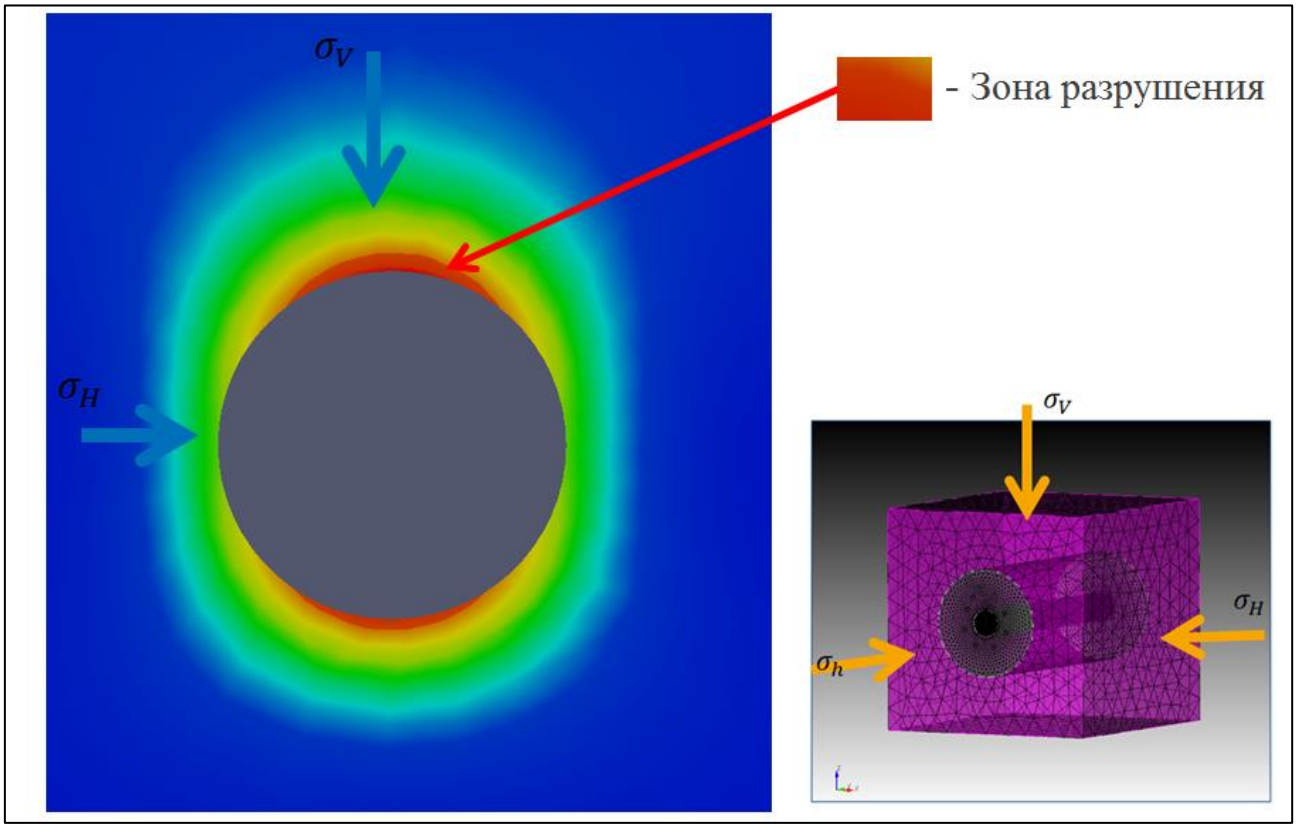

Рисунок 3.1 Результаты расчета модели в упругой постановке

При снижении плотности бурового раствора увеличиваются кольцевые напряжения. Более высокая плотность бурового раствора обеспечивает необходимую устойчивость ствола скважины.

Аналогичная оценка околоскважинного пространства на предмет обрушения, где критерием выноса КВЧ является зона, в которой происходит активное пескопроявления, была реализована в пороупругой постановке со снижением забойного давления по Табл. 3.1 в ПО Геомеханика ОБС

Таблица 3.2

Вывод на режим

$P_{заб}$ (атм)	61.6	60.2	55.1	54.1	46.7	45.3	45
$P_{пл}$ (атм)	78	77.63	77.51	77.43	77.25	77.11	76.42

В пороупругой теории прочность породы является функцией трех главных эффективных напряжений и может быть представлена в виде поверхности в

пространстве главных напряжений. Следуя определению Терцаги и Био, эффективные напряжения для пористых насыщенных пород имеют вид:

$$\sigma' = \sigma - \alpha P_p\,, \tag{65}$$

где σ – полные напряжения, α – константа Био, P_p – поровое давление.

Моделирование околоскважинного пространства горизонтальной скважины проведено в сдвиговом режиме напряжений ($\sigma_{HMAX} > \sigma_V$) со свойствами из таблицы 2.2. Рассмотрим результаты конечно–элементного моделирования в ПО Геомеханика ОБС в пороупругой постановке см рис 3.3.

Для оценки пескопроявления в расчете поэтапно снижалось забойное давление с изменением пластового давления на границах К-Э модели.

Дальнейший этап – это оценка главных напряжений по критерию разрушения Кулона.

Последний этап – это удаление области разрушения и дальнейшее снижение забойного давления (Рис.3.1). Каждая точка на Рис.3.3 – это результат одного расчета. Время одного пороупругого расчета занимает 2,5 – 3 часа.

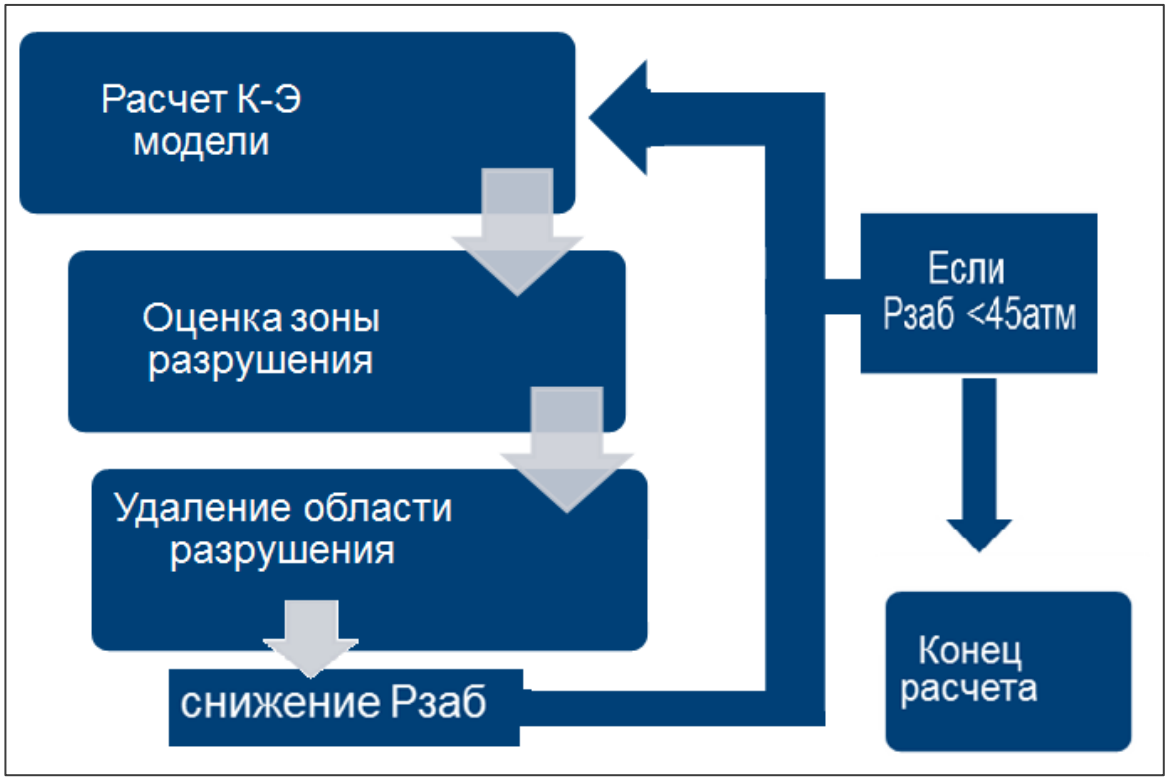

Рис.3.1 Схема расчёта модели

Для анализа рассмотрим результаты расчета представленные в ПО Геомеханика

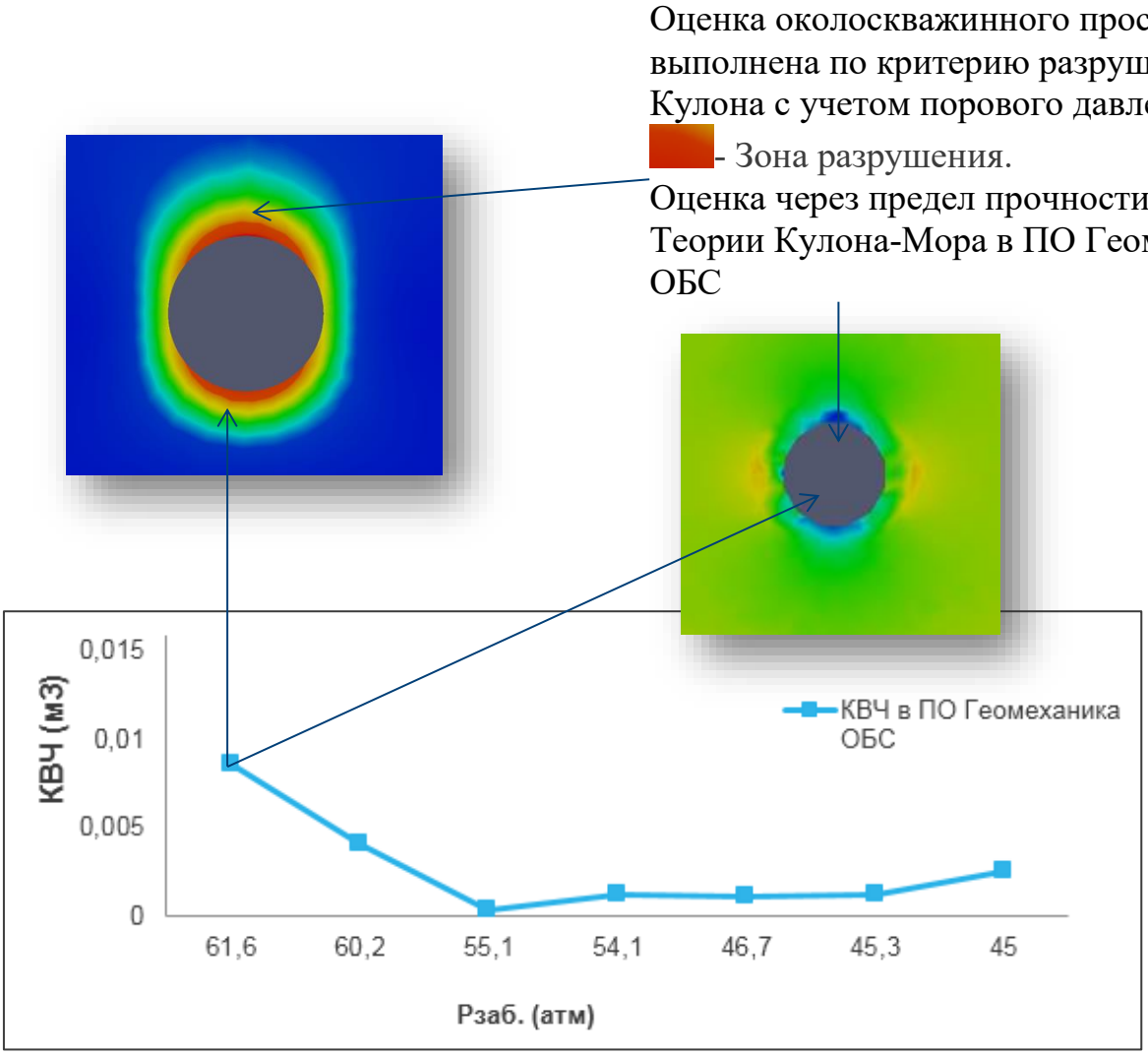

Рис.3. 3 Оценка КВЧ 472 в пороупругой постановке

Так поэтапно проведя 7 пороупругих расчетов и используя преобразование для КВЧ можно получить полную картину распределения КВЧ в зависимости от снижения забойного давления в пороупругой постановке. Преобразование для КВЧ имеет вид:

$$V_{\text{чквч}} = \frac{\left(Q_{fs}t - \frac{(N_{\text{квч}}Q_{\text{жч}}t)}{\rho_f}\right)}{L}, \tag{67}$$

где $V_{\text{чквч}}$ – объем квч (м3), Q_{fs} – дебит смеси (жидкость и частицы горной породы), $N_{\text{квч}}$ – значение квч (мг/л), ρ_{fs} – плотность смеси.

Активность пескопроявления увеличилась при моделировании в пороупругой постановке в ПО Геомеханика ОБС по сравнению с данными полученными в результате проведения упругих расчетов в ПО Геомеханика

Причиной увеличения зоны обрушения (увеличение объем $V_{\text{чквч}}$) является ослабление горной породы. Учет порового давления приводит к уменьшению эффективного напряжения, таким образом, к увеличению пескопроявления.

3.2. Сравнение с фактическими данными

Численное моделирование процесса вывода на режим по двум конечно–элементным моделям показало, что суммарное разрушение в пороупругой постановке составляет 78.6% от фактических данных по КВЧ, что доказывает работоспособность геомеханического метода, приведенного в главе 2.

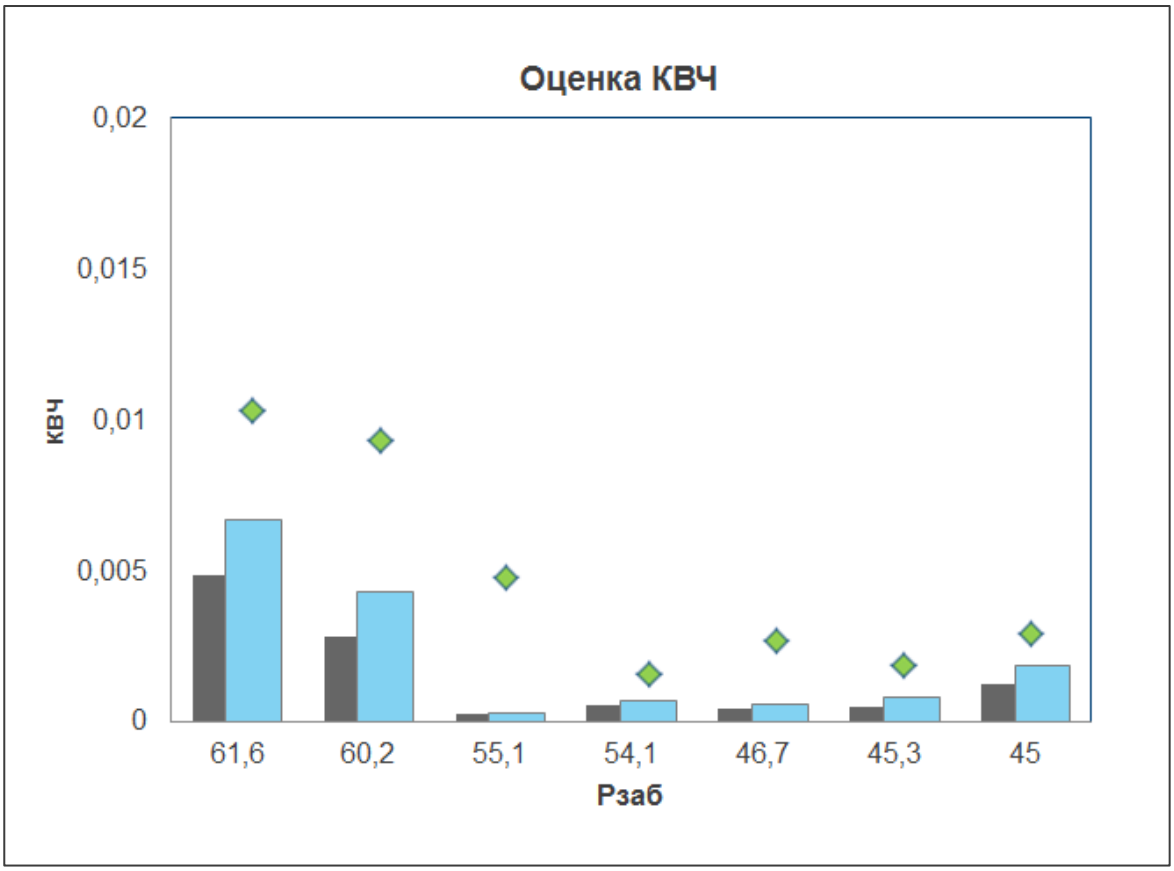

Рис.3.2 График распределение КВЧ при снижении забойного давления (зеленый цвет – КВЧ из ВНР, голубой цвет – модельное значение КВЧ в пороупругой постановке, серый цвет – модельное значение КВЧ в упругой постановке)

Из графика распределения КВЧ по двум конечно–элементным моделям на можно сделать следующие выводы:

- Максимальное значение КВЧ достигается при забойном давлении (Рзаб.) = 61.1 атм.
- Оптимальное значение забойного давления изменяется в интервале от 55 атм до 54.8 атм, дальнейшее снижение забойного давления приводит к увеличению зону обрушения, следовательно увеличивается фактическое КВЧ.
- Точность прогноза пескопроявления по К–Э модели в ПО Геомеханика ОБС составляет 78.6%, а по модели в упругой постановке всего 61.4% . Это различие связано с учетом эффективных напряжений в пороупругой модели.

Для дальнейшего корректного определения оптимального значения забойного давления проведем численное моделирование в пороупругопластической постановке.

3.3. Определение наиболее безопасных депрессий

Пороупругопластичная модель интервала горизонтальной скважины, проиллюстрированная на Рис. 2.1, позволяет повысить качество оценки околоскважинного пространства благодаря учету эффективных напряжений в совокупности с анализом пластической зоны.

Предположим, что во время эксплуатации вокруг необсаженной нефтяной скважины происходит развитие зоны пластических деформаций, и интенсивность выноса твердой фазы зависит от распределения эффективных напряжений (64)-(65).

Процесс моделирования напряженного состояния основывается на нагружении модели вертикальными напряжениями, которые рассчитываются исходя из веса вышележащих пород, и горизонтальными напряжениями. Основная задача подобрать такие граничные условия горизонтальных напряжений (градиент минимального горизонтального напряжения и

отношение максимального горизонтального напряжения к минимальному горизонтальному напряжению), что бы рассчитанные деформации и напряжения в каждой ячейке модели соответствовали действительному состоянию геологической среды. Соответствие результатов трехмерного конечно–элементного моделирования проверяется на одномерных моделях и точечных замерах. Для того, что бы исключить влияния граничных эффектов в момент нагружения модели горизонтальными напряжениями и обеспечить равномерную передачу напряжений от ячейки к ячейки. На этапе создания вмещающей среды значения характерных механических свойств слабоконсолидированного коллектора были добавлены из таблицы 2.2 на основании керновых исследований и модели механических свойств.

В результате расчета пороупругопластичной модели интервала скважины методом конечно–элементного моделирования для каждой ячейки были определены все компоненты действующего на неё тензора напряжений, а именно: компоненты тензора эффективных напряжений, компоненты тензора упругих и пластических деформаций, компоненты тензора полных напряжений.

Созданные трехмерные модели устойчивости, на качественном уровне позволяющие определить критические депрессии продуктивных интервалов и фиксировать момент начала разрушения слабоконсолидированных пород таким образом моделировать выводом скважин на установившийся режим эксплуатации (ВНР). Выводом скважин на установившийся режим эксплуатации принято называть процесс освоения скважин, в частности, оборудованных установками электроцентробежных насосов (УЭЦН), после бурения, текущего или капитального ремонта.

На данном этапе приводятся результаты расчетов, разработанной модели в ПО Геомеханика для ВНР. Для адаптации расчетных параметров к истории вывода скважины на режим производилась настройка входных параметров в соответствии с фактическими технологическими картами вывода на режим (см. Рис.3.3) скважины 1G на одном из месторождений Западной Сибири.

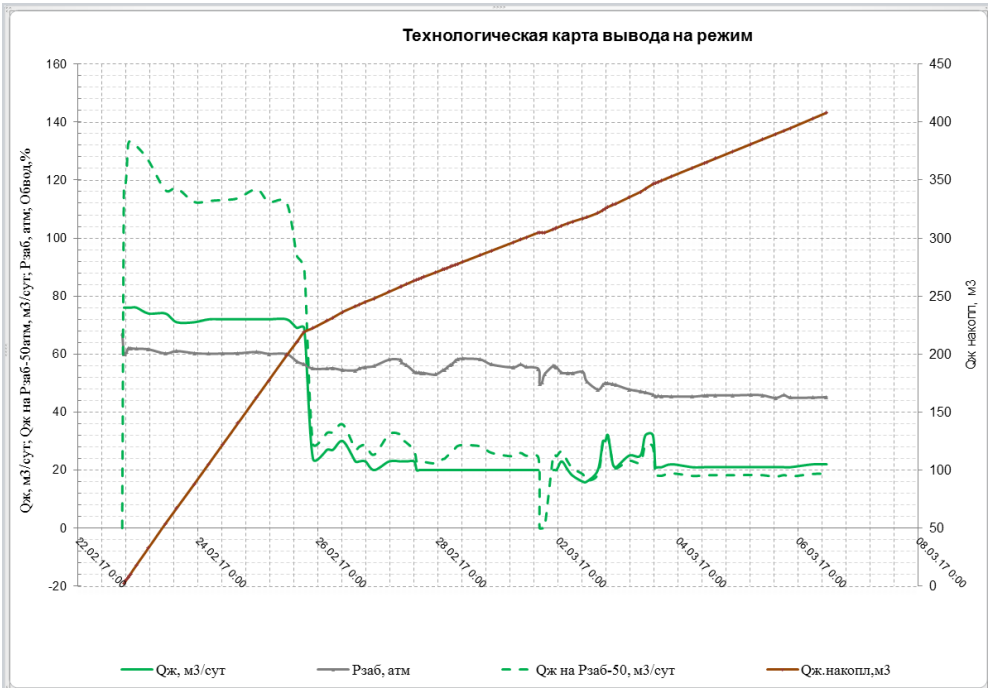

Рис.3.3 Технологическая карта вывода на режим

Для детальной оценки околоскважинной зоны был проведен анализ эффективных главных напряжений. Критерием прочности выступал критерий Кулона. Для коллектора были оценены разрушения (Рис.3.4, Рис.3.5 и Рис3.6).

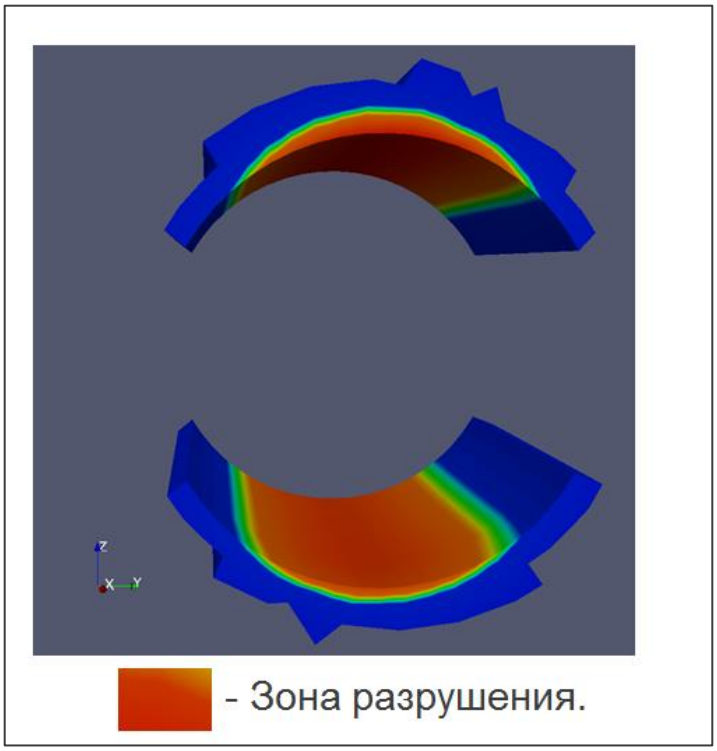

Рис.3.4 Эквивалентные напряжения по Мизесу (задача № 1)

Для анализа напряжений было выгружено облако точек в области интервала соединения. Данное облако было отложено на диаграмме p-q (Рис.3.5), где p и q определяются по формулам (68) и (69):

$$q = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \tag{68}$$

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \tag{69}$$

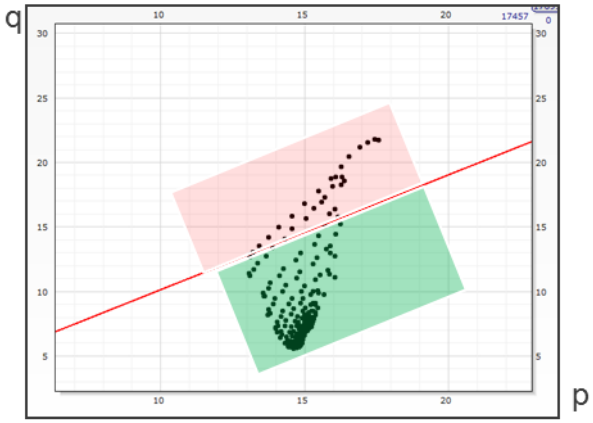

Рис.3.5 Оценка напряжений в пространстве p-q (задача №1). Красная область соответствует обрушенной области, зеленая – неразрушенной.

Аналогично, были проанализированы интервалы скважины при BHP и определены области разрушений.

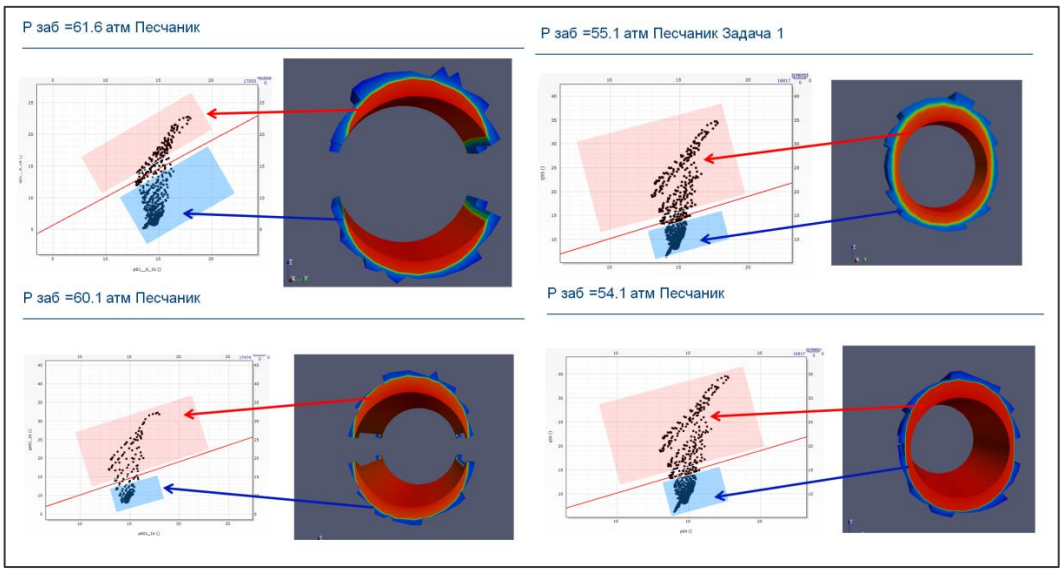

Рис.3.6 Эквивалентные напряжения при BHP (задача № 1)

На рисунке 3.6 показаны эквивалентные напряжения при снижении забойного давления по данным ВНР. Из рисунка видно, что максимальные напряжения возникают на внутренней стенке скважины в направлении минимального горизонтального давления, что согласуется с фактическими данными.

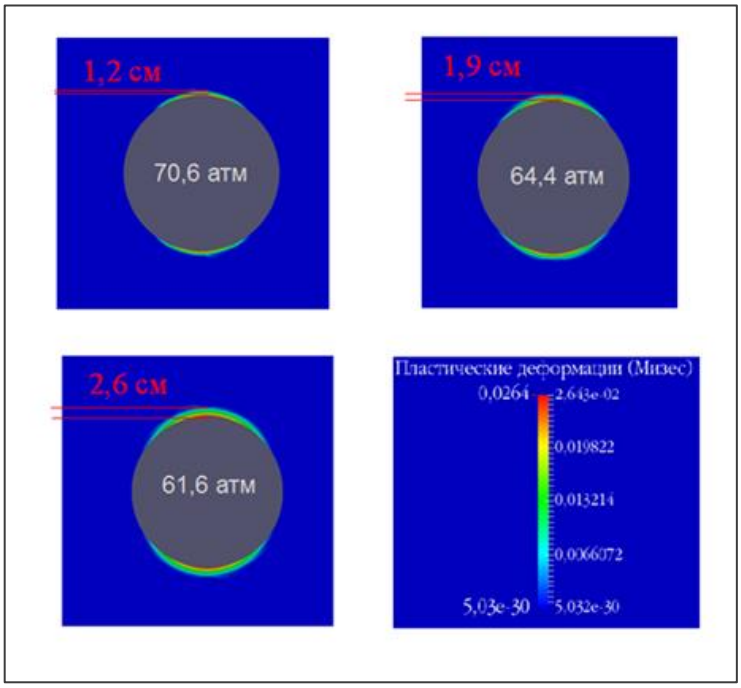

Рис.3.7 Пластические деформации в горизонтальной скважине (задача № 1)

На рисунке 3.7 показаны пластические деформации на участке горизонтальной скважины. Из рисунка видно, что максимальные пластические деформации накапливаются на внутренней стенке скважины, что согласуется с выводом анализа распределения напряжений о расположении зоны разрушения. Расчет пластической зоны вокруг скважины с учетом порового давления до появления неустойчивости в виде полос пластических деформаций показывает зону разрушения околоскважинного пространства, что позволяет нам определить оптимальное забойное в коллекторе. При оптимистичном варианте в 61,6 атм происходят обрушения. Рекомендуется не снижать забойное давление ниже 55атм. Снижение забойного давления ниже рекомендуемого влечет за собой обрушение ствола скважины.

Аналогично, были проанализированы интервалы скважины при BHP и определены области разрушений в глинах на рисунке 3.8.

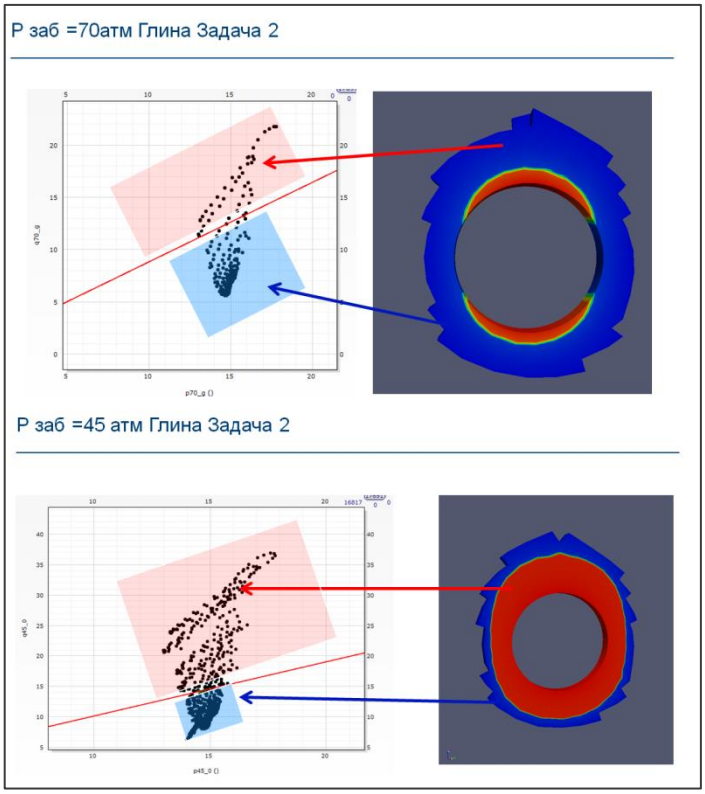

Рис.3.8 Эквивалентные напряжения при BHP (задача № 2)

Средний процент обрушений в 1G по литотипам:

- песчаник 9,6%
- глина 10,8%

На основе анализа обрушений в скважине 1G, средний процент обрушения составляет около 9,6% в песчаниках, в глинах 10,8%.

Это можно объяснить тем, что глинистые отложения характеризуются большим коэффициентом Пуассона, а следовательно и напряжениями, что обуславливает формирования сдвигового режима напряжений в данных отложениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Разработан метод оценки и прогноза выноса твердой в околоскважинном пространстве.
- Реализована численная модель процесса вывода скважины на режим.
- Проведен анализ количества выносимых частиц с сопоставлением с фактическими данными.
- Даны рекомендации по выбору оптимального забойного давления от 56 атм до 54.8 атм для рассчитанного интервала механических свойств слабоконсолидированного коллектора.
- Разработан скрипт для реализации трехмерной модели скважины на языке программирования CUBIT для ПО Геомеханика ОБС , Python для ПО Techlog.

ОХРАНА ТРУДА

Дипломная работа является научно–исследовательский трудом, который представлен в электронном виде, в связи с этим максимальная часть рабочего времени проведена за компьютером. Работа за компьютером носит монотонный характер, это подтверждается ощущениями пользователя, как субъективными, так и объективными реакциями воздействие на организм человека.

К субъективным факторам можно отнести состояние организма человека в момент написания, просмотра или прослушивания текста, в этот момент задействованы органы зрения, органы слуха, а также опорно–двигательный аппарат.

Блики на экране и мерцание приводят к быстрому утомлению и сухости глаз, что может вызвать боль и небольшое жжение и непроизвольно способствует частому морганию.

При наборе текста задействован опорно–двигательный аппарат, в частности максимальная нагрузка идет на работу кистей рук, лучезапястный сустав и предплечье. А также на результативность написания научно–исследовательской работы за компьютером немаловажную роль играет правильная осанка. К субъективным также можно отнести и психоэмоциональное состояние научного исследователя во время работы.

Работа за компьютером является одной из самой утомляемой из всех видов деятельности. Степень утомляемости прямо пропорционально зависит от количества времени работы исследователя за компьютером

Для того, чтобы снизить степень утомляемости и вредное воздействие на здоровье пользователя ПК (Персональным Компьютером) необходимо учесть эргономические показатели организации рабочего места и охраны труда.

Ниже приведены факторы, влияющие на увеличение утомляемости организма при малоподвижной работе в сидячей позе (Табл.4.1).

Таблица 4.1
Факторы, влияющие на увеличение утомляемости

Вредные факторы и последствия для здоровья человека при работе на компьютере						
Зрительное напряжение		Слуховое напряжение	Костно–мышечное напряжение			Нервное и умственное напряжение
Утомляемость	Жжение и сухость	Шум в ушах	Усталость и боль в мышцах	Боль в кистях рук, боль в суставах	Боль в шейно–воротниковой и поясничной области позвоночника	Стрессы, повышение артериального давления

Освещенность на рабочем месте.

В помещениях, где работают пользователи ПК необходимо иметь естественное и искусственное освещение, а также обратить внимание на то, чтобы естественный свет падал с левой стороны от рабочего места, на оконные проемы должны быть предусмотрены жалюзи или занавеси, которые могут регулировать освещение. При работе с документами на рабочем столе, эту зону рекомендуется оснастить дополнительным светильником местного освещения с непросвечивающим отражателем света. Особенно необходимо следить за тем, чтобы свет от светильника не попадал на экран монитора и не создавал дополнительные блики, раздражающие глаза. Освещенность зоны участка работы с документами на поверхности стола должна быть 300–500лк, освещенность поверхности экрана может быть не более 300лк. Для соблюдения условий по освещению помещения рекомендуется применять люминесцентные лампы типа ЛБ белого света. Расстояние от глаз до экрана монитора должно

составлять от 50см до 70см, в зависимости от размера алфавитных знаков, символов и цифр. Рекомендуется после каждых 3–4часов работы на компьютере делать перерыв на 5–8мин для снятия зрительного напряжения и усталости глаз. Для этого рекомендуется выполнять небольшой комплекс релаксирующих упражнений. Данный комплекс не только помогает снять напряжение, но и значительно уменьшить жжение и сухость глаз: сидя на стуле сжать и разжать ресницы на 5–8с, повторить упражнение несколько раз. Сидя на стуле, закройте глаза и, вращая глазами, нарисуйте круг, овал, квадрат и треугольник. Каждую фигуру нарисовать по несколько раз, затем выполнить в обратную сторону. Сидя на стуле, закройте глаза прорисуйте закрытыми глазами знак бесконечности по несколько раз в одну сторону и обратно.

Для снятия напряжения и усталости в области шеи, плеч, спины, рук и ног рекомендуется 2–3 раза в день делать упражнения или перерыв в работе на 5–7минут. Для этого рекомендуется выполнять небольшой комплекс релаксирующих упражнений сидя или стоя. Данный комплекс помогает снять напряжение в области шеи. Сидя на стуле, наклоните голову на плечо, задержите в таком положении на 4с, затем в другую сторону, повторить упражнение в течение одной минуты. Сидя на стуле, наклоните голову вперед, задержите в таком положении на 4с, выпрямите, повторить упражнение в течение одной минуты. Нельзя закидывать голову назад. Сидя на стуле, перед собой опишите головой букву «О», в одну сторону и в другую сторону, повторять упражнение одну минуту. Встаньте на пол, ноги на ширине плеч, выполнить вращение плечами вперед и назад, время одна минута.

Пройдитесь по кабинету вперед и назад, выполняя растяжку рук за спиной, поменяйте руки, захватив из «в замок». Время выполнения 1–2 минуты.

Электромагнитные поля

Современные плоские ЖК экраны не относятся к источникам широкого спектра электромагнитных изучений, как мониторы с электронно–лучевой трубкой (ЭЛТ), на конце которой генерирует электромагнитное излучение (5 – 400кГц). Для уменьшения воздействия ЭМП на работника ставят защитные

экраны на мониторы. Мониторы с ЭЛТ в большинстве не используются на современных предприятиях. Поэтому внимание следует обратить на наличие большой сети кабелей и проводов около рабочего стола пользователя ПК.

Требования пожарной безопасности при работе с компьютером

Большое наличие компьютерных проводов и сетевых кабелей представляют пожарную опасность. Они нагреваются, иногда при неправильной эксплуатации они могут оплавляться, впоследствии чего произойдет оголение провода и может произойти короткое замыкание. При использовании компьютерной техники необходимо соблюдать требования пожарной безопасности: чтобы избежать возгорания сетевых кабелей, необходимо их прокладывать в специальные металлические газонаполненные трубы или под съёмными полами из негорючего материала. В коридорах и на лестничных пролетах установить пожарные краны гидранты. В помещениях необходимо установить огнетушители. В каждом кабинете площадью от 40кв.м необходимо разместить огнетушитель. На каждом этаже должен быть размещен план эвакуации. В здании и в кабинетах должна быть система оповещения о пожаре; Наличие блокирующих систем возгорания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. R.G. Wan, J. Wang Modelling Sand Production Within a Continuum Mechanics Framework. 2000 г ”.
2. Kirsch, 1898, Die Theorie der Elastizitat und die Bedurfnisse der Festigkeitslehre. Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure.
3. Stenebråten, J. F., Fjær, E. Measuring static and dynamic moduli as functions of stress for a weak sandstone, ARMA 09-179
4. Aadnoy, B.S. and T.S. Froitland. 1991. Stability of Adjacent Boreholes. Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol.6, No.1, 37-43.
5. Aadnoy, B.S. and C. Edland. 1999. Borehole Stability of Multilateral Junctions. SPE 56757.
6. Zhang, Y., N.S. Hobbs, B.E. Ord, and H.B. Muhlhaus, (1996), Computer simulation of single-layer buckling, J. Struct. Geol., 18, 645-655
7. . X. Zhou, L. Shao, and X. Jin. 2010. Simple Three-Step Analytical Scheme for Prediction of Elastic Moduli of hardened Cement Paste. J. of Mater. In Civ. Eng.2010.22:1191-1194.
8. Zhang, Y., Mancktlow, N.S., Hobbs, B.E., Ord, and H.B. Muhlhaus, (2000), Numerical modeling of single-layer folding: clarification of an issue regarding the possibleeffect of computer codes and the influence of initial irregularities, J. Struct. Geol.,22, 1511-1522,
9. N.S. Mancktelow, and S.M. Schmalholz. 2008. Numerical modelling of the effect of matrix anisotropy orientation on single layer fold development. J. Struct.
10. Addis, M.A. 1997. Reservoir Depletion and Its Effect on Wellbore Stability Evaluation. International Journal of Rock mechanics & Mining.
11. R. J. Asaro,, «Elastic-Plastic Analysis of Cracks on Bimaterial Interfaces: Part I—Small Scale Yielding,» Journal of Applied Mechanics, p. 299–316, 1988.
12. R. J. Asaro, «The Fracture Mechanics of Slit-Like Cracks in Anisotropic Elastic Media,» Journal of the Mechanics and Physics of Solids, № vol.20, p. 353–366, 1972.

13. Joseph F. Labuz. 2012. Mohr–Coulomb Failure Criterion. Rock Mechanics and Rock Engineering.
14. M.A., Skalle, P., Al-Ajmi, A.M., and Søreide, O.K. 2010. Stability Analysis in Shale through Deviated Boreholes using the Mohr and Mogi-Coulomb Failure CriteriaMechanics Symposium, Salt Lake City, UT, 27-30 June.
15. Leandro R. Alejano. 2012. Drucker–Prager Criterion. Rock Mechanics and Rock Engineering.
16. Veeken C.A.M. Sand Production Prediction Review: Developing an Integrated Approach / D.R. Davies, C.J. Kenter, A.P. Kooijman// Paper SPE 22792 presented at 66th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, TX. October 6-9, 1991.
17. M.B. Dusseault, F.A. Dullien. Sand production as a viscoplastic granular flow. SPE, 1997 г.