

К.А. ШИПОВСКИЙ, К.В. АВДЕЕВА

ПОСТРОЕНИЕ ОДНОМЕРНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Лабораторный практикум

Самара
Самарский государственный технический университет
2024



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Бурение нефтяных и газовых скважин»

К.А. ШИПОВСКИЙ, К.В. АВДЕЕВА

ПОСТРОЕНИЕ ОДНОМЕРНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Лабораторный практикум

Самара
Самарский государственный технический университет
2024

Печатается по решению методического совета Института нефтегазовых технологий СамГТУ (протокол № 2 от 05.02.2024 г.).

УДК 622.276(076.6)

ББК 33.36я73

Ш 63

Шиповский К.А.

Построение одномерной геомеханической модели: лабораторный практикум / *К.А. Шиповский, К.В. Авдеева.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2024. – 52 с.

Предназначен для использования в ходе выполнения лабораторных работ по дисциплине «Компьютерные и математические методы моделирования и обработки данных в нефтегазовом деле» студентами, обучающимися по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело», профилю «Бурение нефтяных и газовых скважин».

Рассматриваются практические вопросы расчета устойчивости ствола скважины и создания конструкции скважины в программном комплексе «РН-СИГМА». Приводятся вопросы для контроля знаний студентов по темам лабораторных работ.

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, профессор *А.М. Штеренберг*

УДК 622.276(076.6)

ББК 33.36я73

Ш 63

© К.А. Шиповский, К.В. Авдеева, 2024

© Самарский государственный
технический университет, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Проведение буровых работ имеет важное значение в процессе строительства скважин. Процесс бурения обладает своей уникальной спецификой, так как углубление ствола скважины развивается в условиях постоянно изменяющихся геологических параметров. Несмотря на то, что во время проведения буровых работ собирается технологическая информация, часто возникают осложнения и аварии, что способствует привлечению дополнительных ресурсов на их предупреждение и ликвидацию.

Внедрение специализированного программного обеспечения в процессы строительства скважин позволяет эффективно решать производственные, научно-исследовательские и учебно-методические задачи. Применение программного комплекса позволяет студентам, магистрантам и аспирантам изучать технологии строительства и методы решения практических задач, моделировать технологические процессы и визуализировать полученные результаты.

В данном практикуме при проведении лабораторных занятий используется отечественное программное обеспечение в области геомеханического моделирования – программный комплекс «РН-СИГМА».

ПК «РН-СИГМА» – программный продукт для решения задач геомеханического моделирования и анализа устойчивости ствола наклонно направленных и горизонтальных скважин.

ПК «РН-СИГМА» позволяет решать следующие задачи:

- создавать 1D стационарную геомеханическую модель;
- определять безопасное окно плотности бурового раствора;
- проектировать конструкции скважин;
- интерпретировать данные ГИС;
- использовать корреляционные зависимости для геомеханических свойств;
- производить геомеханическое сопровождение бурения в режиме реального времени;
- анализировать риски пескопроявлений и разрушений цементного кольца в процессе эксплуатации.

Лабораторная работа № 1

СОЗДАНИЕ ПРОЕКТА И ЗАГРУЗКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

ПК «РН-СИГМА» построен по проектному принципу. Одновременно в Приложении может быть открыт только один проект, соответствующий файлу с расширением **rnsigma**.

Проект – это множество разнородных данных, которые в соответствии с логикой построения модели должны существовать и передаваться вместе. Например, это может быть геомеханическая модель, петроупругая модель, увязанные элементы данных ГИС, керновые данные, конструкция и траектория скважин, модель нефтяного пласта по одной скважине, одному кусту скважин или по целому месторождению.

Порядок выполнения

1. Создать проект.
2. Добавить элемент *Скважина*.
3. Загрузить траекторию скважин.
4. Загрузить данные ГИС.
5. Загрузить точечные данные.
6. Загрузить стратиграфические отбивки.

Создание проекта

Для создания нового проекта в *приложении* необходимо воспользоваться кнопкой *Новый проект* на панели инструментов (рис. 1.1) или меню *Файл* → *Новый проект* (рис. 1.2). Можно также воспользоваться комбинацией горячих клавиш *Ctrl + N*.

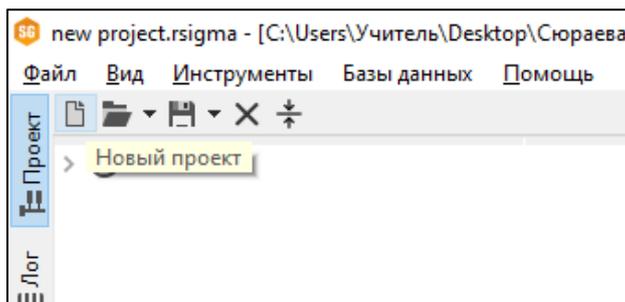


Рис. 1.1

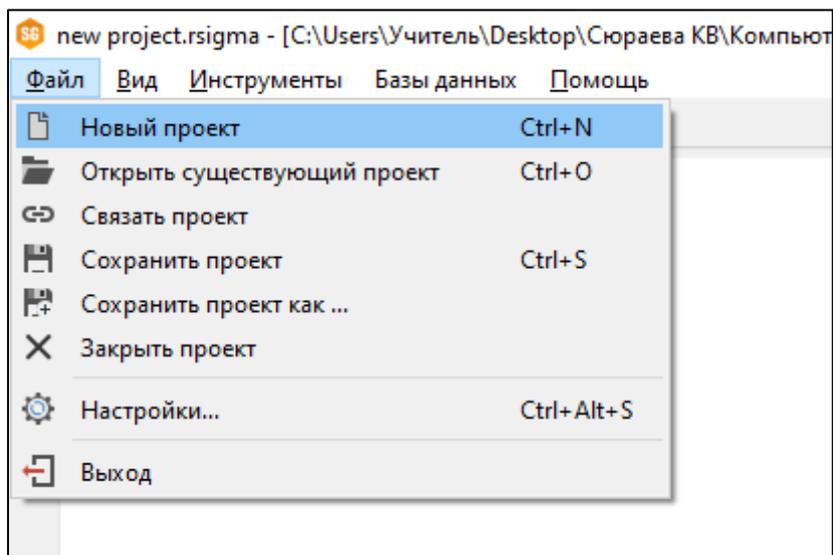


Рис. 1.2

Далее в появившемся окне необходимо выбрать директорию, в которой будет располагаться новый файл проекта, ввести его имя и нажать кнопку **Сохранить проект**.

Ранее созданный проект можно открыть с помощью кнопки главного меню **Открыть существующий проект**.

Сохранить изменения в открытом проекте можно в любой момент, нажав кнопку **Сохранить проект** на панели инструментов, используя комбинацию клавиш *Ctrl + S* или воспользовавшись пунктом меню **Файл** → **Сохранить**. Также при закрытии проекта *приложение* задаст вопрос, нужно ли сохранять проект. При закрытии проекта без сохранения он останется в исходном состоянии и внесенные изменения не будут в нем сохранены.

Добавление элемента **Скважина**

Основной единицей проекта является элемент. В *приложении* существует четыре вида базовых элементов: *Скважина*, *Полигон*, *Карта*, *Геометрия*. Для хранения и сортировки разнородной информации существует также элемент *Папка*. Эти элементы являются базовыми, поскольку могут быть созданы в проекте независимо от наличия остальных элементов. Каждый элемент в свою очередь может содержать набор вложенных элементов, специфичный для данного типа.

Скважина – основной элемент, предназначенный для загрузки и хранения данных с одной скважины, построения геомеханических и петроупругих моделей, а также расчетов устойчивости.

Элемент *Скважина* всегда имеет строго определенную структуру папок (рис. 1.3).

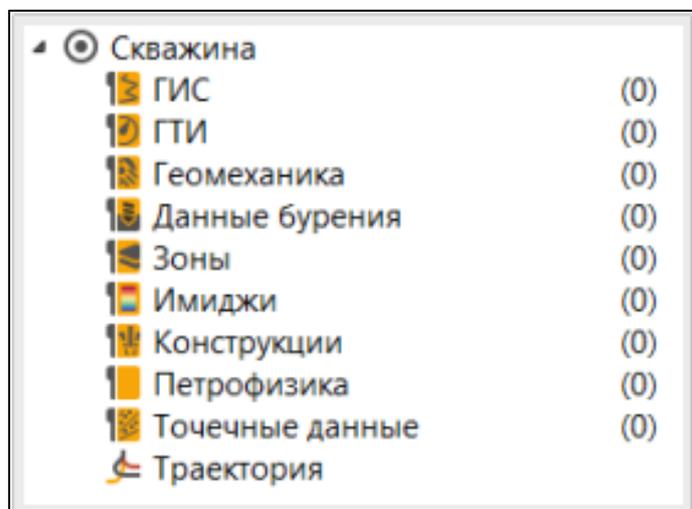


Рис. 1.3

- ГИС – папка для загрузки и хранения данных геофизических исследований скважины, а также профилей – результатов работы инструментов.

- ГТИ – папка для загрузки и хранения данных геолого-технологических исследований, в том числе данных, получаемых во время бурения.

- Геомеханика – папка для хранения элементов *Устойчивость ствола скважины* для построения одномерных геомеханических моделей и расчета устойчивости ствола скважины.

- Данные бурения – папка для загрузки и хранения данных отчетов по бурению.

- Зоны – папка для загрузки и хранения стратиграфических отбинок по скважине.

- Имиджи – папка для загрузки и хранения данных специализированных исследований микроимиджеров, в том числе синтетических.

- Конструкции – папка для создания и хранения вариантов конструкции скважины.

- *Петрофизика* – папка для хранения элементов *Петроупругое моделирование для построения моделей упругих свойств пористых композитных материалов, содержащих флюид*.

- *Точечные данные* – папка для хранения результатов точечных исследований, в том числе специального формата лабораторных исследований керна.

- *Траектория* – папка для загрузки траектории скважины.

Создать базовый элемент в проекте можно через контекстное меню дерева проекта (рис. 1.4) или пользуясь кнопкой *Добавить объект* на панели инструментов (рис. 1.5). В пустом проекте в блоке свойств до загрузки какой-либо информации отображается подсказка.

При создании элементов *Скважина* и *Геометрия* им присваивается уникальное имя, состоящее из названия элемента.

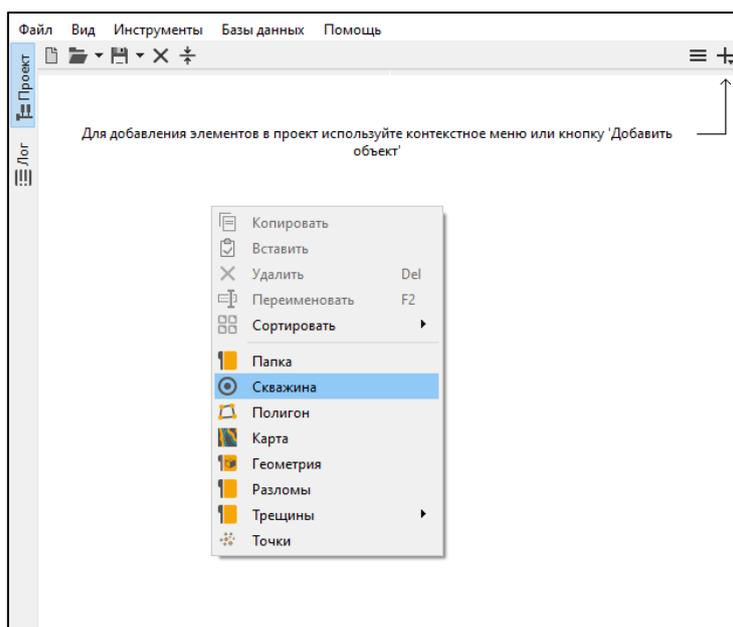


Рис. 1.4

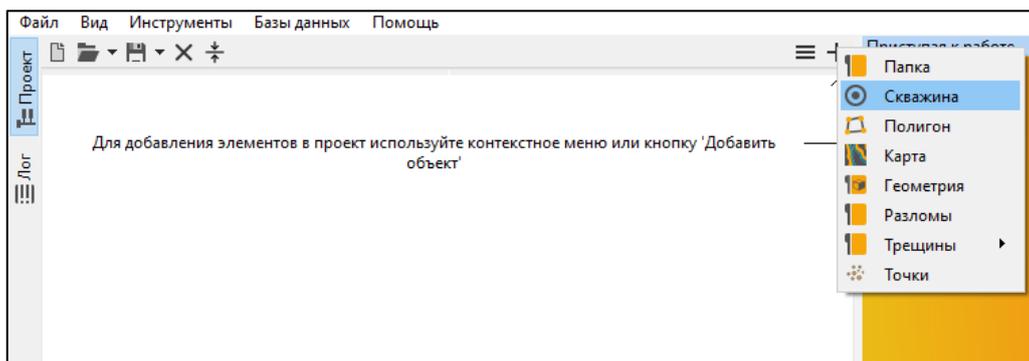


Рис. 1.5

Загрузка траектории

Траектория (или инклинометрия) скважины – это набор точек, через которые она проходит в пространстве. Траектории скважин могут быть загружены из файлов различных форматов (*dev*, *dat*, *csv*, *txt*, *div*, *xls*, *xlsx*). Для загрузки траектории (рис. 1.6) необходимо воспользоваться пунктом контекстного меню элемента *Скважина* → *Импортировать* → *Импортировать траекторию* (рис. 1.6, 1) или пунктом контекстного меню вложенного элемента *Траектория* → *Импортировать траекторию* (рис. 1.6, 2).

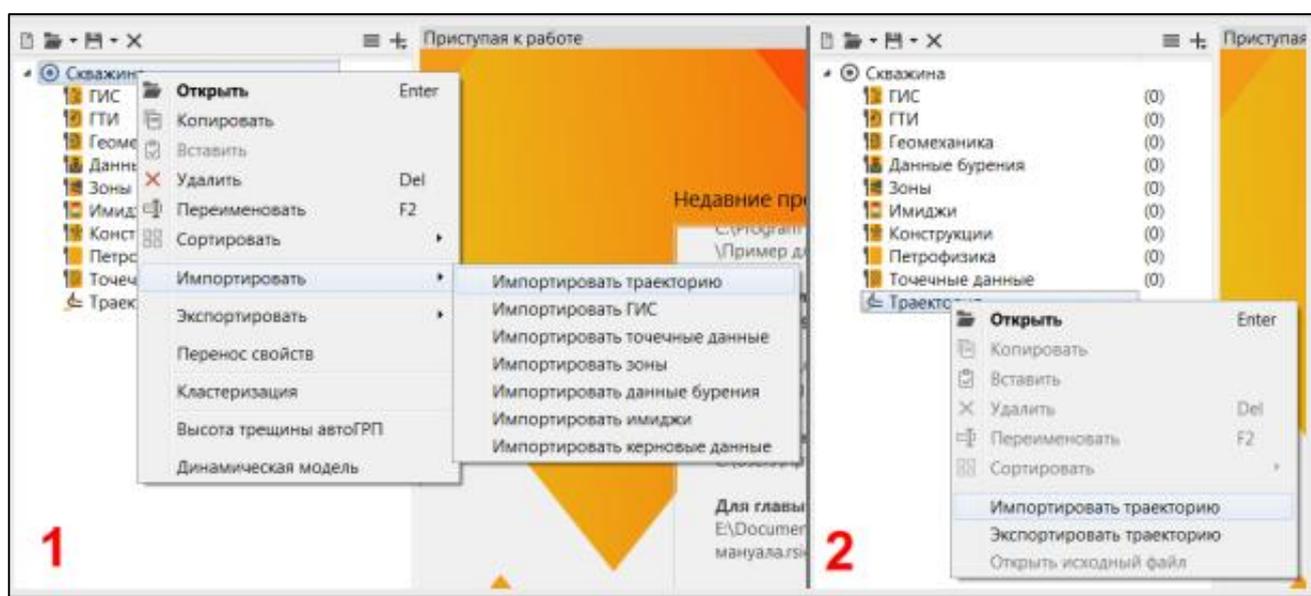


Рис. 1.6

В папке *Тестовые данные* → *1. Опорная скважина* → выбрать файл *3652_true.dev*.

Приложение содержит алгоритмы для автоматического разбора стандартных форматов файлов траектории на основании заголовков столбцов данных. Если стандартный способ не срабатывает, *приложение* предлагает пользователю определить способ чтения файла.

Если траектория загружается из файла текстового формата, в верхней части окна разбора траектории (рис. 1.7) находятся поля *Название скважины* и *Альтитуда скважины*. Поле *Название скважины* заполняется автоматически по правилам, указанным во вкладке *Разное* основных настроек.

Значение поля *Альтитуда* выделяется из шапки входного файла. При отсутствии значения альтитуды траектории присваивается ноль.

При необходимости пользователь может самостоятельно изменить значение этого поля.

Далее пользователь может выбрать один из вариантов чтения траектории из файла: по инклинометрии (MD, INCL, AZIM), по координатам (X, Y, Z) или по приращению координат (DX, DY, TVD). Для удобства разбора файла в нижней части окна разбора приведен верхний фрагмент (200 первых строк) файла траектории. После выбора варианта чтения необходимо указать номер столбца, соответствующего каждому полю данных. В приведенном на рис. 1.7 примере загрузка выполняется по координатам X, Y, Z. Колонка MD в файле имеет номер 1, а колонки X, Y и Z – номера 2, 3 и 4 соответственно. Если приложение некорректно определило кодировку, ее можно поменять в поле *Кодировка*. Нажать *ОК*.

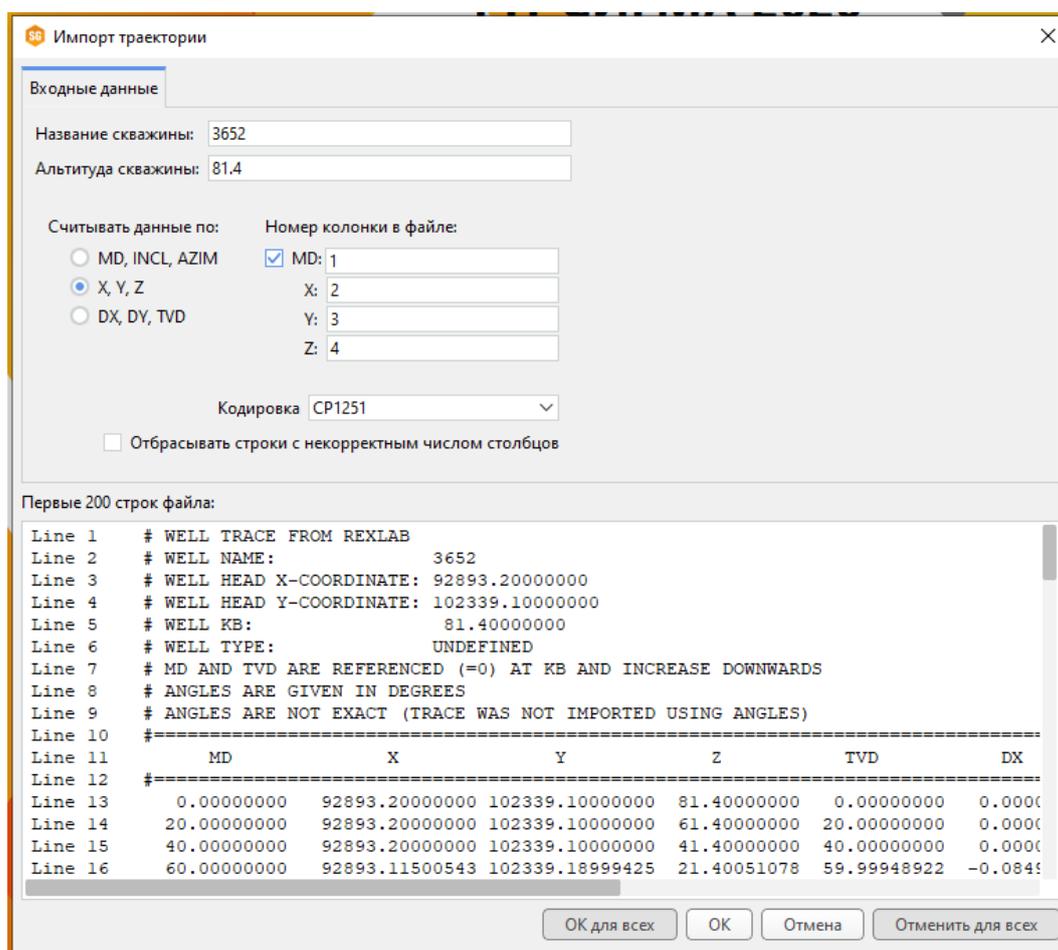


Рис. 1.7

После загрузки траектории становится доступна возможность ее визуализации (рис. 1.8).

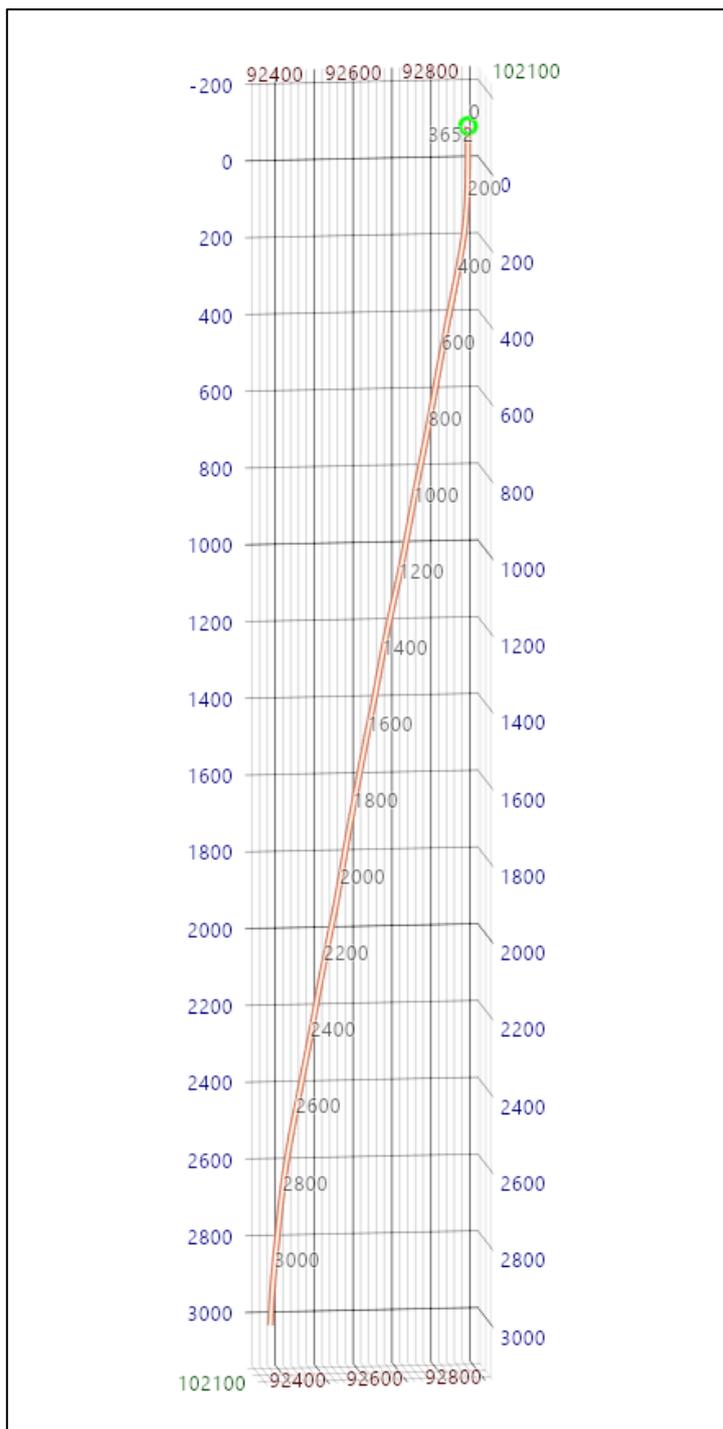


Рис. 1.8

Загрузка данных ГИС

Для загрузки данных ГИС необходимо воспользоваться контекстным меню элемента *Скважина* → *Импортировать* → *Импортировать ГИС* (рис. 1.9).

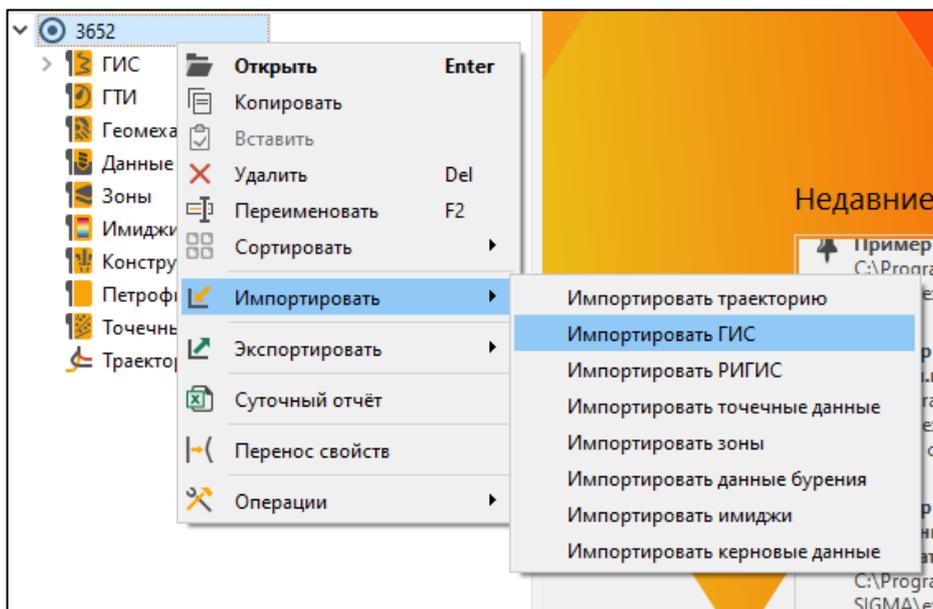


Рис. 1.9

Можно также воспользоваться контекстным меню элемента **ГИС** *Импортировать ГИС* (рис. 1.10).

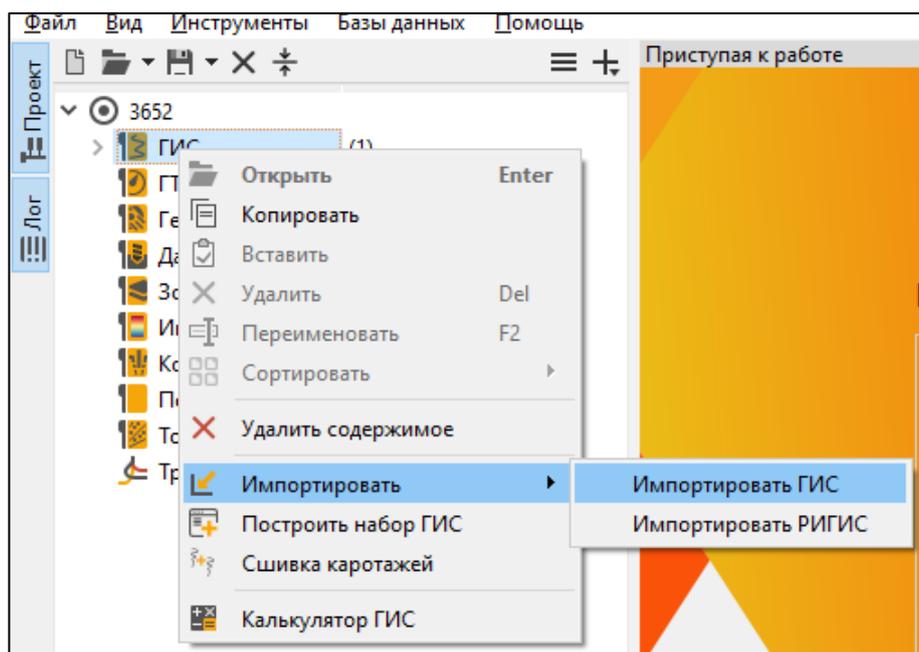


Рис. 1.10

В папке *Тестовые данные* → *1. Опорная скважина* → выбрать файл *PTL3652_AK_kopp.las*.

После выбора файла с расширением *las* открывается окно загрузки данных (рис. 1.11) для определения правил разбора файла.

В левой части данного окна (см. рис. 1.11) отображается содержимое исходного файла. В правой части окна содержится результат

разбора файла по столбцам. Здесь галочками можно выбрать данные для загрузки. Строка загружаемых данных имеет зеленый цвет, строка пропущенных данных – серый.

На рис. 1.11 приведен пример верно разобранной размерности, указанной в шапке файла. При наличии несоответствия тип или единицы измерения должны быть скорректированы пользователем для каждого столбца данных. Отображение содержимого файла помогает пользователю понять, верно ли интерпретирован файл данных. Корректировка типа и единиц измерения доступна по двойному нажатию левой кнопкой мыши на соответствующей ячейке. После проверки единиц измерения и данных для загрузки необходимо нажать **Завершить**.

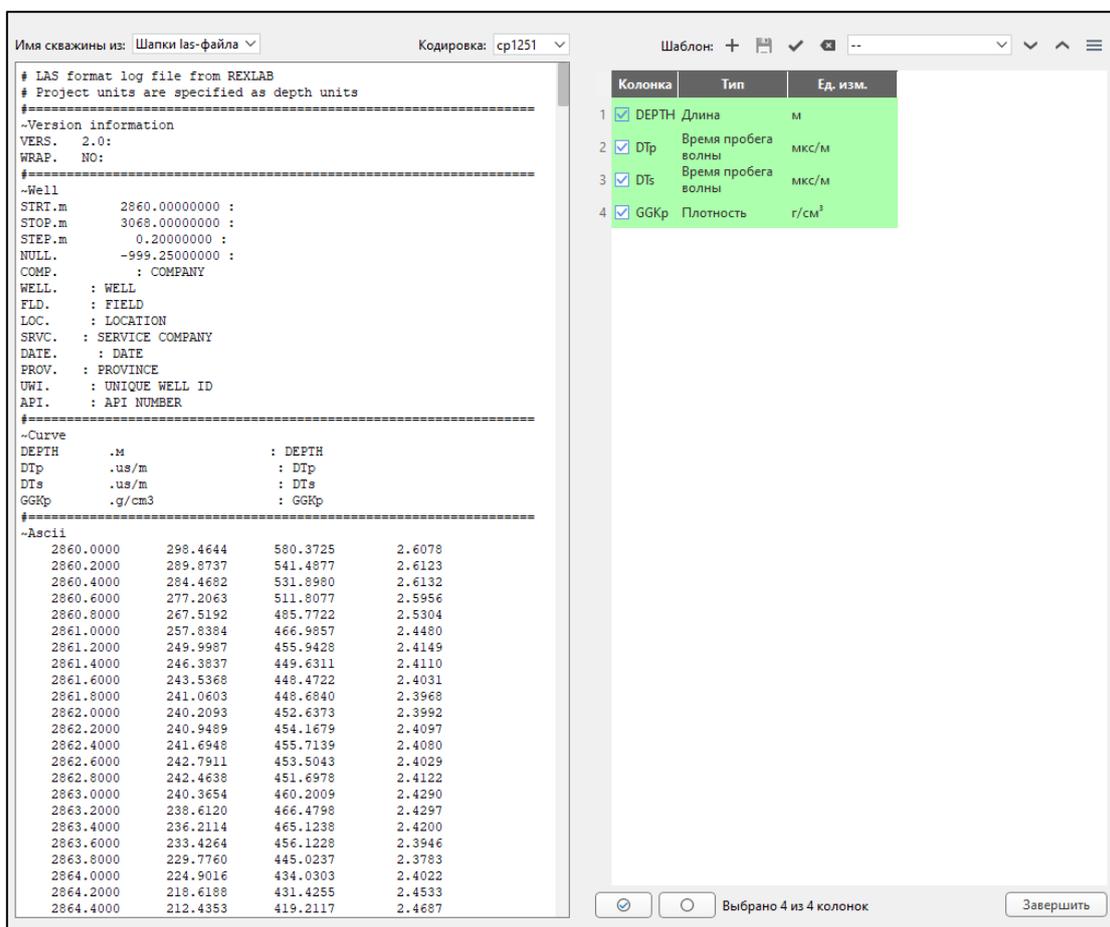


Рис. 1.11

Для каждого из загруженных файлов в элементе ГИС создается отдельный элемент набор данных, который, в свою очередь, состоит из элементов загруженных данных.

Загрузка точечных данных

Точечные данные – это элемент для загрузки и хранения данных, записанных в нерегулярных точках по глубине. Главное отличие точечных данных от данных ГИС – это невозможность их интерполяции на другие точки. Другое не менее важное отличие заключается в том, что в одной точке может храниться более одного значения (вектор). В *приложении* реализованы два специальных вида точечных данных векторного типа: *Керновые данные* и *Ориентация трещин*.

Для загрузки наборов точечных данных необходимо воспользоваться пунктом *Импортировать* → *Импортировать точечные данные* контекстного меню элемента *Скважина* (рис. 1.12). Можно также воспользоваться пунктом *Импортировать точечные данные* контекстного меню элемента *Точечные данные* (рис. 1.13).

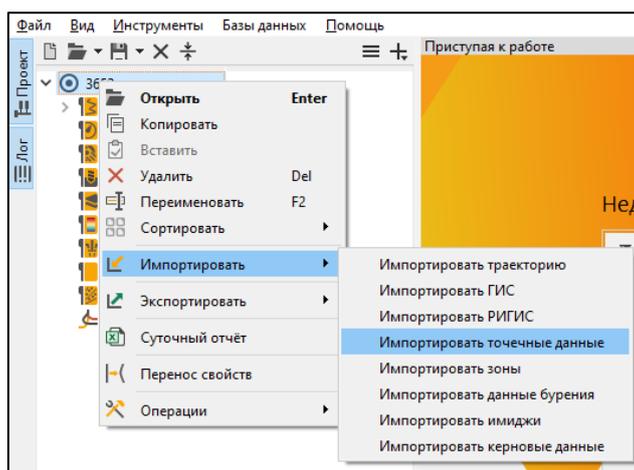


Рис. 1.12

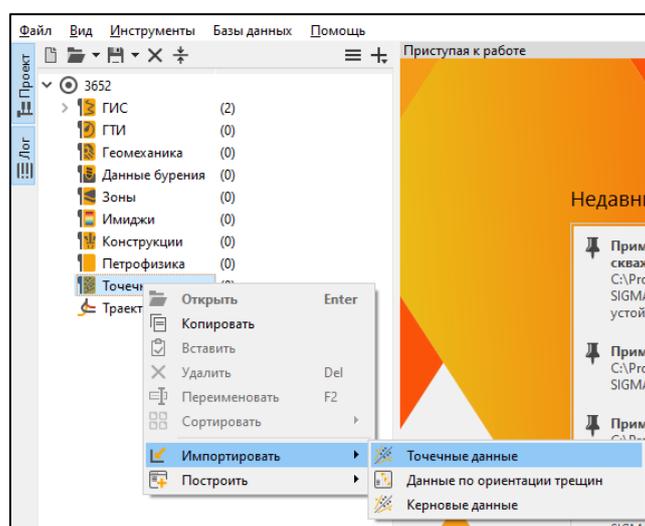


Рис. 1.13

В папке *Тестовые данные* → *1. Опорная скважина* → выбрать файлы *3652_P_DRILL_МПа.las*, *3652_P_XPT_МПа.las*.

Разбор загружаемого файла совершенно аналогичен разбору файлов данных ГИС (рис. 1.14, 1.15).

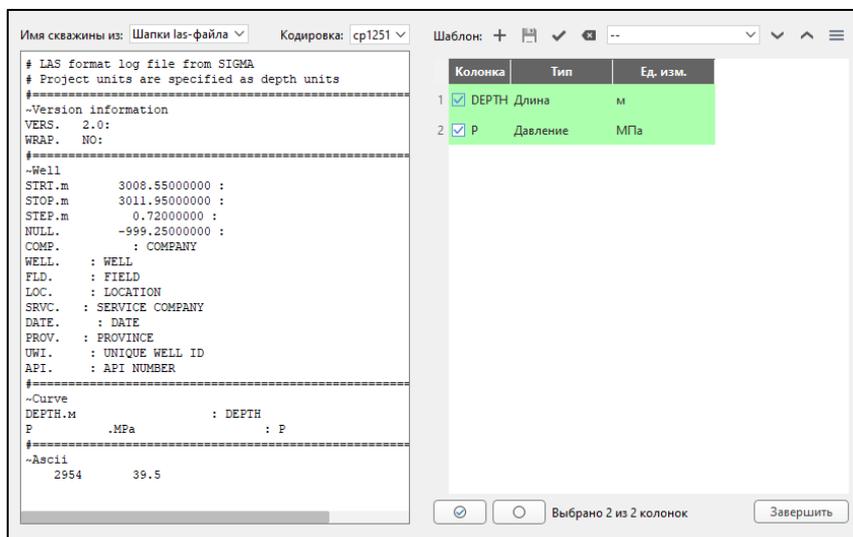


Рис. 1.14

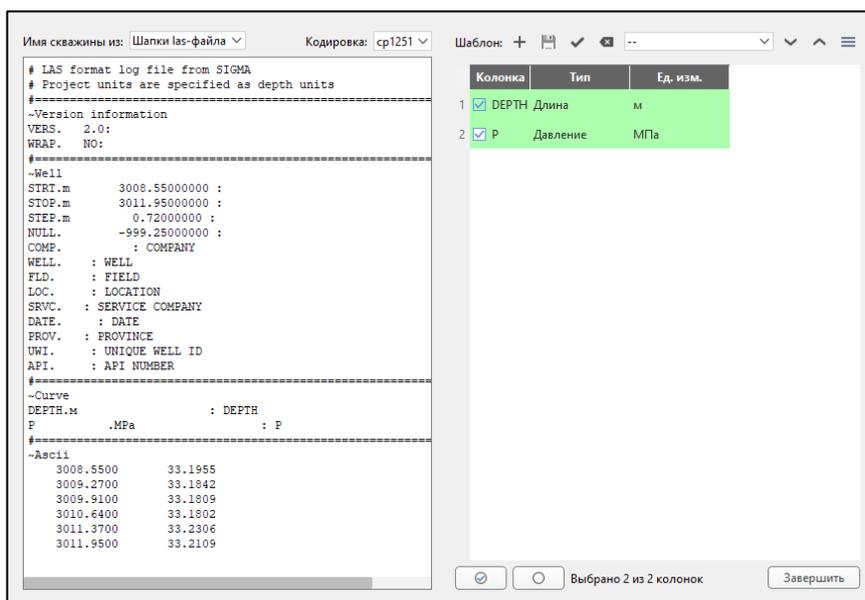


Рис. 1.15

После окончания разбора загружаемого файла необходимо завершить интерпретацию файла, нажав кнопку *Завершить*.

Загрузка стратиграфических отбивок

Стратиграфические отбивки или зоны – это специфические данные, определяющие принадлежность горных пород, через которые

проходит скважина, определенному геологическому периоду или выделенному пласту. Зоны позволяют применять различные способы расчета для различных интервалов скважины по глубине.

Для загрузки наборов точечных данных необходимо воспользоваться пунктом **Импортировать** → **Импортировать зоны** контекстного меню элемента **Скважина** (рис. 1.16). Можно также воспользоваться контекстным меню элемента зоны **Импортировать** → **Импортировать зоны из файлов** (рис. 1.17).

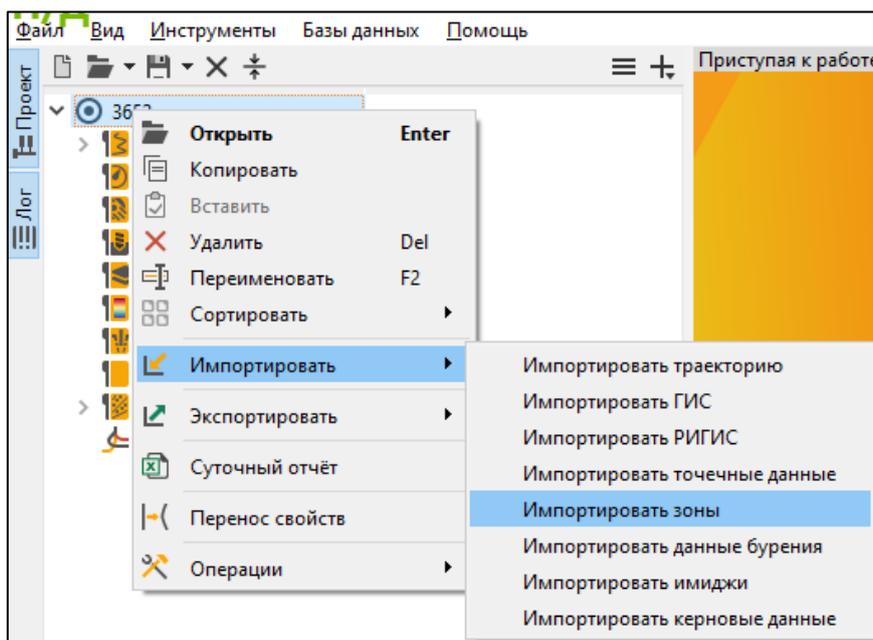


Рис. 1.16

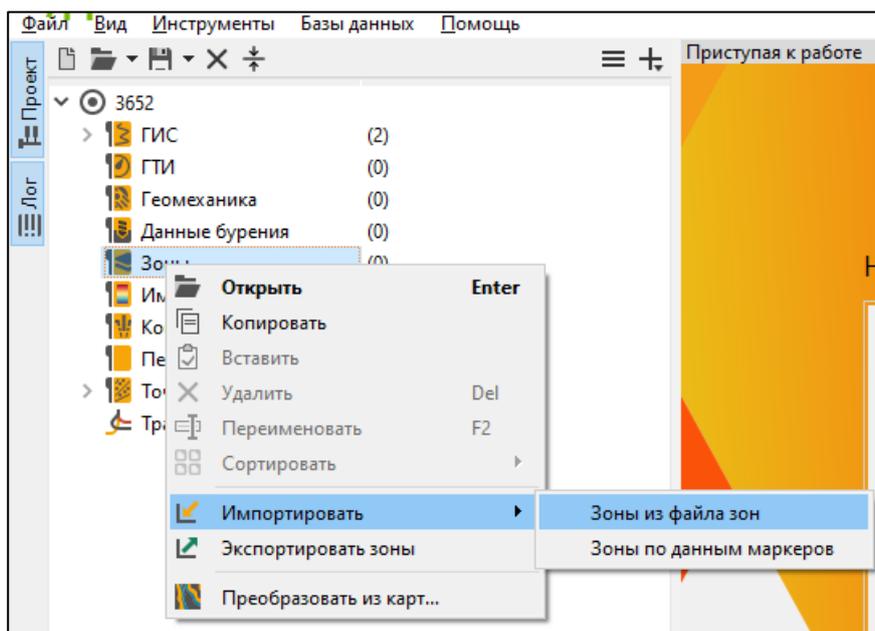


Рис. 1.17

Далее следует выбрать файл, содержащий информацию по зонам для данной скважины. *Приложение* позволяет загружать данные о зонах из файлов форматов *csv*, *txt*, *xls*, *xlsx*.

В папке *Тестовые данные* → *1. Опорная скважина* → выбрать файл *3652_zones.xlsx*.

Появится окно загрузки данных (рис. 1.18). Формат записи зон в файле должен быть строго определенным. В колонках должны быть последовательно записаны: название зоны, глубина вдоль ствола (MD) кровли зоны, глубина вдоль ствола (MD) подошвы зоны.

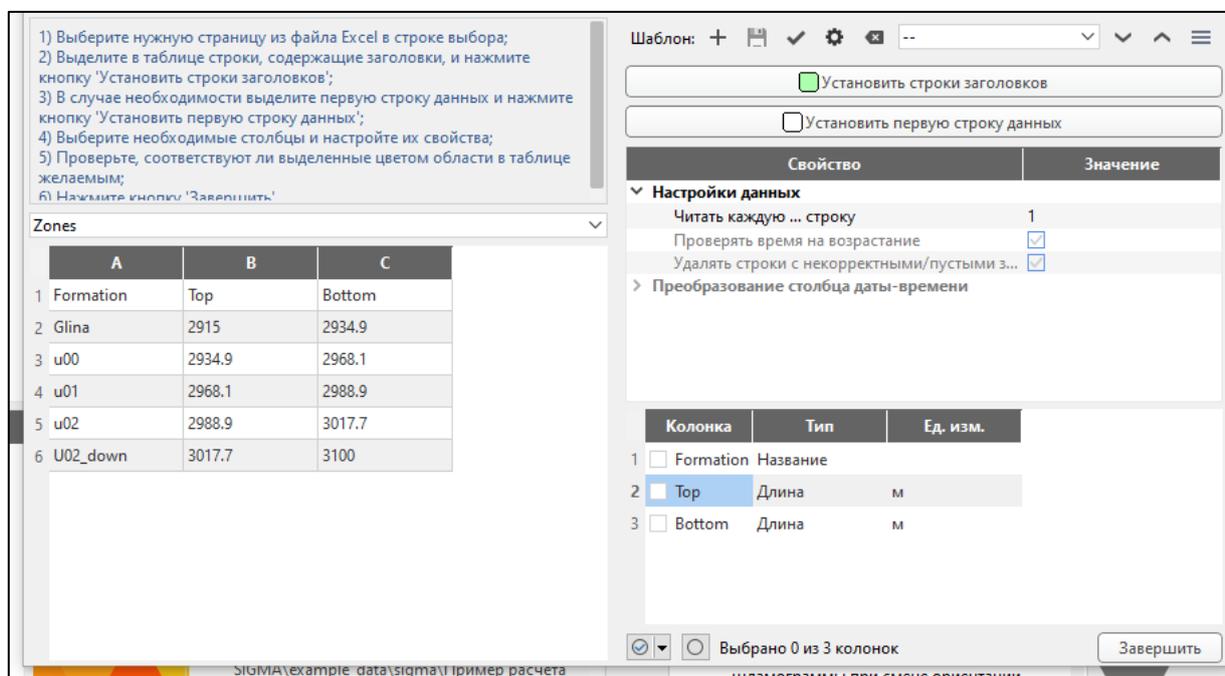


Рис. 1.18

После того как появится окно загрузки, необходимо установить заголовок, выделив его и нажав кнопку *Установить строки заголовков*. Строки заголовков будут выделены зеленым цветом (рис. 1.19). Далее в таблице необходимо задать типы и единицы измерения для каждой из колонок. Типы должны быть также строго фиксированы: *Название*, *Длина*, *Длина*.

После проверки единиц измерения и данных для загрузки нужно нажать *Завершить*.

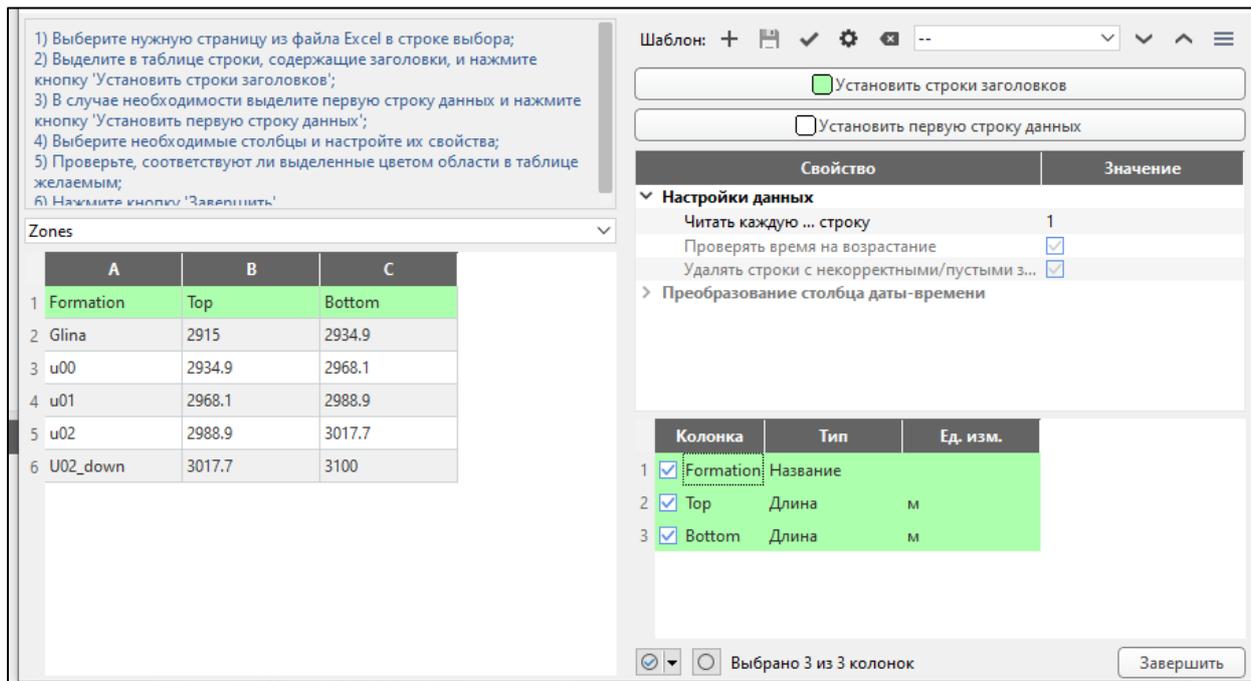


Рис. 1.19

Вопросы для самостоятельной работы

1. Что такое альтитуда скважины?
2. Что измеряют геофизическим методом АК?
3. Что такое инклинометрия?
4. Какую информацию отображают точечные данные, которые загрузили?
5. Что означают сокращения MD, TVD и TVDSS?

Лабораторная работа № 2

РАСЧЕТ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД

Порядок выполнения

1. Подготовка данных.
2. Расчет синтетической плотности.
3. Расчет геостатического (горного) давления.
4. Расчет порового (пластового) давления.

Подготовка данных

Для начала построения модели устойчивости ствола скважины в папке *Геомеханика* соответствующей скважины необходимо с помощью правой кнопки мыши в контекстном меню выбрать пункт *Добавить Устойчивость ствола* (рис. 2.1).

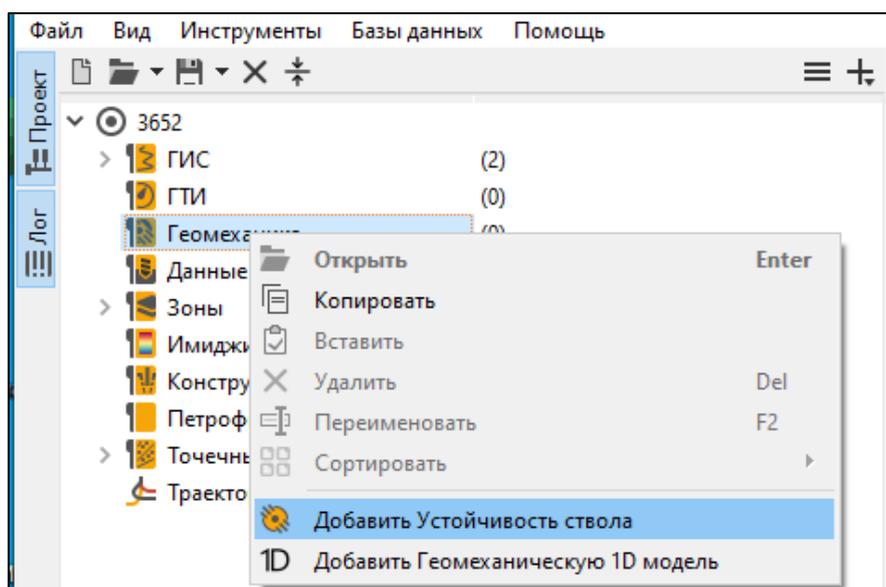


Рис. 2.1

Далее необходимо задать *Устье* (MD), *Забой* (MD) и *Шаг дискретизации* (рис. 2.2). Нажать **ОК**.

В папке *Геомеханика* появится элемент *УСС-1*. При двойном нажатии левой кнопки мыши на элементе появится окно *УСС* (рис. 2.3). В верхней части окна находится специфический только для этого окна элемент интерфейса: панель с кнопками-разделами.

Последовательность кнопок отображает последовательность шагов при построении геомеханической модели. Некоторые этапы построения являются обязательными, а некоторые этапы являются вспомогательными или служат для использования дополнительных (расширенных) возможностей при построении модели.

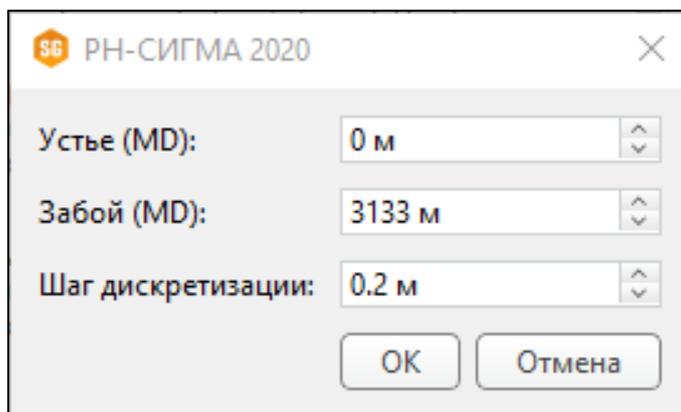


Рис. 2.2

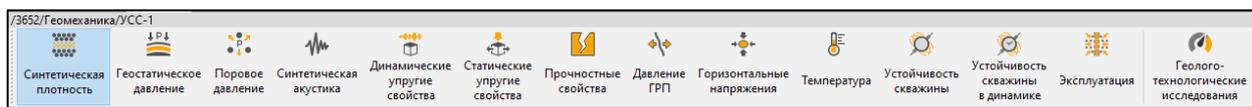


Рис. 2.3

Расчет синтетической плотности

Первым обязательным этапом для построения модели геомеханических свойств и напряжений является расчет синтетической объемной плотности пород. Необходимость этого этапа обусловлена тем, что интеграл плотности определяет величину горного давления – основного источника напряженного состояния породы. При этом практически не встречаются исследования профилей плотности пород, начинающиеся непосредственно с дневной поверхности. Это приводит к необходимости тем или иным способом восстанавливать плотность породы до уровня дневной поверхности на основании участков записанных исследований. В ПК «РН-СИГМА» предложены следующие методы расчета синтетической плотности:

- метод экстраполяции;
- осредненная плотность;
- метод Гарднера;

- плотность (константа);
- метод Миллера;
- эмпирическое соотношение Атосо;
- метод Трауготта.

Далее следует рассмотреть входные параметры, которые необходимо задать в методе *Экстраполяция* (рис. 2.4). В поле *Объемная плотность* осуществить выбор исходного элемента данных плотностного каротажа, добавить файл *PTL3652_AK_kopp/GGKp*. Также необходимо задать *глубины точек А* и *В* для экстраполяции плотности от устья до забоя вручную либо интерактивно с помощью мышки поместить точки на нужные глубины. Параметры *A0* и *Alpha* будут рассчитаны автоматически. Также этим параметрам можно присвоить собственные значения. В поле *Результирующая кривая* необходимо задать название для расчетного элемента данных синтетической плотности пород.

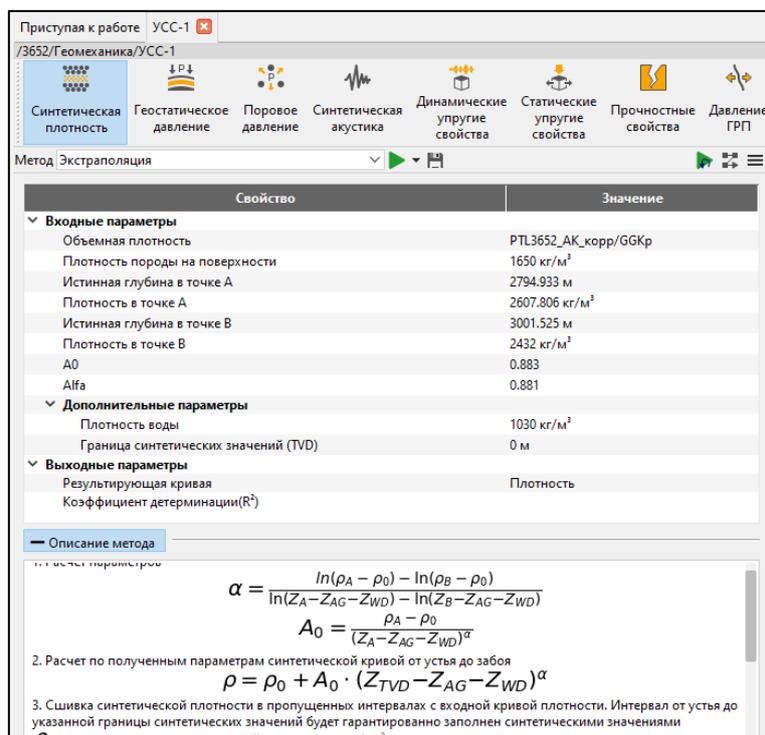


Рис. 2.4

Далее необходимо нажать кнопку *Рассчитать и сохранить* (рис. 2.5). После расчета добавить результаты расчета в *Менеджер рабочих процессов* .

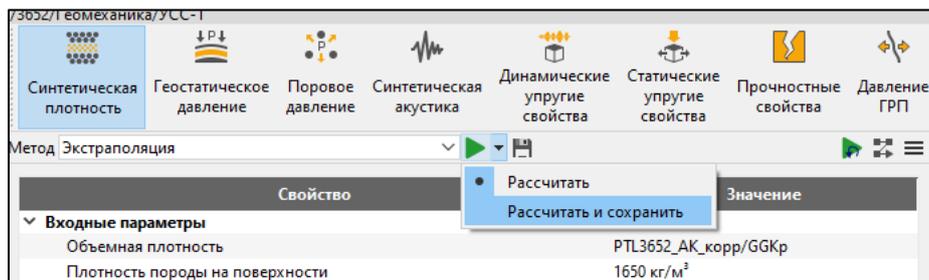


Рис. 2.5

Менеджер рабочих процессов

Рабочий процесс – это последовательность методов, которые можно сформировать и настроить на одной скважине, сохранить, а затем рассчитать на других скважинах. Настройка метода подразумевает задание имен входных кривых, выходных кривых и других параметров расчета метода. При расчете метода на конкретной скважине выполняется поиск каждой входной кривой по имени набора кривых и имени самой кривой. Поэтому необходимо, чтобы наборы кривых и сами кривые на скважинах для дальнейшего расчета имели те же имена, что и на скважине, на которой был сформирован рабочий процесс.

Чтобы открыть менеджер рабочих процессов, следует воспользоваться пунктом главного меню *Инструменты* → *Менеджер рабочих процессов*.

Расчет геостатического (горного) давления

Вторым обязательным этапом построения геомеханической модели 1D является расчет геостатического (горного) давления. Чтобы построить профиль геостатического давления, необходимо знать плотность горной породы от дневной поверхности до максимальной абсолютной глубины пласта H_{max} .

В ПК «РН-СИГМА» предложены три метода расчета геостатического (горного) давления (рис. 2.6):

- интеграл плотности;
- постоянный градиент;
- объединение кривых.

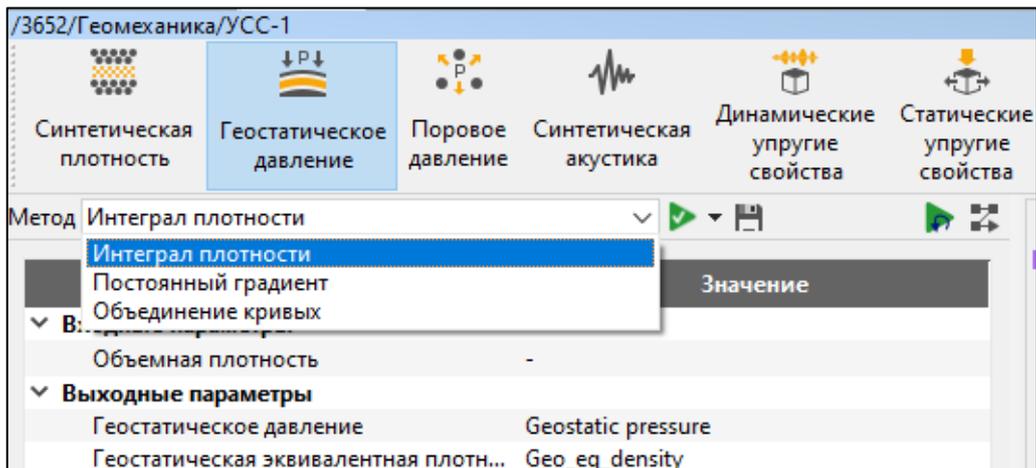


Рис. 2.6

При работе с проектом **3652** в разделе **Геостатическое давление** в окне методов выбираем метод расчета **Интеграл плотности**. В нижней части окна дано описание данного метода (рис. 2.7). Этот метод выполняет численный расчет горного давления σ_V как интеграла от профиля плотности вышележащих пород $\rho(z)$. Для этого требуется задать профиль плотности от устья до требуемой глубины. В противном случае расчет не будет выполнен.

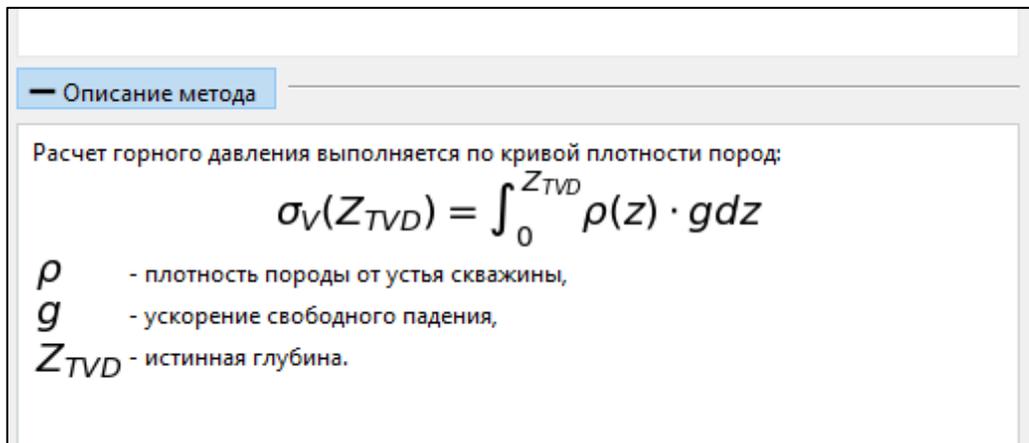


Рис. 2.7

После выбора метода расчета в появившемся окне необходимо задать входные параметры. Во входных параметрах подгружается информация, рассчитанная ранее в разделе **Синтетическая плотность**, а именно **УСС-1/Плотность**. В выходных параметрах необходимо переименовать кривую **геостатическое давление**, кривую **геостатическая эквивалентная плотность** можно оставить без изменений (рис. 2.8).

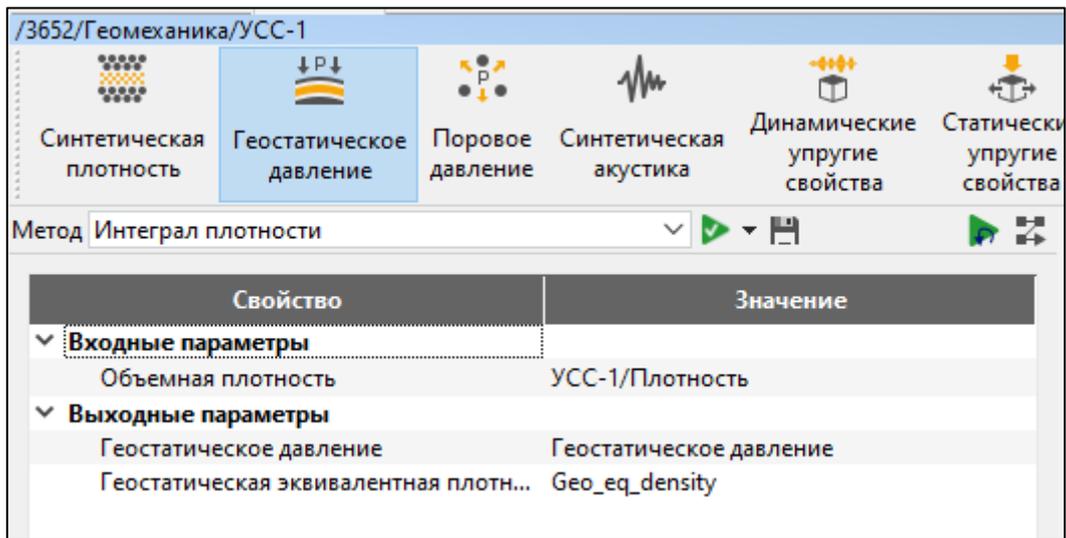


Рис. 2.8

После этого нажать **Рассчитать и сохранить** и добавить результаты расчетов в **рабочий процесс**.

На выходе по результатам расчета (рис. 2.9) должны получить в дереве проекта в папке **ГИС** → **УСС-1** → **Геостатическое давление** (**Геостатическое давление**) и **Геостатическая эквивалентная плотность** (**Geo_eq_density**).

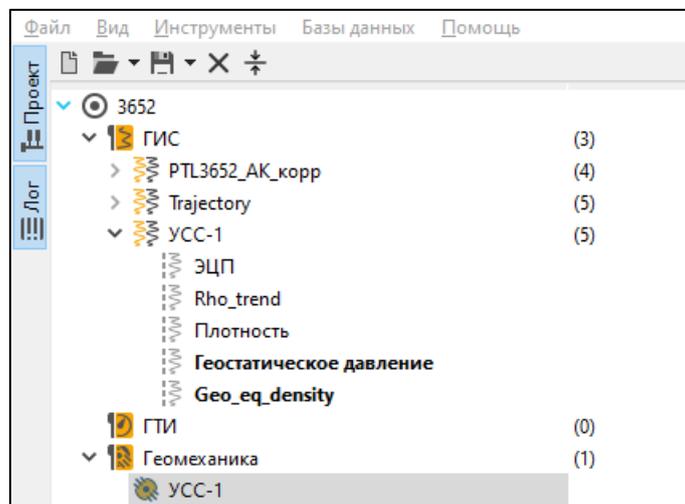


Рис. 2.9

Расчет порового давления

Третьим обязательным этапом построения геомеханической модели 1D является расчет порового (пластового) давления. В проницаемых коллекторах поровое давление совпадает с пластовым. В непроницаемых пластах нет фильтрации жидкости

и пластовое давление не определено. Его необходимо рассчитать. Для расчета порового давления необходимо перейти в раздел **Поровое давление**.

В ПК «РН-СИГМА» предложены семь методов расчета порового (пластового) давления (рис. 2.10):

- с помощью геостатического давления;
- метод Итона;
- метод Бауэрса;
- с помощью постоянного градиента;
- с помощью интерполяции замеров плотности;
- метод объединения кривых;
- с расчетом по зонам и фациям.

При работе с проектом **3652** в разделе **Поровое давление** в окне методов выбрать метод расчета **Расчет по зонам и фациям** (см. рис. 2.10).

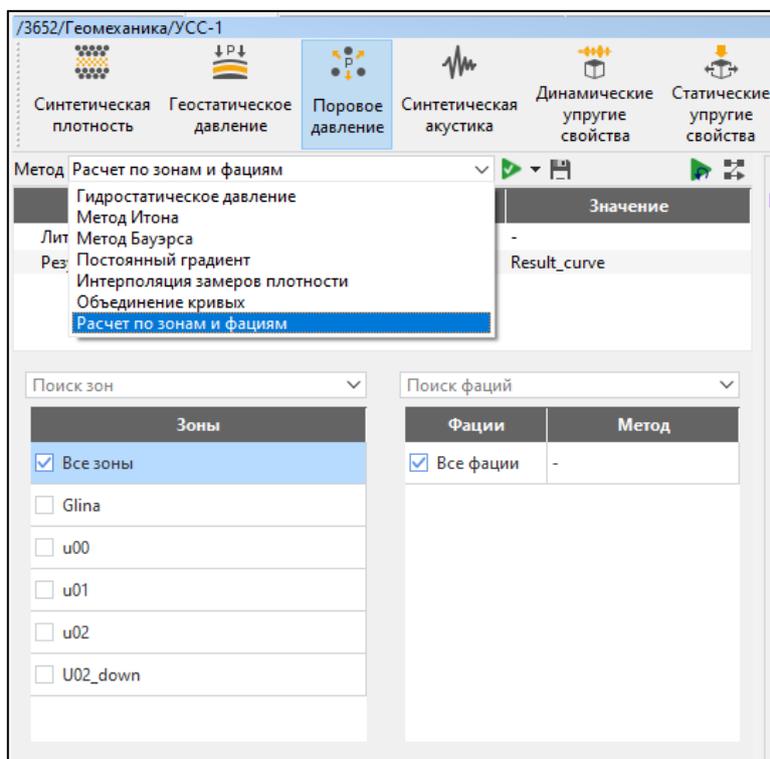


Рис. 2.10

Для корректного расчета порового (пластового) давления следует использовать точечные данные для калибровки модели. Для этого в дереве проекта в папке **Точечные данные** → **3652_P_DRILL_МПа**,

3652_P_XPT_MПа следует выбрать точечные замеры давления **P**, загруженные ранее. Захватить левой клавишей мыши точечные замеры **P** и перетащить их на планшет (рис. 2.11).

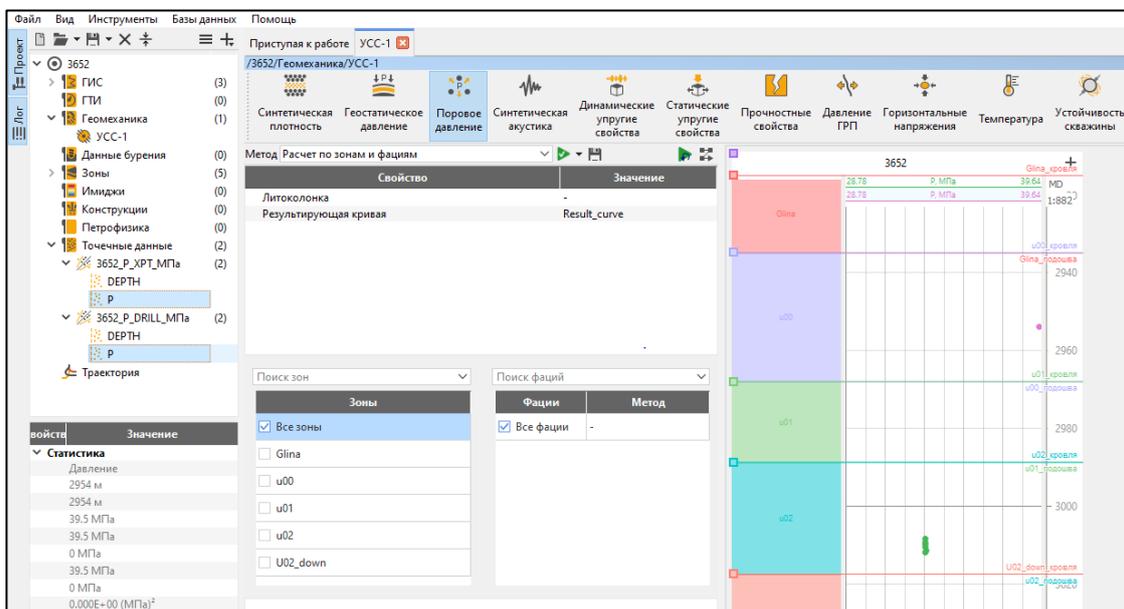


Рис. 2.11

На планшете в зонах **u00** и **u02** получим точечные данные порового давления для калибровки модели. Чтобы данные отображались корректно необходимо объединить диапазоны, чтобы шкалы давления имели одинаковые значения. Для этого на планшете нужно нажать правую клавишу мыши – выпадает окно с функцией **Объединить диапазоны** (рис. 2.12).

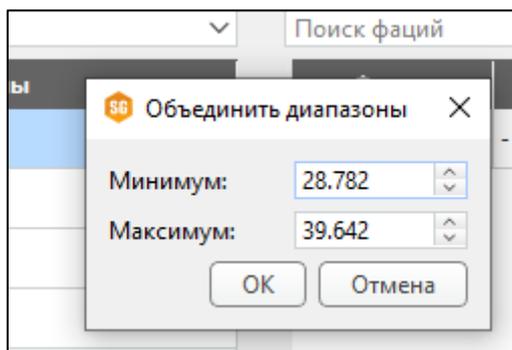


Рис. 2.12

Следующим этапом работ является заполнение данных для расчета. Для этого необходимо убрать галочку **Все зоны** и внести данные для каждой зоны отдельно.

Для этого нужно поставить галочки в следующем порядке.

1. *Glina* → *Все фации* → *метод Гидростатическое давление*.

2. *u00* → *Все фации* → *метод Постоянный градиент*. Так как есть точечный замер порового (пластового) давления, градиент давления поставить 0,01 МПа/м. В настройках оси установить галочкой глубину по TVD. Определить опорную глубину точки *u00* – 2888 м и опорное значение порового давления – 39,5 МПа.

3. *u02* → *Все фации* → *метод Постоянный градиент*. Так как есть точечные замеры порового (пластового) давления, градиент давления поставить 0,01 МПа/м. Определить опорную глубину второй точки *u00* – 2943 м и опорное значение порового давления – 33,184 МПа.

4. *u01* → *Все фации* → *метод Постоянный градиент*. Точечных замеров порового (пластового) давления нет. Но по имеющимся у нас данным известно, что для зоны *u01* данные совпадают с зоной *u02*. Поэтому данные для расчета в зоне *u01* следует взять как в зоне *u02*. Градиент давления поставить 0,01 МПа/м. Определить опорную – 2943 м и опорное значение порового давления – 33,184 МПа.

5. *U02_down* → *Все фации* → *метод Постоянный градиент*. Точечных замеров порового (пластового) давления нет. Но по имеющимся у нас данным известно, что для зоны *U02_down* данные совпадают с зоной *u02*. Поэтому данные для расчета в зоне *U02_down* нужно взять как в зоне *u02*. Градиент давления поставить 0,01 МПа/м. Определить опорную – 2943 м и опорное значение порового давления – 33,184 МПа.

После этого нажать кнопку *Рассчитать и сохранить* и добавить результаты расчетов в *рабочий процесс*.

В дереве проекта в папке *ГИС* → *УСС-1* появляется результаты расчетов – *Поровое давление*. Входные параметры и результаты расчета отобразятся на планшете (рис. 2.13). Нажать правую клавишу мыши – выбрать функцию *Объединить диапазоны*. Завершить калибровку модели по точечным данным.

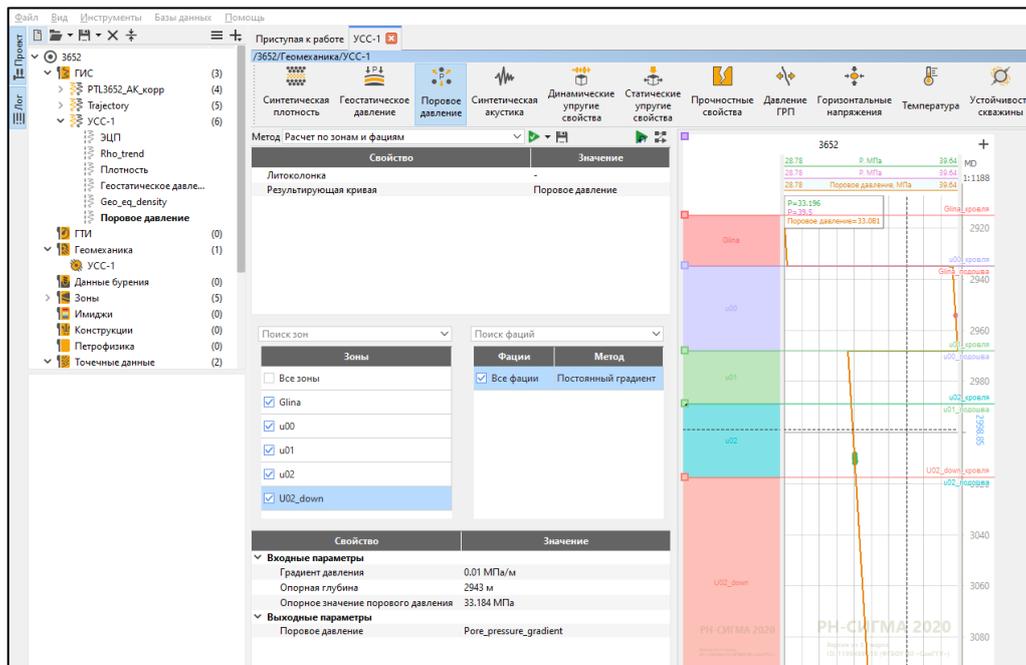


Рис. 2.13

Вопросы для самостоятельной работы

1. Что такое геостатическое давление?
2. Как влияет геостатическое давление на бурение скважины?
3. Что такое поровое и пластовое давление?
4. Что такое фации?
5. Как влияет поровое (пластовое) давление на бурение скважины?

Лабораторная работа № 3

РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОД

Порядок выполнения

1. Обзор раздела синтетическая акустика.
2. Расчет динамического модуля Юнга и динамического коэффициента Пуассона.
3. Расчет статического коэффициента Пуассона.
4. Расчет пороупругости.

Расчет синтетической акустики

Расчет синтетической акустики не является обязательным при работе с проектом **3652**. Он необходим только в случае, когда не проведены геофизические акустические исследования скважины. В проекте **3652** имеются необходимые геофизические данные акустического каротажа – интервального времени пробега продольных **DTP** и поперечных волн **DTS**.

В случае отсутствия данных акустического каротажа в ПК «РН-СИГМА» (рис. 3.1) можно воспользоваться эмпирическими уравнениями и корреляциями для расчета интервального времени пробега продольной и поперечной волны (**DTP** и **DTS**).

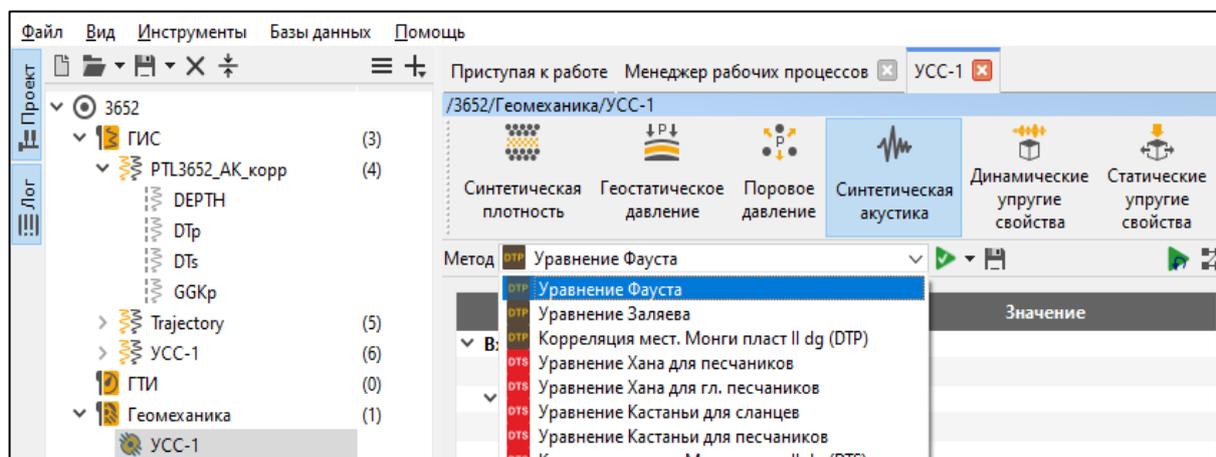


Рис. 3.1

Расчет динамического модуля Юнга и динамического коэффициента Пуассона

Пятым обязательным этапом построения геомеханической модели 1D является расчет динамических упругих свойств. Для расчета динамических упругих свойств горной породы необходимо перейти в раздел *Динамические упругие свойства*.

Расчет динамических упругих свойств выполняется по данным акустического каротажа. В отсутствие результатов акустических исследований можно воспользоваться методами получения синтетических профилей в разделе *Синтетическая акустика*.

В ПК «РН-СИГМА» предложен метод *Расчет из интервальных скоростей звука* и *Эмпирические корреляции*. В случае проекта 3652 используем метод *Расчет из интервальных скоростей звука* по данным загруженных ранее каротажей (рис. 3.2).

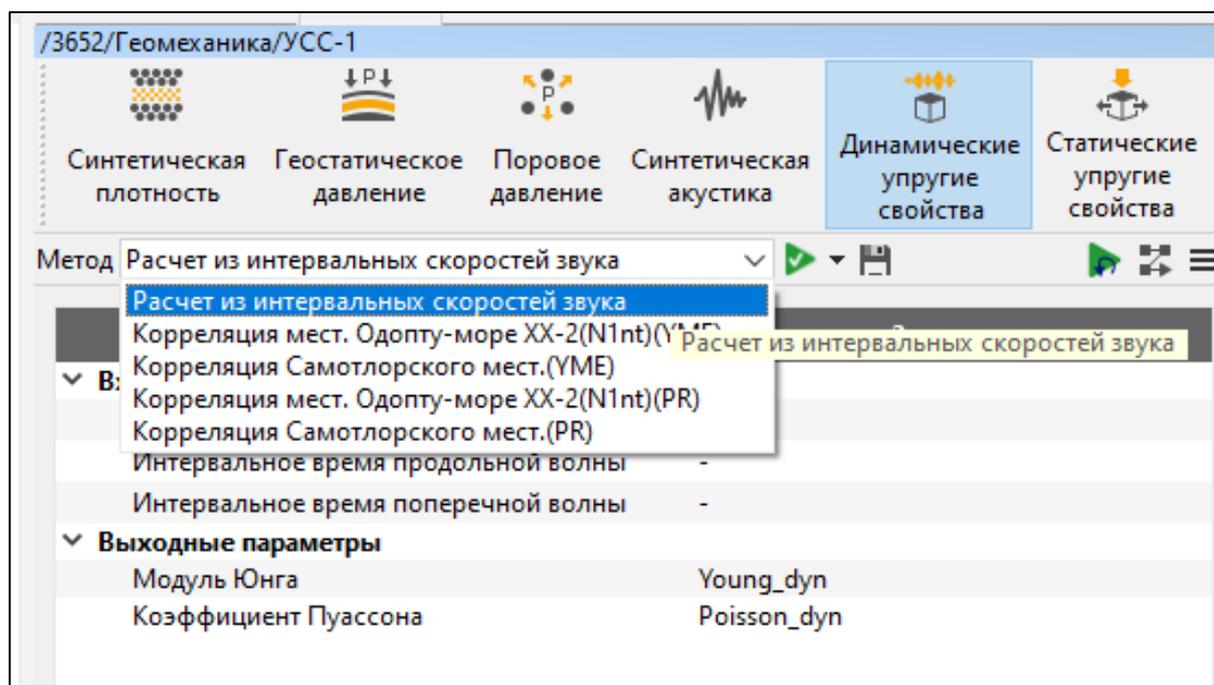


Рис. 3.2

Для данного метода заполнить *Входные параметры*.

Плотность пород → PTL3652_AK_корр/GGКр.

Интервальное время продольной волны → PTL3652_AK_корр/DТр.

Интервальное время поперечной волны →

PTL3652_AK_корр/DTs (рис. 3.3).

Для удобства необходимо переименовать выходные параметры: *Модуль Юнга динамический* и *коэффициент Пуассона динамический* (см. рис. 3.3).

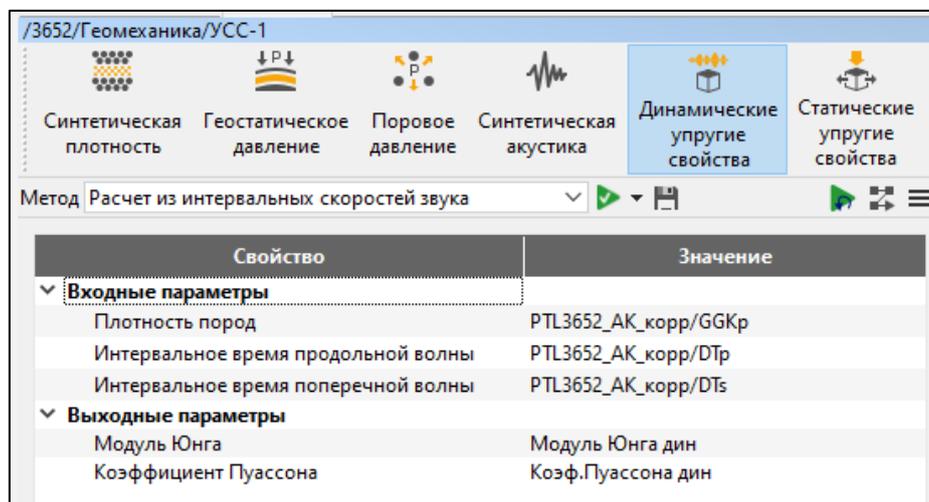


Рис. 3.3

После того как заполнены все необходимые поля, нажать **Рассчитать и сохранить** и добавить результаты расчетов в **рабочий процесс**.

В дереве проекта в папке **ГИС** → **УСС-1** появятся результаты расчетов – *динамический модуль Юнга (Модуль Юнга дин)* и *динамический коэффициент Пуассона (Коэф. Пуассона дин)*. Входные параметры и результаты расчета отобразятся на планшете. Также дополнительно можно рассчитать модуль сдвига *Shear_dyn* и модуль объемного сжатия *Bulk_dyn* (рис. 3.4).

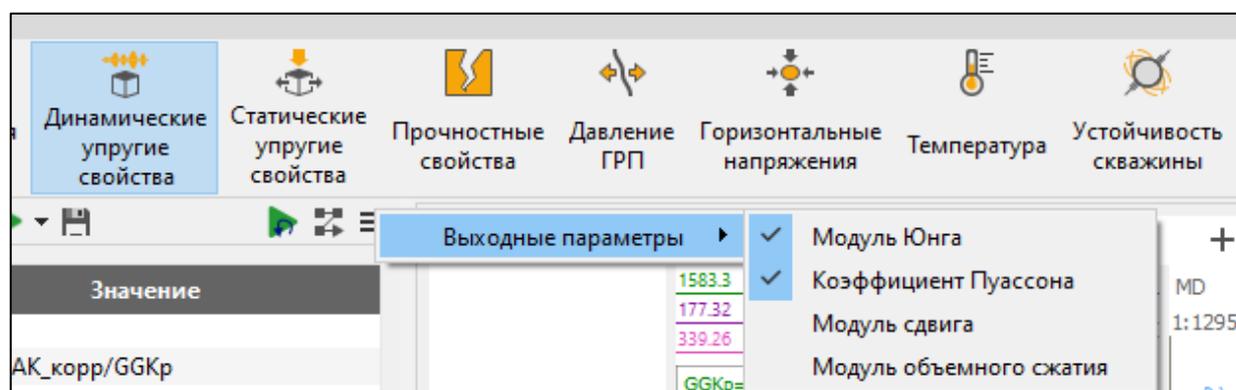


Рис. 3.4

Расчет статического коэффициента Пуассона

Шестой обязательный этап построения геомеханической модели 1D – это расчет статических упругих свойств. Для расчета статических упругих свойств горной породы необходимо перейти в раздел **Статические упругие свойства**. Расчеты статического модуля Юнга E_{st} , статического коэффициента Пуассона ν_{st} и коэффициента пороупругости α выполняются по известным корреляционным зависимостям. Методы представляют корреляции, построенные по различным месторождениям.

Для расчета коэффициента Пуассона выбрать метод **Коэффициент Пуассона (линейн. завис-ть)**. На вход подается ранее рассчитанная кривая → **УСС-1/Коэф. Пуассона дин.** Применить эмпирическую константу – **0,91**.

На выходе должны получить **Статический коэффициент Пуассона** (рис. 3.5). После этого нажать кнопку **Рассчитать и сохранить** и добавить результаты расчетов в **рабочий процесс**.

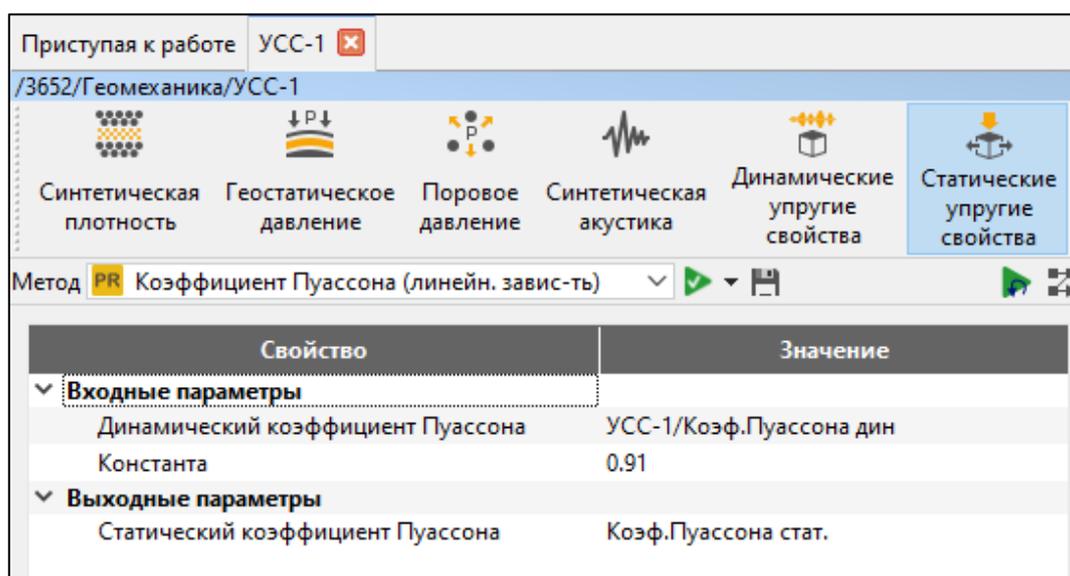


Рис. 3.5

Расчет пороупругости

Пороупругость рассчитывается в разделе **Статические упругие свойства**, метод **Пороупругость (константа)** – **0,9** (эмпирическая величина) (рис. 3.6).

После этого нажать кнопку **Рассчитать и сохранить** и добавить результаты расчетов в **рабочий процесс**.

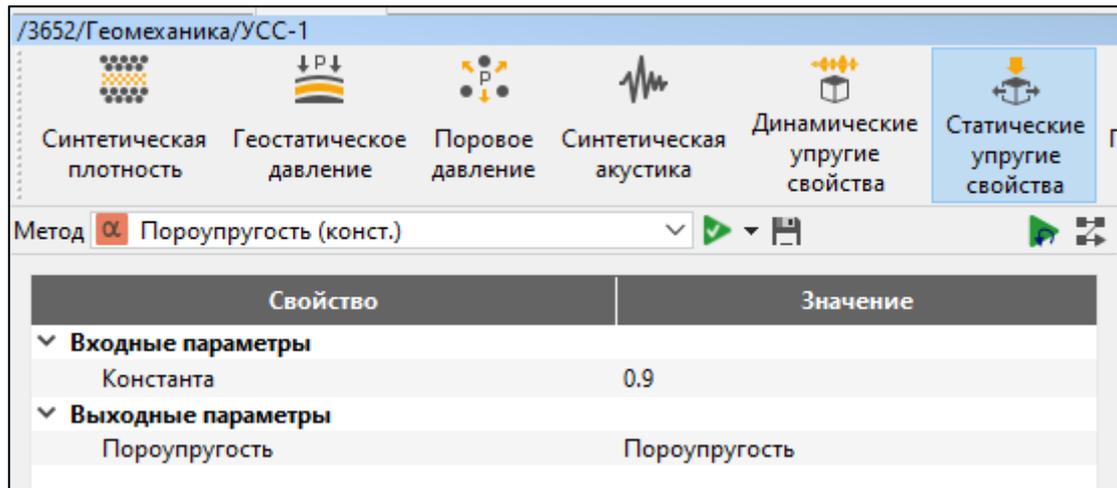


Рис. 3.6

Вопросы для самостоятельной работы

1. Что такое модуль Юнга и коэффициент Пуассона?
2. Чем отличаются статический коэффициент Пуассона от динамического?
3. Какие ГИС нужны для расчета динамического модуля Юнга и коэффициента Пуассона?
4. Что такое пороупругость?
5. Что такое эмпирическая корреляция?

Лабораторная работа № 4

РАСЧЕТ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ СВОЙСТВ ПОРОД

Порядок выполнения

1. Добавление и редактирование корреляции.
2. Расчет статического модуля Юнга.
3. Импорт корреляции.
4. Расчет предела прочности на сжатие.

Добавление и редактирование корреляции

В проекте **3652** необходимо создать собственные корреляции. Произвести восстановление статического модуля Юнга через динамический модуль Юнга. Для этого нужно зайти на вкладку **Инструменты** → **Специальные** → **Редактор корреляций** (рис. 4.1).

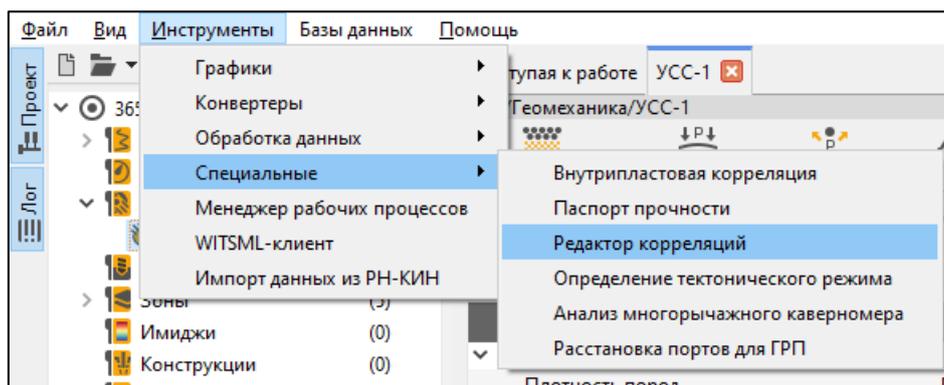


Рис. 4.1

Редактор корреляций

Редактор корреляций предназначен для ввода пользовательских формул для зависимостей, которых нет в *приложении*. После сохранения пользовательской корреляции и установки галочки **Показать в модуле УС** зависимость попадает в базу корреляций и становится доступна в качестве метода расчета в соответствующем разделе окна по расчету устойчивости.

Корреляции распределены по разделам окна расчета устойчивости за исключением разделов *Устойчивость скважины*,

Устойчивость скважины в динамике и Эксплуатация. Добавлять корреляции в эти разделы нельзя. Раздел можно выбрать в выпадающем списке, выбрать **Статические упругие свойства** и добавить новую корреляцию (рис. 4.2).

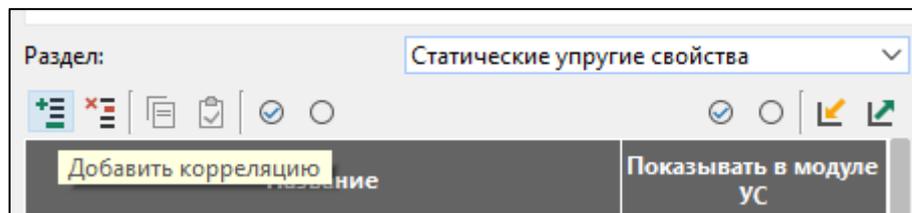


Рис. 4.2

Данные для создания корреляции взять из файла *Corellations Est.txt* в папке опорная скважина. Записать корреляцию как **Модуль Юнга_ПТЛ**. В таблицу *Входные кривые* внести название переменной *Edyn*, выбрать тип (**модуль Юнга**), единицу измерения – **ГПа**. Далее внести значения для констант, в разделе выходные кривые название переменной – *Est*, тип (**модуль Юнга**), единицу измерения – **ГПа**.

Прописать скрипт $Est = const1 * Edyn + const2$. Протестировать скрипт (рис. 4.3).

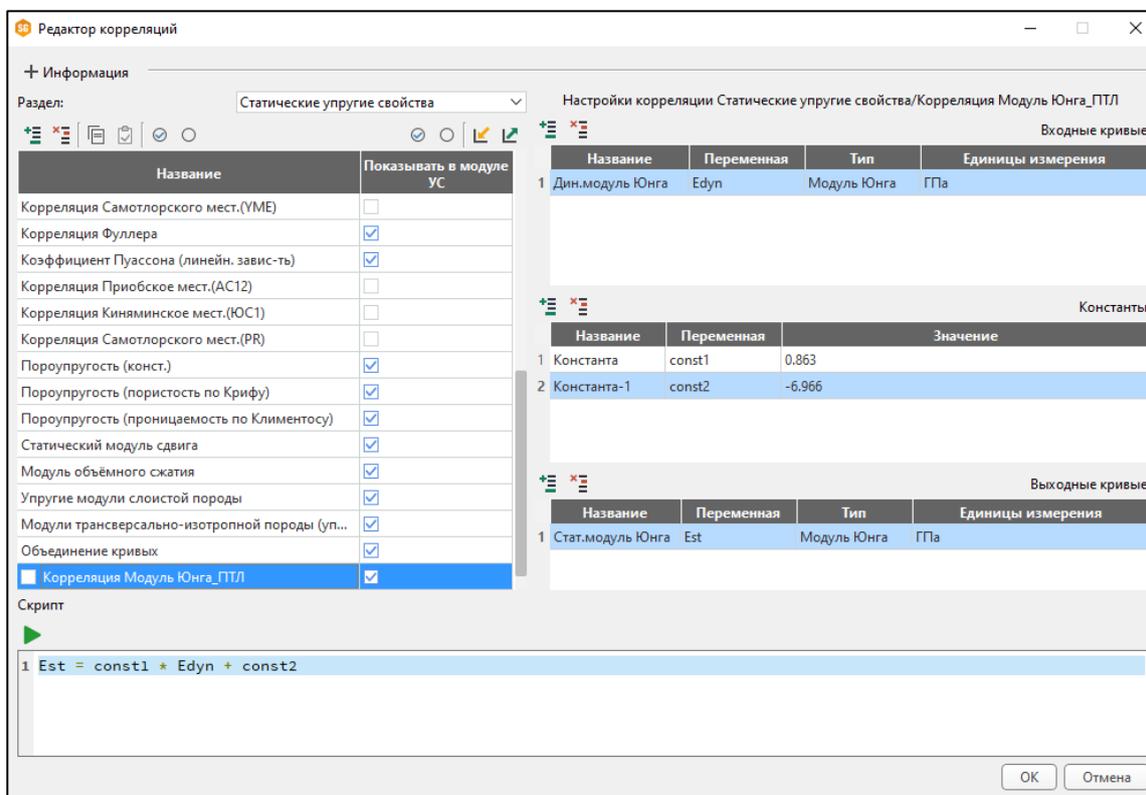


Рис. 4.3

Аналогично добавляется вторая корреляция, называть ее *Модуль Юнга_Элхам*. Данные для создания корреляции взять из файла *Corellations Est.txt*.

Проверить наличие пользовательских корреляций *Модуль Юнга_ПТЛ* и *Модуль Юнга_Элхам* в методах раздела *Статические упругие свойства* с их описанием (рис. 4.4).

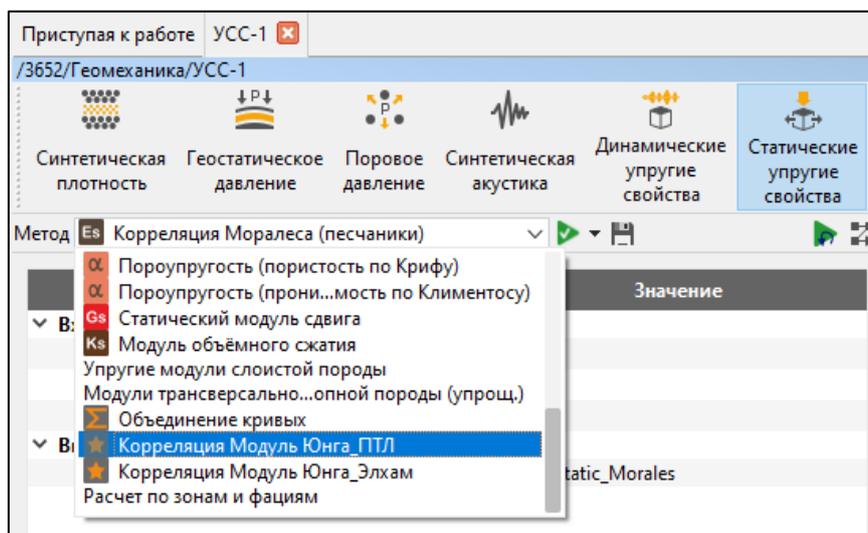


Рис. 4.4

Расчет статического модуля Юнга

Шестой обязательный этап построения геомеханической модели 1D – это расчет статических упругих свойств. Для расчета статических упругих свойств горной породы необходимо перейти в раздел *Статические упругие свойства*. Расчеты статического модуля Юнга E_{st} , статического коэффициента Пуассона ν_{st} и коэффициента пороупругости α выполняются по известным корреляционным зависимостям. Методы представляют корреляции, построенные по различным месторождениям. На данном этапе в разделе метод выбрать *Расчет по зонам и фациям*. Результирующую кривую переименовать *Модуль Юнга стат.*

Для каждой зоны выбрать нужную корреляцию.

1. *Glina* → *Все фации* → метод *Корреляция Модуль Юнга_Элхам*. Входные параметры → *УСС-1/ Модуль Юнга дин.*

2. Зона *u00* заполняется аналогично зоне *Glina* (рис. 4.5).

3. *u01* → *Все фации* → метод *Корреляция Модуль Юнга_ПТЛ*.
 Входные параметры → *УСС-1/Модуль Юнга дин*.

4. Зоны *u02*, *U02_down* заполняются аналогично зоне *u01*
 (рис. 4.6).

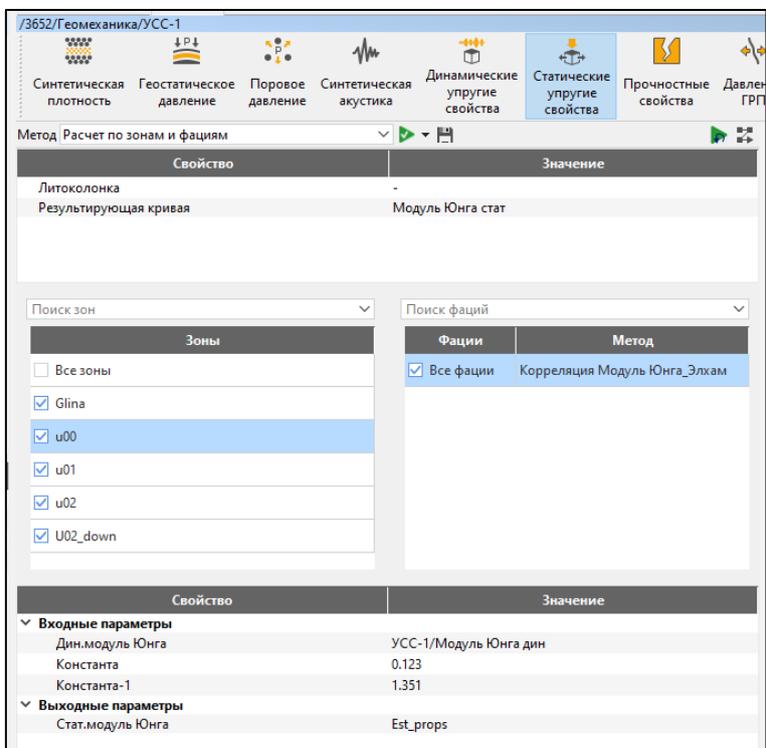


Рис. 4.5

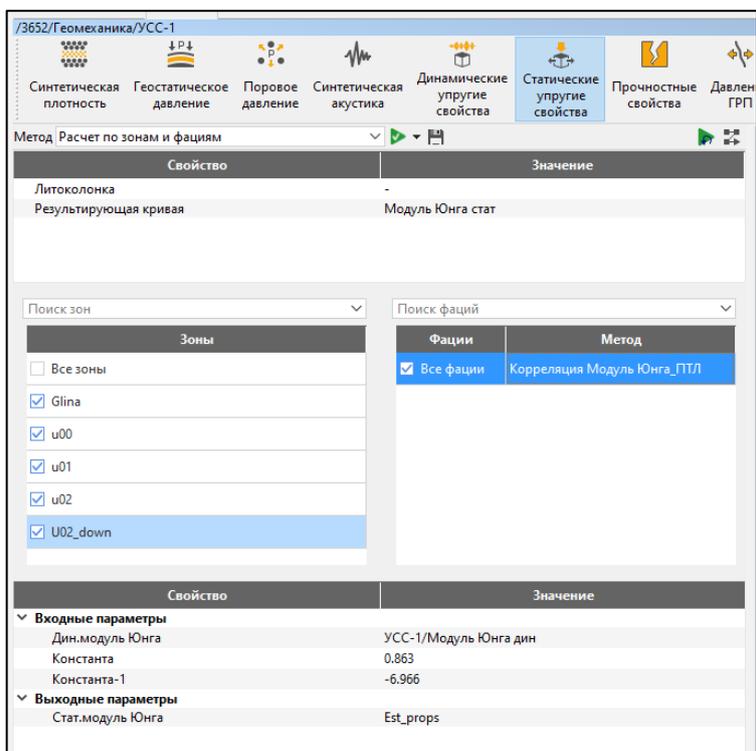


Рис. 4.6

После этого нажать кнопку **Рассчитать и сохранить** и добавить результаты расчетов в **рабочий процесс**.

Импорт корреляции

Для дальнейших расчетов необходимо снова воспользоваться готовой корреляцией, и чтобы ее импортировать, нужно открыть инструмент **редактор корреляций**, выбрать раздел **прочностные свойства**. Далее выбрать **импорт корреляции** → **опорная скважина** → **Correlations_all.h5**. Добавятся 2 корреляции **UCS (ПТЛ)**, **UCS_slm** (рис. 4.7).

Нажать **ОК**.

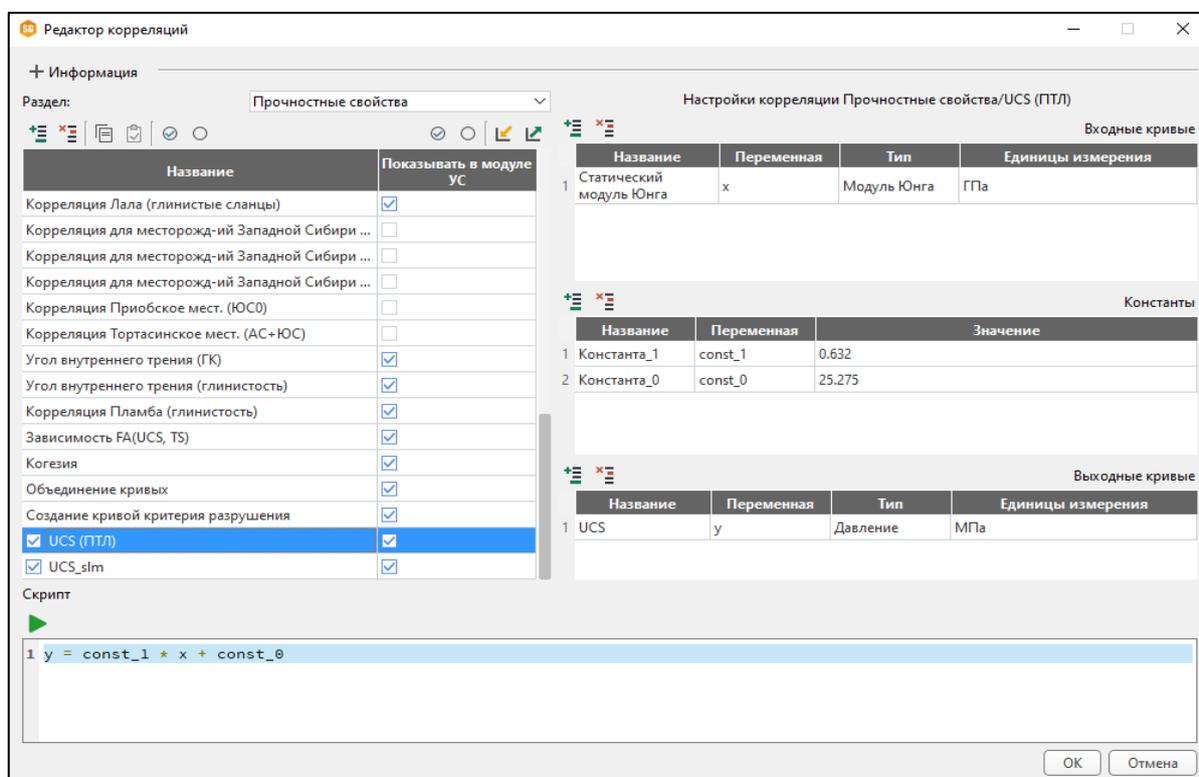


Рис. 4.7

Расчет предела прочности на сжатие

Седьмой обязательный этап построения геомеханической модели – это построение профилей прочностных свойств. Для расчета прочностных характеристик породы необходимо перейти в раздел **Прочностные свойства**, в методах должны быть отображены корреляции, которые вы ранее импортировали (рис. 4.8).

Для выполнения расчета предела прочности на сжатие следует зайти в методы и выбрать *Расчет по зонам и фациям*. Результирующую кривую переименовать *Предел прочности на сжатие*.

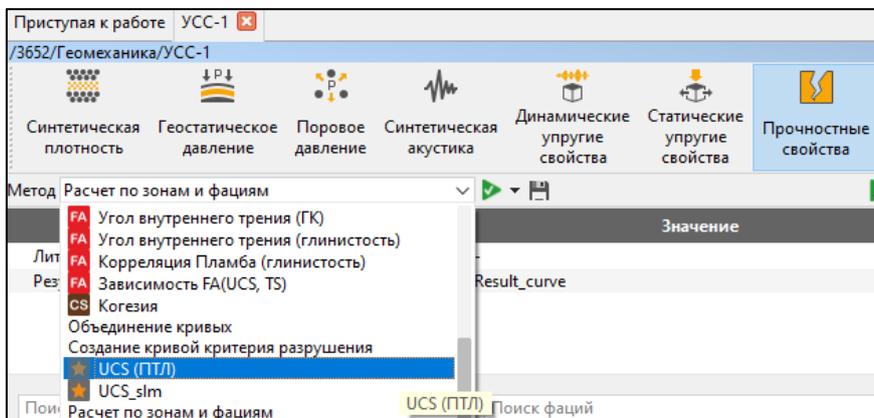


Рис. 4.8

Следующим этапом работ является заполнение данных для расчета. Для этого необходимо убрать галочку *Все зоны* и внести данные для каждой зоны отдельно.

Для этого поставить галочки в следующем порядке.

1. *Glina* → *Все фации* → *метод UCS_slm*. Входные параметры → *УСС-1/Модуль Юнга стат*.

2. *u00* заполняется аналогично зоне *Glina* (рис. 4.9).

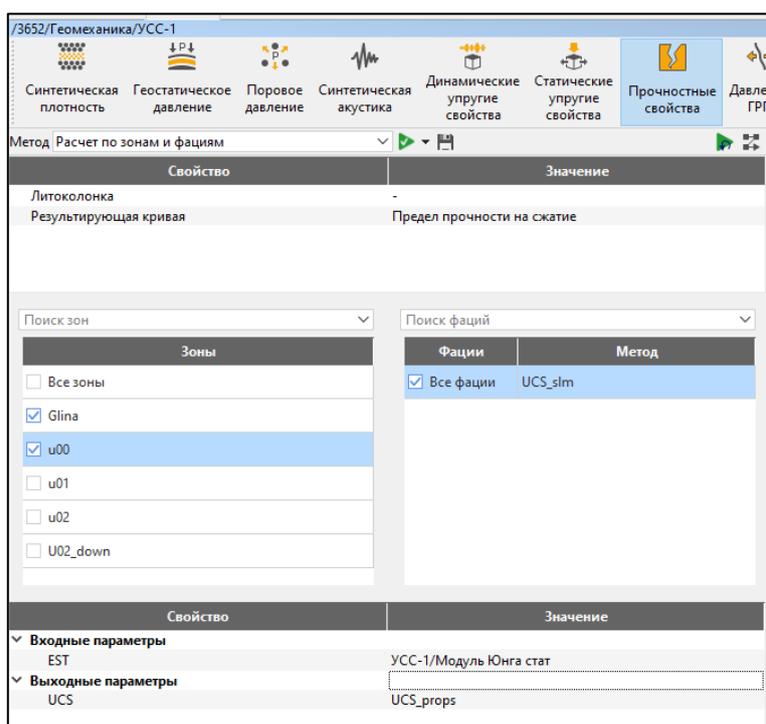


Рис. 4.9

3. *u01* → *Все фации* → *метод UCS (ПТЛ)*. Входные параметры → *УСС-1/Модуль Юнга стат.*

4. Зоны *u02*, *U02_down* заполняются аналогично зоне *u01* (рис. 4.10).

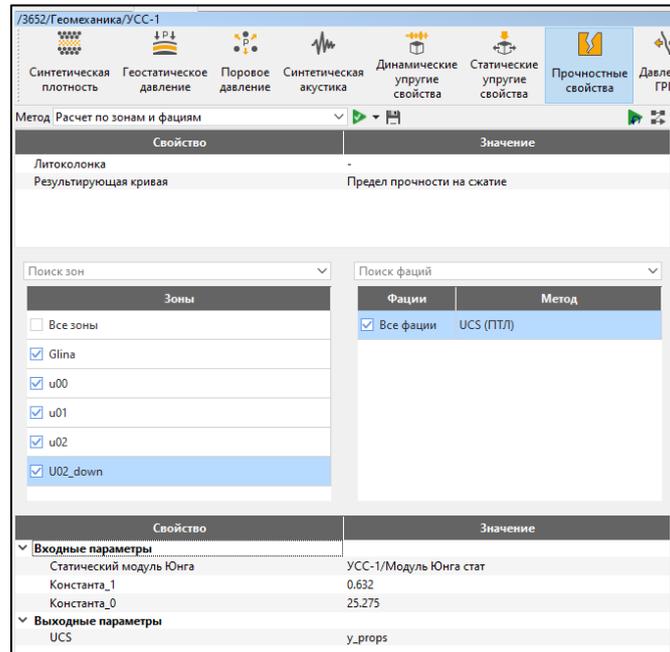


Рис. 4.10

После этого нажать кнопку *Рассчитать и сохранить* и добавить результаты расчетов в *рабочий процесс*.

Вопросы для самостоятельной работы

1. Чем отличаются статический модуль Юнга от динамического?
2. Какие корреляции применяются для терригенного разреза?
3. Какие корреляции применяются для карбонатного разреза?
4. Что такое скрипты, их назначение?
5. Какой язык программирования применяется при написании скриптов?

Лабораторная работа № 5

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОРОД

Порядок выполнения

1. Расчет угла внутреннего трения.
2. Расчет предела прочности на растяжение.
3. Расчет давления ГРП и поглощения жидкости в пласт.
4. Расчет минимального и максимального горизонтального напряжения.

Расчет угла внутреннего трения

Угол внутреннего трения – это один из параметров, определяющий устойчивость грунта к сдвигу. В проекте **3652** угол внутреннего трения определяется по корреляции Лала и считается по формуле (рис. 5.1).

Расчет угла внутреннего трения производится по формуле:

$$\psi = \arcsin\left(\frac{1 - \Delta t_p}{1 + \Delta t_p}\right)$$

ψ - угол внутреннего трения, град
 Δt_p - скорость пробега продольной волны, с/км

Рис. 5.1

Итак, в разделе **прочностные свойства** выбрать метод **Корреляция Лала (глинистые сланцы)**, переименовать выходную кривую **Угол внутреннего трения** и подгрузить кривую времени продольной волны.

После этого нажать кнопку **Рассчитать и сохранить** и добавить результаты расчетов в **рабочий процесс**.

Расчет предела прочности на растяжение

Следующим этапом расчета является определение такой характеристики, как предела прочности на растяжение. Выбрать раздел **Прочностные свойства**, метод **Линейная функция TS (UCS)**. Для расчета используется кривая **УСС-1/Предел прочности на сжатие**. Выходная кривая – **Предел прочности на разрыв** (рис. 5.2).

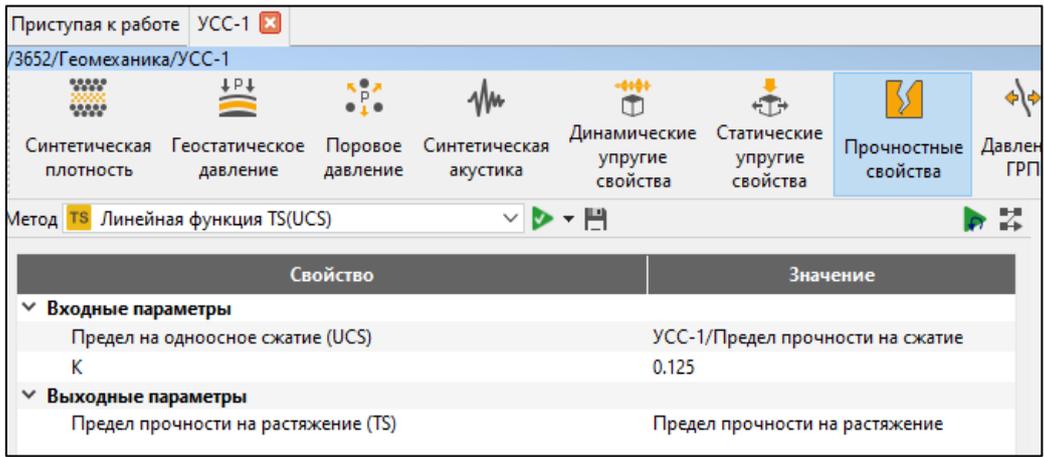


Рис. 5.2

После этого нажать кнопку **Рассчитать и сохранить** и добавить результаты расчетов в **рабочий процесс**.

Расчет давления ГРП и поглощения жидкости в пласт

Для расчета давления гидроразрыва пород необходимо перейти в раздел **Давление ГРП**. Оценка давления гидроразрыва необходима для определения, насколько нужно превысить давление в скважине, чтобы расклинить горную породу и получить в ней магистральную трещину. Расчет давления гидроразрыва выполняется по известным корреляционным зависимостям.

В поле **Метод** необходимо выбрать метод расчета для выбранного свойства. Основной метод расчета давлений ГРП – **Метод Итона** (рис. 5.3).

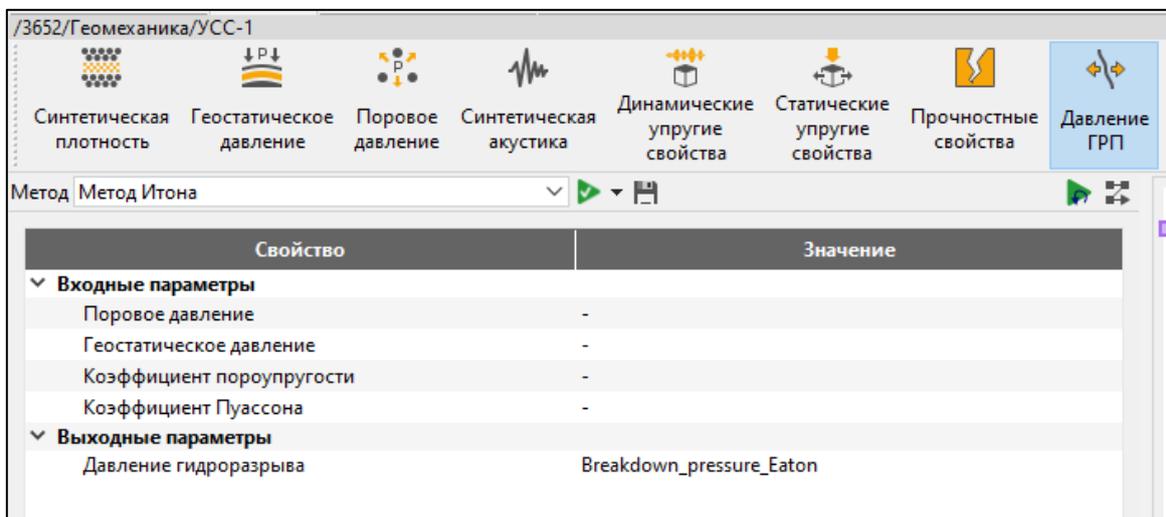


Рис. 5.3

Внести рассчитанные на предыдущих этапах значения *Порового давления, Геостатического давления, Пороупругости, Статического коэффициента Пуассона*, для удобства переименовать выходную кривую. Нажать *Рассчитать и сохранить* и добавить результаты расчетов в *рабочий процесс*. На выходе должны получить значения давления гидроразрыва Итона (рис. 5.4).

Далее необходимо провести расчет давления ГРП следующими методами:

- с помощью постоянного коэффициента (константа = 0,5);
- методом Итона – Дейниса (коэффициент $\beta = 0,3$);
- методом расчета давления начала поглощения;
- методом расчета по зонам и фациям (выбрать метод Итона).

Свойство	Значение
Входные параметры	
Поровое давление	УСС-1/Поровое давление
Минимальная горизонтальная деформация	5.6E-05
Максимальная горизонтальная деформация	7.3E-05
Геостатическое давление	УСС-1/Геостатическое давление
Статический модуль Юнга	УСС-1/Модуль Юнга стат
Статический коэффициент Пуассона	УСС-1/Козф.Пуассона стат.
Коэффициент пороупругости	УСС-1/Пороупругость
Выходные параметры	
Минимальное горизонтальное напряжение	Мин гор напряжение
Максимальное горизонтальное напряжение	Макс гор напряжение

Рис. 5.4

Нажать *Рассчитать и сохранить* и добавить результаты расчетов в *рабочий процесс*.

Вопросы для самостоятельной работы

1. Как влияют горизонтальные напряжения на стабильность ствола?
2. Что такое угол внутреннего трения?
3. Для чего проводятся тесты FIT, LOT и XLOT?
4. Как выгрузить расчетные данные давления гидроразрыва пласта в *Excel*?
5. Дать описание кривых минимального и максимального горизонтальных напряжений.

Лабораторная работа № 6

ПОСТРОЕНИЕ ОДНОМЕРНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Порядок выполнения

1. Расчет азимута регионального напряжения.
2. Расчет устойчивости ствола скважины.

Расчет азимута регионального напряжения

После расчетов минимального и максимального горизонтальных напряжений необходимо рассчитать *азимут регионального напряжения*. Выбрать раздел *Горизонтальные напряжения*, метод *Азимут регионального напряжения*. Значение константы -20° (рис. 6.1).

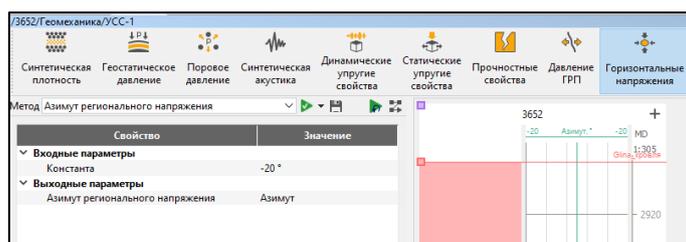


Рис. 6.1

Нажать *Рассчитать и сохранить* и добавить результаты расчетов в *рабочий процесс*. На выходе *Азимут*.

Расчет данных из раздела *Температура* – необязательный этап построения модели 1D. Оценивает термическое влияние породы.

Расчет устойчивости ствола скважины

Основной целью расчета устойчивости ствола скважины является построение окна безопасного бурения. Окном безопасного бурения называется диапазон давления бурового раствора (БР) или эквивалентной циркуляционной плотности (ЭЦП), при поддержании которых не происходит механических нарушений целостности ствола скважины. Основными характеристиками окна безопасного бурения являются следующие профили:

- критическое давление / плотность БР начала притока флюида в скважину;
- критическое давление / плотность БР обрушения стенки скважины;
- критическое давление / плотность БР начала поглощения поглощении;
- критическое давление / плотность БР гидроразрыва стенки скважины.

Выбрать метод **Расчет устойчивости ствола скважины**. Заполнить необходимые для расчета значения, полученные на предыдущих этапах моделирования (рис. 6.2).

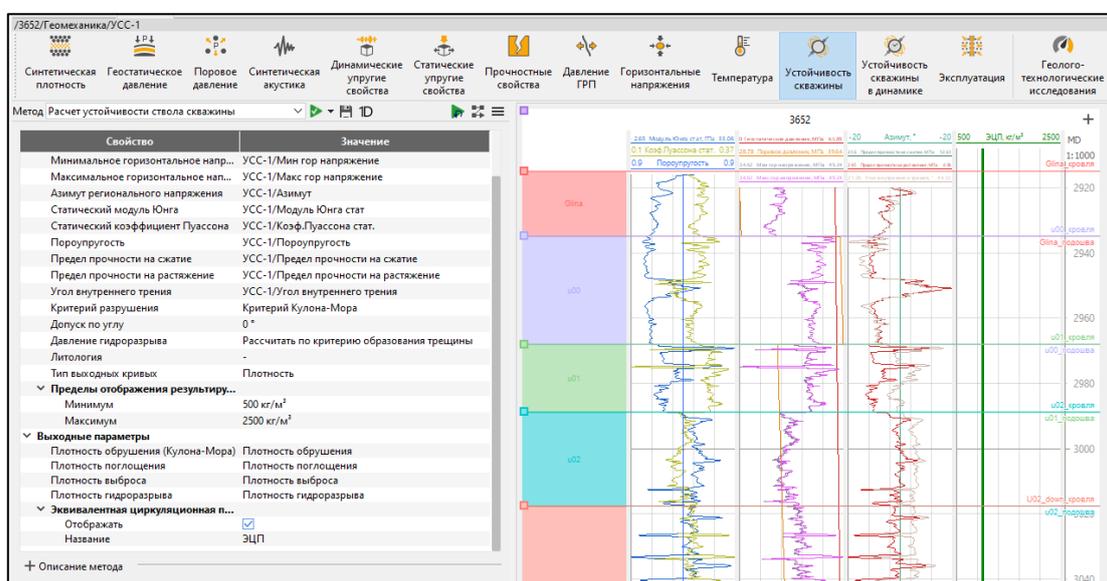


Рис. 6.2

Нажать **Рассчитать и сохранить** и добавить результаты расчетов в **рабочий процесс**.

Выходные параметры: **Плотность обрушения, Плотность поглощения, Плотность выброса, Плотность ГРП** (рис. 6.3).

Диаграммы напряжения и стереограмма плотности бурового раствора

Данные стереограммы интерактивные. Использовать для этого кнопки **Диаграммы напряжения** и **Стереограмма плотности бурового раствора**. Визуализация распределения компонент напряжения в около-

скважинном пространстве на заданной глубине является вспомогательным инструментом в методе *Расчет устойчивости ствола скважины*.

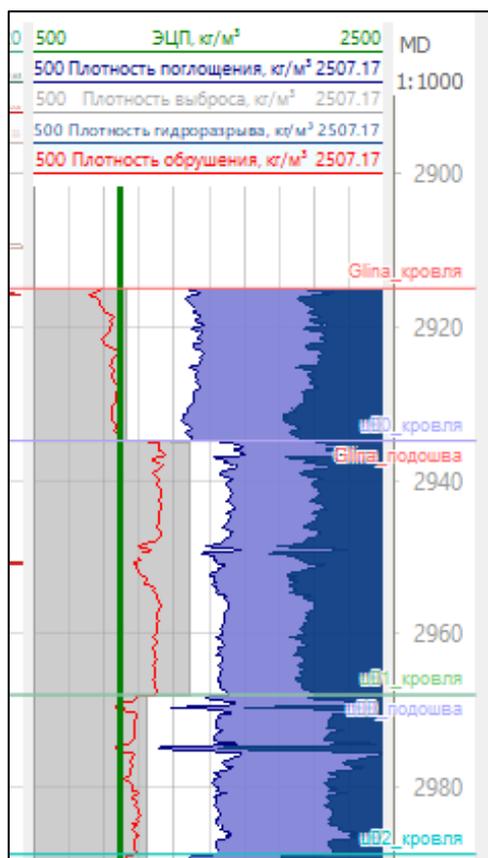


Рис. 6.3

Стереографическая проекция полусферы, на которой изображается плотность ГРП и обрушения горной породы. Эти стереограммы позволяют выбрать безопасные направления бурения в определенных точках по глубине для определения оптимальной траектории.

Стереограмма критической плотности – это зависимость критической плотности от азимута и наклона скважины в выбранной точке по глубине. Стереограмма позволяет дать рекомендации по выбору наиболее безопасного направления бурения в определенных (наиболее рискованных) точках по глубине для последующего планирования траектории скважины (рис. 6.4).

Графики *Зависимость критических плотностей от наклона при фиксированном азимуте скважины (сверху) и Зависимость критических плотностей от азимута при фиксированном наклоне скважины (снизу)*. Между графиками расположена легенда.

Эти графики позволяют провести более полноценный анализ наиболее безопасного направления бурения с учетом всех четырех значений критических плотностей (рис. 6.5).

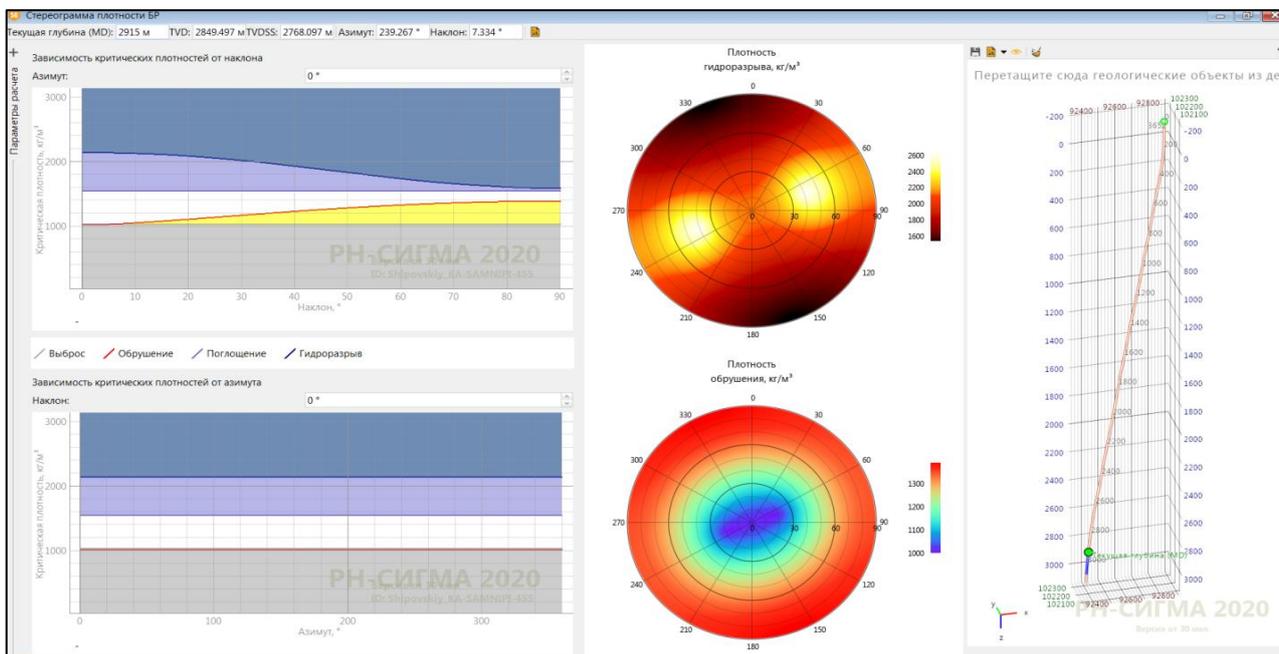


Рис. 6.4

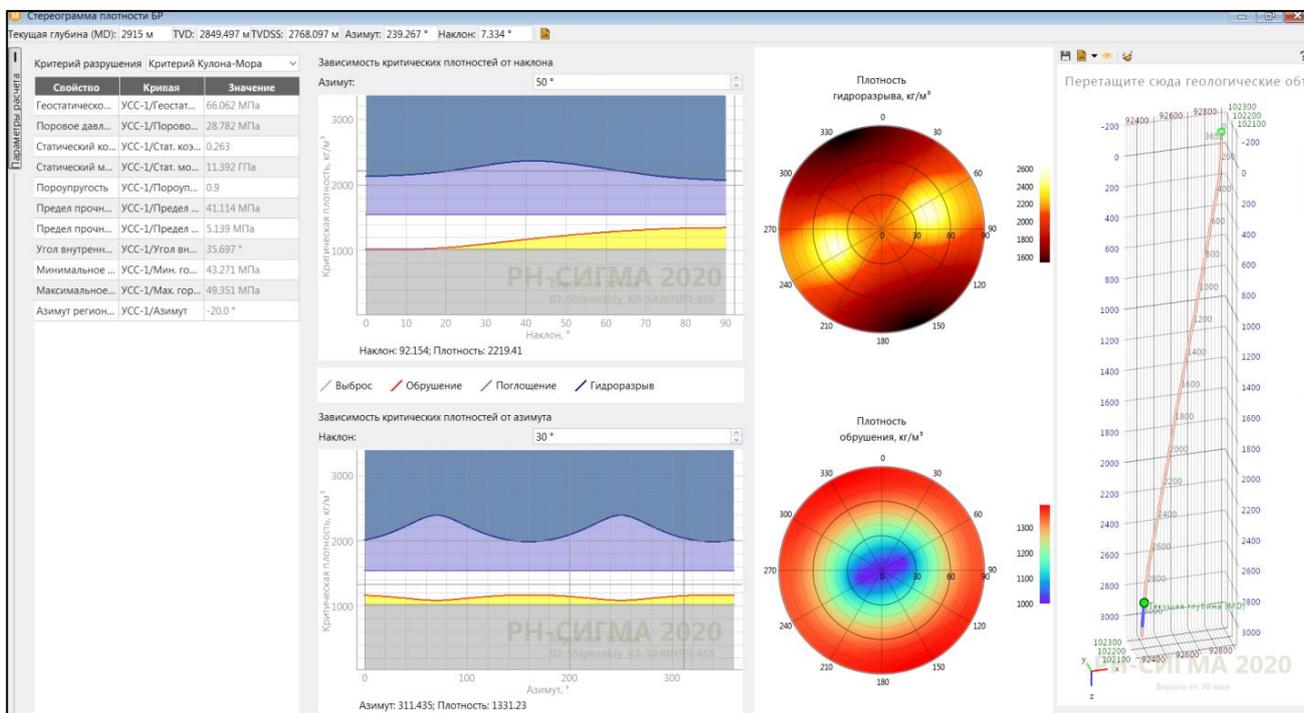


Рис. 6.5

В левом верхнем углу расположен список данных в табличной форме, которые можно заменить в процессе анализа. По умолчанию этот список скрыт. Для его раскрытия необходимо нажать на вкладку

Параметры расчета. В первом столбце отображается название входного параметра, во втором столбце – профиль, определяющий значение входного параметра на выбранной глубине, в третьем столбце – значение параметра на заданной глубине.

Выбрать по стереограммам и зависимостям критических плотностей от наклона и азимута безопасное направление бурения.

Вопросы для самостоятельной работы

1. Что такое безопасное окно бурения?
2. Проанализировать данные расчетов УСС и определить окно для безопасного бурения.
3. Что такое плотность бурового раствора? Ее влияние на стабильность стенок скважины.
4. Для чего необходимы стереограммы критических плотностей?
5. Что такое азимут регионального напряжения?

Лабораторная работа № 7

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СКВАЖИНЫ, БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ

В пункте *Конструкция-1* правой клавишей мыши добавить вкладку *Конструкция-1*.

Во вкладку *Ствол* внести проектные данные по конструкции скважины: *направление, кондуктор, техническая и эксплуатационная колонна* (рис. 7.1).

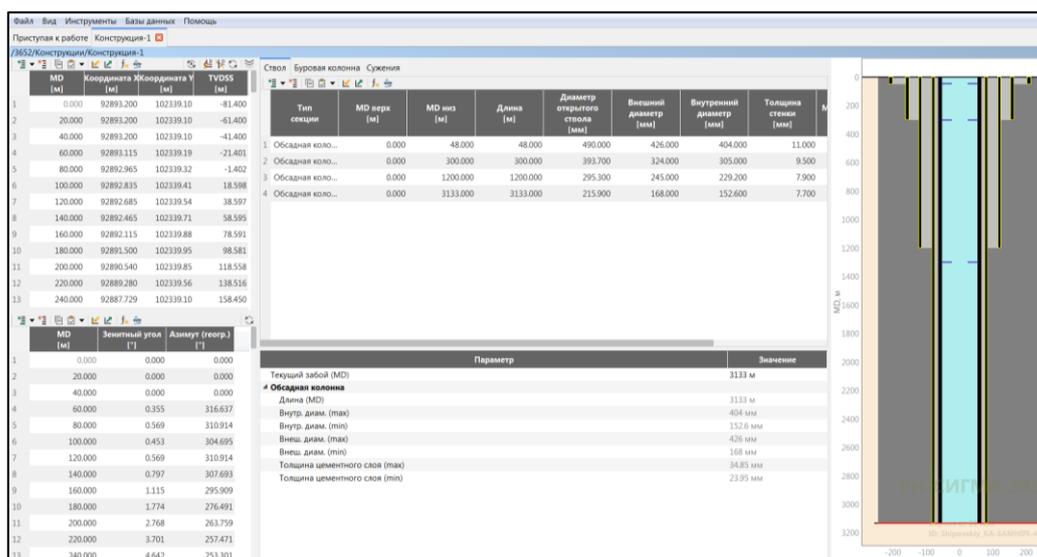


Рис. 7.1

В пункте *Конструкция-2* правой клавишей мыши добавить вкладку *Конструкция-2*.

Во вкладку *Ствол* внести проектные данные по конструкции скважины: *направление, кондуктор, техническая, эксплуатационная колонна и хвостовик* (рис. 7.2).

Во вкладку *Буровая колонна* внести проектные данные по буровой колонне для конкретного интервала ствола скважины (рис. 7.3, 7.4).

В завершении полученные результаты расчетов давлений ГРП с конструкцией скважины для визуализации нужно выложить на планшет в следующем порядке: *Инструменты* → *Планшет (Глубина)*.

Для этого перетащить нажатием левой кнопки мыши рассчитанные ранее давления ГРП, поглощения и конструкцию скважины.

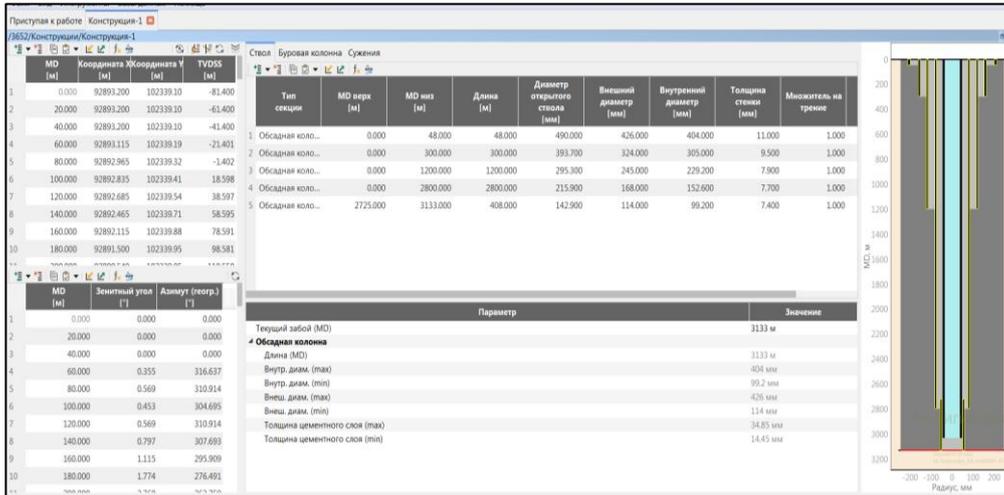


Рис. 7.2

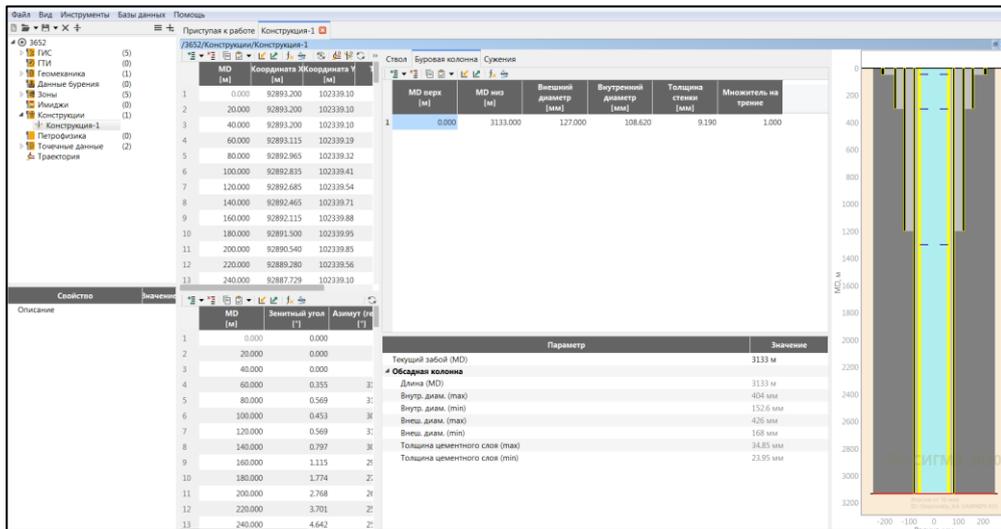


Рис. 7.3

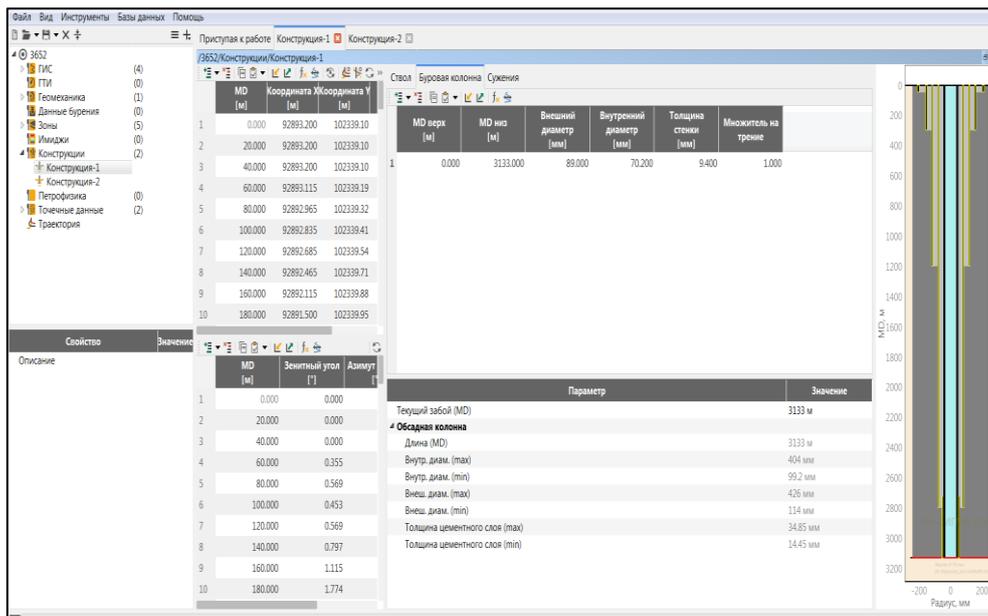


Рис. 7.4

Вопросы для самостоятельной работы

1. Что такое зенитный угол и азимут наклонно направленной скважины?
2. Назначение кондуктора в конструкции скважины.
3. Назначение технической колонны в конструкции скважины.
4. Назначение эксплуатационной колонны в конструкции скважины.
5. Назначение хвостовика в конструкции скважины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геомеханический симулятор «РН-СИГМА»: руководство пользователя. – М.: ПАО «НК «Роснефть», 2023. – 435 с.
2. Шиповский К.А., Капитонов В.А., Коваль М.Е., Недомовный Б.Н., Кнутава С.Р., Гиладев Г.Г. Алгоритм расчета градиентов давления гидроразрыва горной породы при проектировании конструкции скважин // Нефть. Газ. Новации. –2021. – № 8. – С. 36–40.
3. Шиповский К.А., Капитонов В.А., Коваль М.Е. Применение метода эмпирического коэффициента для расчетов градиентов давлений гидроразрыва пластов и поглощений бурового и тампонажного растворов // Труды международной научно-практической конференции «Ашировские чтения». – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2022. – С. 128–135.
4. Шиповский К.А., Капитонов В.А., Коваль М.Е., Гиладев Г.Г. Методика выбора и обоснования оптимальной конструкции проектируемой скважины на основе геомеханического моделирования // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2023. – № 5. – С. 25–30.
5. Капитонов В.А., Шиповский К.А., Шамсутдинова Е.Р., Живаева В.В., Плотников С.А., Кормухин О.В. Алгоритм расчета градиентов гидроразрыва горных пород с применением «РН-СИГМА» // Нефть. Газ. Новации. – 2023. – № 3. – С. 18–21.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
<i>Лабораторная работа № 1</i>	
СОЗДАНИЕ ПРОЕКТА И ЗАГРУЗКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ.....	4
<i>Лабораторная работа № 2</i>	
РАСЧЕТ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД	18
<i>Лабораторная работа № 3</i>	
РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОД.....	28
<i>Лабораторная работа № 4</i>	
РАСЧЕТ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ СВОЙСТВ ПОРОД.....	33
<i>Лабораторная работа № 5</i>	
РАСЧЕТ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОРОД.....	40
<i>Лабораторная работа № 6</i>	
ПОСТРОЕНИЕ ОДНОМЕРНОЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	43
<i>Лабораторная работа № 7</i>	
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СКВАЖИНЫ, БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ.....	48
Список литературы	51

Учебное издание

*ШИПОВСКИЙ Константин Аркадьевич
АВДЕЕВА Ксения Васильевна*

Построение одномерной геомеханической модели

Редактор *Т.Г. Воробьёва*
Компьютерная верстка *Е.А. Образцова*
Выпускающий редактор *Ю.А. Петропольская*

Подписано в печать 17.04.24
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная
Усл. п. л. 3,02. Уч.-изд. л. 2,95
Тираж 50 экз. Рег. № 32/24

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии
Самарского государственного технического университета
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус № 8