

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	2
1. Общие положения .....	3
2. Описание решения .....	5
3. Анализ результатов.....	8
Заключение .....	9
Список использованных источников .....	10

## ВВЕДЕНИЕ

На протяжении всего цикла разработки месторождения, начиная с момента создания гидродинамической связи пласта с поверхностью посредством бурения скважин и до момента ликвидации всех скважин, горная порода подвергается непрерывному воздействию за счёт изменения механических условий её существования (изменение давления, температуры, удаление части горной породы при бурении). В большинстве случаев изменения, которые происходят с горной породой, существенно влияют на разработку месторождения, поэтому изучение влияния механических изменений на поведение горной породы является важной задачей для успешной разработки месторождений нефти и газа.

В настоящее время вопрос изучения поведения горной породы при изменении механического состояния встаёт наиболее остро, так как для экономически выгодной разработки сложных месторождений с трудноизвлекаемыми запасами (ТРИЗ) необходимо применение технологий, значительно изменяющих первоначальное механическое состояние горных пород (например, необходимо применять несколько стадий ГРП, бурить протяжённые горизонтальные скважины).

Наиболее простым и наглядным способом анализа геомеханического состояния горной породы является построение геомеханической модели, которая представляет собой пространственное распределение напряжений и геомеханических свойств горных пород [1—3]. Поскольку пространство является трёхмерным, наиболее адекватной геомеханической моделью является 3D модель, описывающая напряжения и механические свойства горных пород в трёхмерном пространстве. Однако множество задач геомеханики можно решить, используя более простую 1D модель, представляющую собой распределение напряжений и геомеханических свойств горных пород в зависимости от одной пространственной координаты (глубины).

В данной работе будет построена одномерная геомеханическая модель вдоль ствола скважины на основе данных геофизических исследований (ГИС) и данных по керну, полученных в лаборатории.

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

К необходимым геомеханическим свойствам горных пород для построения адекватной геомеханической модели относятся модуль Юнга, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения горных пород, а также прочность горных пород на одноосное сжатие.

Для описания напряжённого состояния горных пород нет необходимости определять все шесть компонент тензора напряжений, достаточно определить 4 параметра напряжения (вертикальное напряжение, максимальное горизонтальное напряжение, минимальное горизонтальное напряжение, направление горизонтальных напряжений) и поровое давление.

По данным ГИС (а именно акустического каротажа) определяются динамические модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Для определения вертикального напряжения используется плотностной каротаж, а для определения минимального горизонтального напряжения используется, например, мини-ГРП.

Исследования, направленные на определение значений параметров, необходимых для построения геомеханической модели представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Исходные данные для построения геомеханической модели

Параметр	Исследование
Динамические модули Юнга ( $E_{dyn}$ ) и коэффициенты Пуассона ( $\nu_{dyn}$ )	Акустический каротаж ( $V_p$ и $V_s$ )
Статические модули Юнга ( $E_{sta}$ ) и коэффициенты Пуассона ( $\nu_{sta}$ )	Пересчёт через динамические модули с помощью корреляций, полученных на основе керновых данных
Угол внутреннего трения ( $\beta$ ) и прочность горной породы на одноосное сжатие (UCS)	Испытания на керне (например, тест на одноосное сжатие образца)
Вертикальное напряжение ( $S_v$ )	Плотностной каротаж
Минимальное горизонтальное напряжение ( $S_h$ )	мини-ГРП
Направление горизонтальных напряжений	Микроимиджер или акустический каротаж ( $V_p$ и $V_s$ )
Максимальное горизонтальное напряжение ( $S_H$ )	Плотностной каротаж, акустический каротаж

Продолжение табл. 1.1

Параметр	Исследование
Поровое давление	Делаем допущение о гидростатическом режиме

Наиболее наглядным способом представления прочностных свойств горных пород является построение паспортов прочности, отражающих функциональную зависимость возникающих в породе касательных напряжений от нормальных напряжений. Также паспорта прочности наглядно показывают, при каких напряжениях сохраняется прочное состояние породы.

Обычно построение геомеханических моделей осуществляется с помощью специализированного ПО, например, Schlumberger Techlog. В данной работе построение 1D геомеханической модели вдоль вертикальной скважины (ось скважины направлена по одному из главных напряжений) будет выполнено с помощью языка программирования Python. В дальнейшем (уже за рамками данной работы) планируется сделать расчёт для скважины с произвольной инклинометрией (ствол скважины не обязательно направлен вдоль одного из главных напряжений) и сравнить полученные результаты с результатами коммерческого ПО.

Этапы построения геомеханической модели:

- 1) расчёт вертикального напряжения и пластового давления;
- 2) расчёт динамических и статических упругих модулей;
- 3) импорт прочностных свойств и построение паспортов прочности;
- 4) расчёт горизонтальных напряжений по пороупругой модели;
- 5) расчёт устойчивости вдоль главных напряжений и построение итогового планшета градиентов и напряжений.

## 2. ОПИСАНИЕ РЕШЕНИЯ

Код для построения одномерной геомеханической модели представлен по ссылке [4]. Структура кода соответствует описанным выше этапам построения геомеханической модели.

Первым шагом строятся планшеты для пластового давления и вертикального напряжения в зависимости от измеренной глубины (MD, measured depth) вдоль ствола скважины (рис. 2.1).

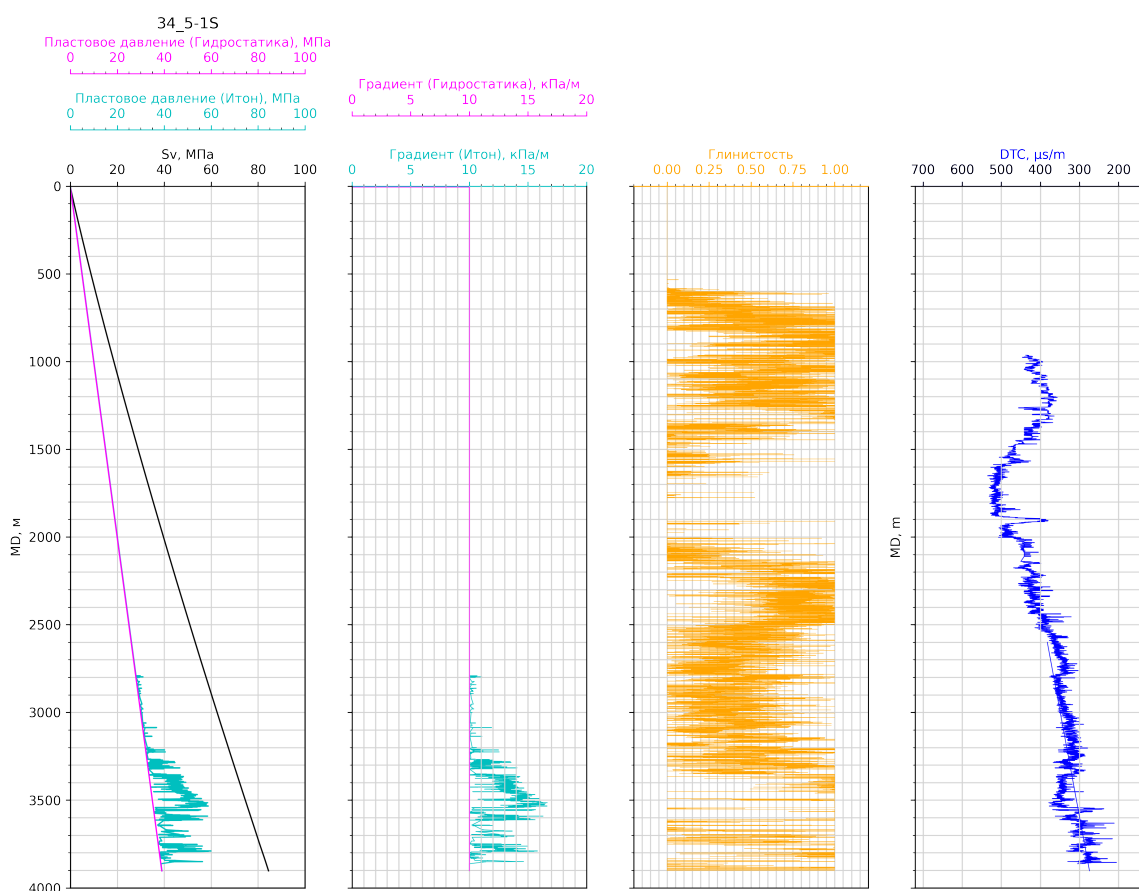


Рис.2.1. Планшеты пластового давления и его градиентов (гидростатических и по Итону), планшеты глинистости и кросс-дипольного каротажа

Далее на основе данных широкополостного акустического каротажа и кросс-дипольного каротажа определяются динамические упругие модули породы. Затем на основе имеющихся керновых данных строятся корреляции между статическими и динамическими упругими модулями породы.

Полученные профили статических и динамических упругих модулей отображены на графиках в зависимости от измеренной глубины (MD) вдоль ствола рассматриваемой скважины (рис. 2.2).

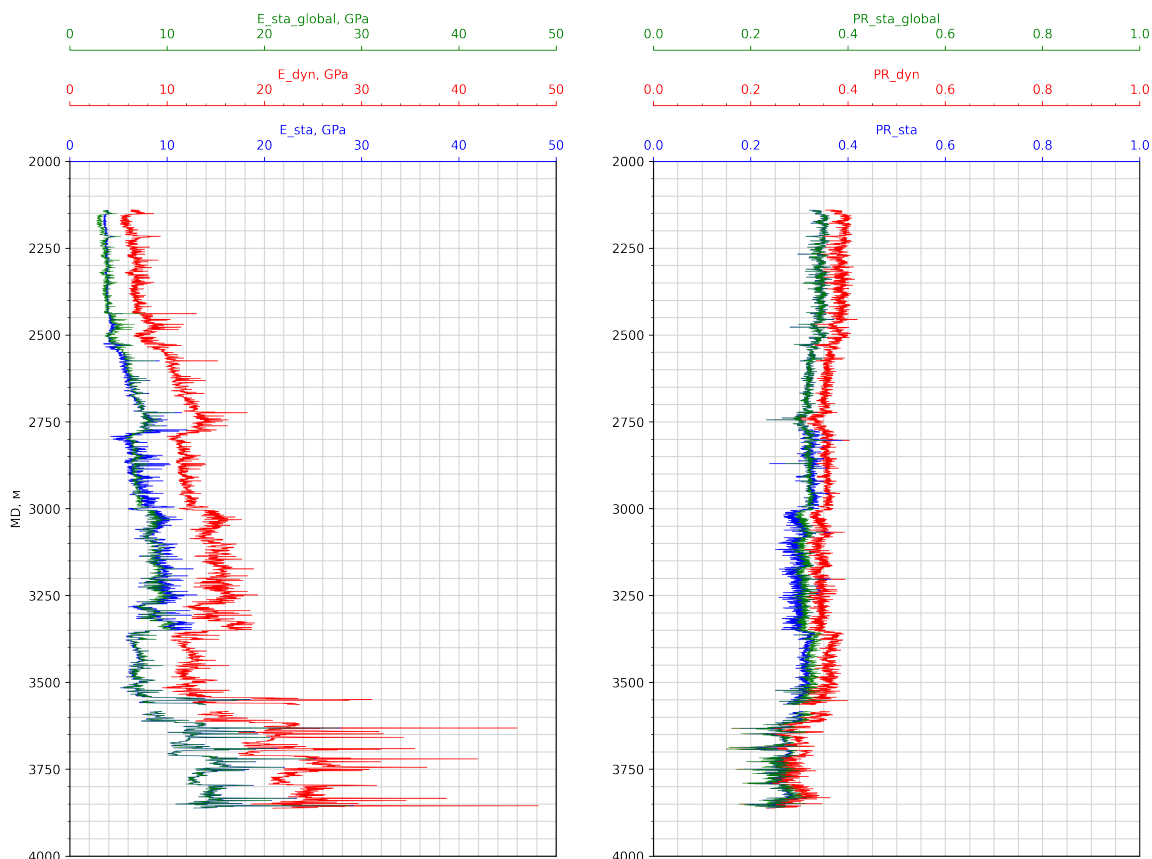


Рис.2.2. Планшеты статических и динамических модулей Юнга и коэффициентов Пуассона вдоль скважины

Для каждого упругого модуля на графиках представлено по 3 профиля: динамический (получен на основе данных акустического каротажа), статический (найден по корреляциям по пяти зонам – каждая из зон определена вручную по единообразному тренду) и глобальный статический (найден по глобальной корреляции между всеми керновыми данными и соответствующими по глубине данными ГИС).

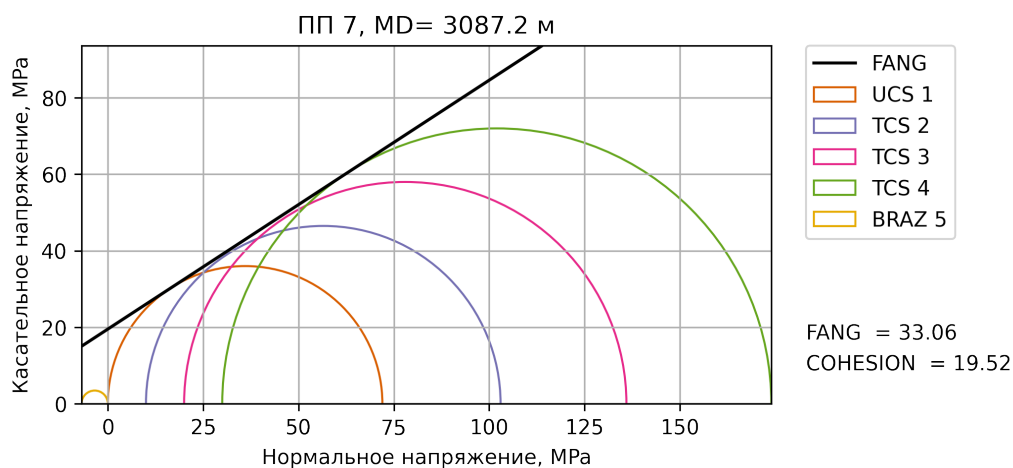


Рис.2.3. Паспорт прочности для образца керна, отобранного с глубины  $MD = 3087.2$  м

Далее на основе экспериментов над каждым из образцов керна строятся паспорта прочностных свойств каждого из них. На рис. 2.3 представлен пример построенного паспорта прочности для одного из образцов керна.

Затем производится расчёт горизонтальных напряжений по пороупругой модели и строится финальный планшет градиентов и напряжений (рис. 2.4). На этом планшете отображаются градиент пластового давления, градиент обвала (равен плотности бурового раствора, ниже которой ствол скважины будет обваливаться), градиент начала поглощений бурового раствора, градиент ГРП (градиент разрыва породы), а также профили пластового давления, минимального и максимального главных горизонтальных напряжений, главного вертикального напряжения.

По полученному итоговому планшету (см. рис. 2.4) можем сделать вывод, что рассматриваемая вертикальная скважина очень устойчива, так как градиент обвала существенно ниже градиента пластового давления.

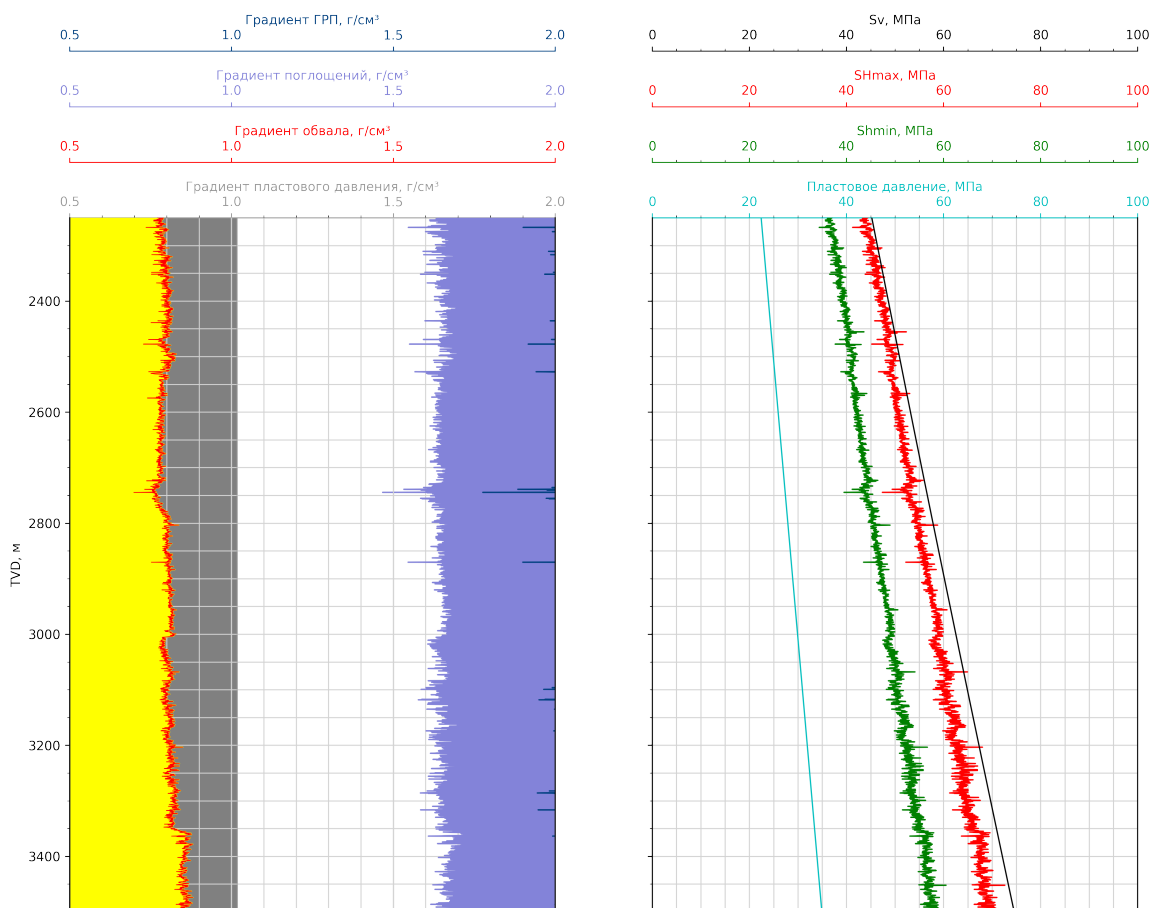


Рис.2.4. Планшет градиентов и напряжений вдоль ствола скважины (построен по истинной вертикальной глубине TVD)

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из построенной одномерной геомеханической модели можем сделать вывод, что в рассматриваемом простейшем случае вертикальной скважины (ось скважины направлена вдоль главного вертикального напряжения) ствол скважины будет устойчивым (градиент обвала существенно ниже градиента пластового давления).

При плотности бурового раствора  $1.6 \text{ г/см}^3$  начнётся поглощение раствора в породу и при достаточно высоких плотностях бурового раствора (около  $2 \text{ г/см}^3$ ) произойдёт гидроразрыв породы.

По полученным планшетам напряжений можем сделать вывод, что наиболее устойчивую скважину удастся пробурить вдоль минимального горизонтального напряжения (так как в этом случае разница между главными напряжениями, действующими перпендикулярно оси скважины, будет минимальна), а устойчивость скважины, пробуренной вдоль максимального горизонтального напряжения, будет ниже (так как в этом случае возрастёт разница между главными напряжениями, действующими перпендикулярно оси скважины).



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе на основе данных ГИС и керновых данных построена одномерная геомеханическая модель вертикальной скважины с помощью языка программирования Python. Проанализирована устойчивость стенок ствола скважины при разных плотностях бурового раствора. Сделаны выводы об устойчивости при бурении вдоль максимального и минимального главных горизонтальных напряжений.

В дальнейшем планирую сделать код расчёта устойчивости стенок для скважины с произвольной инклинометрией (ствол скважины не обязательно направлен вдоль одного из главных напряжений) и сравнить полученные результаты с результатами коммерческого ПО Schlumberger Techlog.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Алиев М. М.* Нефтегазовая геомеханика (учебное пособие). — М.-Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. — 160 с.
2. *Зобак М. Д.* Геомеханика нефтяных залежей. — М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. — 482 с.
3. *Коношонкин Д. В.* Нефтегазовая геомеханика (учебное пособие). — ЦППС НД ТПУ, 2015. — 286 с.
4. Код для построения одномерной геомеханической модели скважины. — URL: <https://colab.research.google.com/github/mualal/geomechanics-with-python/blob/master/GeoMechanics%20WBS.ipynb> (дата обращения: 20.12.2022).