

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ -
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА**

**Фартуков В.А., Зборовская М.И.,
Рыжов С.А., Бородин А.К.**

ВВЕДЕНИЕ В МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ГЕОТЕХНИКИ

Учебное пособие

Москва
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева
2022

УДК 159.99
ББК 88
Г 49
ДОИ 10.26897/978-5-9675-1974-1-2022-174

Рецензенты:

Козырь И.Е., кандидат технических наук, профессор кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова

Щербаков А.О., кандидат технических наук, заведующий отделом гидротехники и гидравлики
ФГБНУ ВНИИГиМ имени А.Н. Костякова

Фартуков, В.А. Введение в моделирование задач геотехники: Учебное пособие / В.А.

Фартуков, М.И. Зборовская, С.А. Рыжов, А.К. Бородин; Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева. – Москва : РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2022. – 174 с. – Текст : электронный.

ISBN 978-5-9675-1974-1

Учебное пособие разработано ООО «ТЕСИС» совместно с Российским государственным аграрным университетом - МСХА имени К. А. Тимирязева.

В данном учебном пособии приводятся инструкции для работы с универсальным программным комплексом для расчётов динамики и прочности с помощью метода конечных элементов SIMULIA Abaqus. Пособие предназначено как для новых пользователей желающих изучить возможности SIMULIA Abaqus, так и для пользователей с опытом работы, которых интересует моделирование задач геотехники. Учебное пособие адресовано магистрам по направлению «Строительство», а также аспирантам направления «Техника и технологии строительства».

Материалы пособия адаптированы к бесплатной учебной версии Abaqus Student Edition (количество узлов в сетке не более 1000), распространяемой компанией ТЕСИС, а также позволяют использовать пособие для освоения полной версии SIMULIA

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией ИМВХС имени А.Н. Костякова РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, протокол № 3 от 19 декабря 2022 г.

Fartukov, V.A. Introduction to the modeling of geotechnical problems: Textbook / V.A. Fartukov, M.I. Zborovskaya, S.A. Ryzhov, A.K. Borodin; Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev. - Moscow: RGAU-MSHA named after K. A. Timiryazev, 2022. - 174 p. – Text : electronic.

The textbook was developed by TESIS LLC together with the Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev.

This tutorial provides instructions for working with the universal software package for dynamics and strength calculations using the SIMULIA Abaqus finite element method. The manual is intended both for new users who want to learn the possibilities of SIMULIA Abaqus, and for users with experience who are interested in modeling geotechnical problems. The textbook is addressed to masters in the direction of "Construction", as well as graduate students of the direction "Engineering and construction technology".

The materials of the manual are adapted to the free educational version of Abaqus Student Edition (the number of nodes in the grid is not more than 1000), distributed by TESIS, and also allow you to use the manual for mastering the full version of SIMULIA

©Фартуков В.А., Зборовская М.И., Рыжов С.А., Бородин А.К, 2022
© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени
К.А. Тимирязева, 2022

Оглавление

Введение	5
ЧАСТЬ 1. Основы моделирования в Abaqus.....	5
Глава 1. Начало работы с Abaqus.....	5
Глава 2. Основы работы с документацией Abaqus.....	8
Глава 3. Моделирование статической задачи.	13
Глава 4. Моделирование динамической задач.....	43
Глава 5. Моделирование различных типов материалов (изотропные, ортотропные, слоистые, гиперэластичные). Задание пределов пропорциональности и прочности, переход к нелинейной статической задаче.	49
5.1 Моделирование пластичного материала	50
5.2 Моделирование анизотропного материала на примере фанеры.....	51
5.3 Моделирование композитных материалов	52
5.4 Моделирование гиперэластичных материалов.....	53
Глава 6. Моделирование статического нагружения с контактным взаимодействием.....	58
6.1 Построение геометрической модели.	58
6.2 Присвоение свойств сечения детали петли.....	69
6.3 Создание и модификация второй петли.	70
6.4 Создание штифта.	71
6.5 Сборка модели.....	73
6.6 Определение шагов анализа.	80
6.7 Создание поверхностей для использования в контактных взаимодействиях.	86
6.8 Приложение граничных условий и нагрузок к сборке.	95
6.9 Построение сетки для сборки.....	103
6.10 Создание и инициализация задания.....	107
6.11. Визуализация результатов задания.....	108
6.12 Модернизация модели.....	110
Глава 7. Моделирование стационарного и нестационарного поля температур	110
7.1 Стационарный режим теплопроводности	111
7.1.1 Построение геометрической модели.	111
7.1.2 Присвоение свойств материала и сечения к геометрии пластины.	112
7.1.3 Задание шага анализа	114
7.1.4 Задание конвективного теплообмена и ГУ	115
7.1.5 Создание конечно-элементной модели.	116
7.1.6 Визуализация результатов расчёта.	118
7.2 Нестационарный режим теплопроводности	118

ЧАСТЬ 2. Основы моделирования задач геотехники в Abaqus	120
Принципы геотехнического моделирования	121
Семинар 1 - Модели материалов в геотехнике	131
Предварительная подготовка.....	132
Пример 1: Линейная эластичность.....	132
Пример 2: Пластичность по Друкеру-Прагеру	134
Пример 3: Друкер-Прагер с пластичностью крышки	137
Пример 4: Пластичность глины	139
Семинар 2 - Анализ потока поровых жидкостей: Консолидация.....	148
Введение	148
Предварительная подготовка.....	156
Консолидация	158
Визуализация результатов	159
Семинар 3 - Анализ потоков поровых жидкостей: Фильтрация	162
Введение	162
Начальные условия	169
Анализ	171
Усовершенствованная геостатическая процедура	172
Заключение	173
Список использованной литературы:	173

ВВЕДЕНИЕ

SIMULIA Abaqus Unified FEA - универсальный программный комплекс для расчётов динамики и прочности с помощью метода конечных элементов, разрабатываемый компанией Dassault Systèmes (Франция).

Настоящее пособие предназначено для как для новых, так и для опытных пользователей SIMULIA Abaqus, которых интересуют новые для себя типы анализа. Пособие представляет собой пошаговую инструкцию по созданию и анализу базовых задач физики деформируемого твёрдого тела, а также специальных типов междисциплинарного анализа.

Связаться с авторами и задать вопросы вы можете по адресам:

Simulia_support@tesis.com.ru, info@tesis.com.ru

В сообществе ТЕСИС в социальной сети ВКонтакте:

https://vk.com/tesis_com_ru

Все задачи данного руководства адаптированы для работы с бесплатной учебной версией Abaqus Student Edition 2021. Учебная версия предназначена для обучения студентов Московской сельскохозяйственной академии имени К. А. Тимирязева, самостоятельного обучения работы с программным комплексом, и не может применяться в других коммерческих целях. Получить учебную версию вы можете на сайте компании ТЕСИС: www.tesis.com.ru. Также в официальном англоязычном сообществе SIMULIA User Community компании Dassault Systèmes.

<https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/simulia/soobshchestva/learning-community/>

Учебная версия представляет собой полнофункциональную версию Abaqus, включающую все основные модули и решатели, а также полный комплект документации. Ограничения учебной версии – размер расчётной сетки не более 1000 узлов, невозможно подключать пользовательский подпрограммы, написанные на Fortran; модели Abaqus/CAE созданные в учебной версии Student Edition могут быть импортированы только в учебную университетскую версию Abaqus Teaching Class. Импорт в коммерческую и исследовательскую академическую версию Abaqus невозможен.

ЧАСТЬ 1. ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ABAQUS

Глава 1. Начало работы с Abaqus

Для начала работы из меню **Пуск – Программы – Abaqus** запустите **Abaqus/CAE**. В появившемся диалоговом окне *Start Session* (Рисунок 1.1), показанном на рисунке, предлагаются 4 возможных варианта действий:

- 1) **Create Model DataBase** – создание новой базы данных для модели;
- 2) **Open DataBase** - открытие уже существующей базы данных;
- 3) **Run Script** – запуск сценария с заранее записанными командами;
- 4) **Start Tutorial** – запуск программы с документацией по обучению и создание новой базы данных.

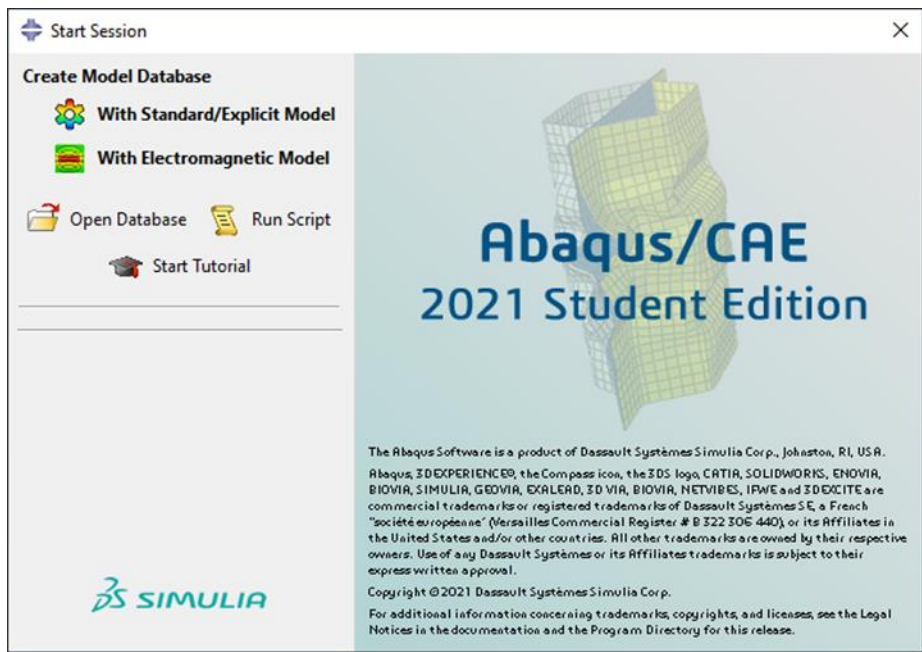


Рисунок 1.1 - диалоговое окно Start Session

Выберите **Create Model Database** для начала работы.

Перед началом работы в **ABAQUS/CAE** рассмотрим структуру графического интерфейса пользователя (Рисунок 1.2):

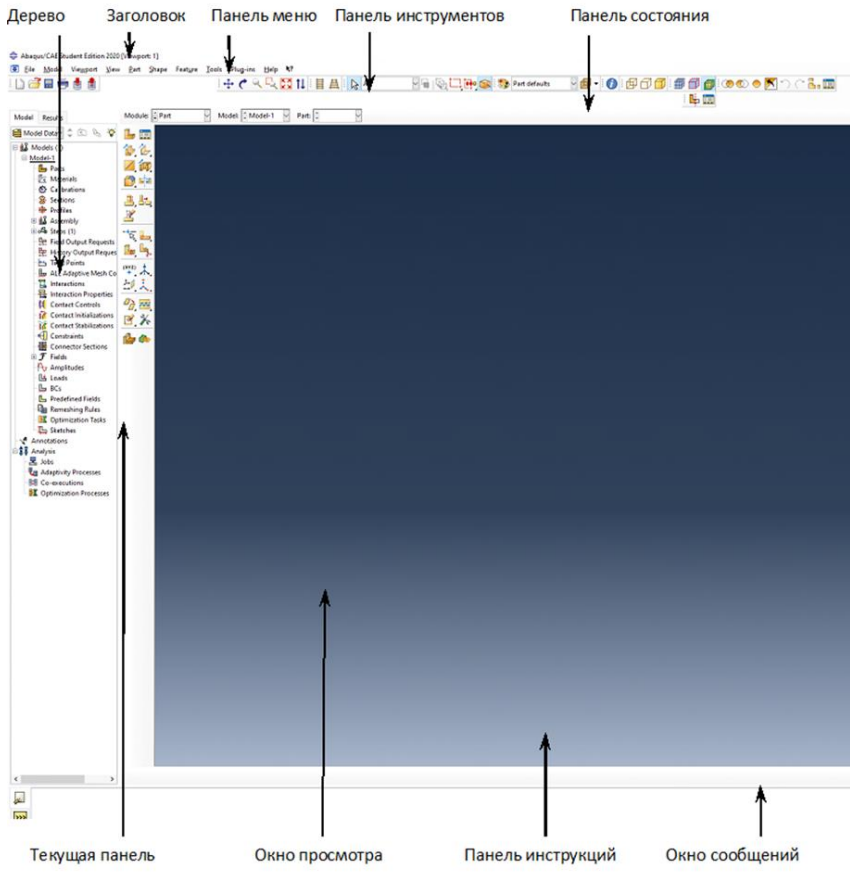


Рисунок 1.2 – Графический интерфейс пользователя.

Перед Вами – рабочее пространство **ABAQUS 2021**. Верхняя панель – панель меню, ниже ее – панель инструментов, под ней – панель состояния. В центре – рабочее окно просмотра моделей **Viewport**, слева от него – текущая панель компонент модулей, под ним – панель инструкций и окно сообщений. Все это составляет графический интерфейс CAE. Размеры окна **Viewport** могут меняться, но общий вид всех панелей и их расположение неизменно.

Одной из особенностей **ABAQUS** является использование модулей, каждый из которых содержит некоторый набор действий, близких по значению и необходимых для построения конечно-элементной модели и дальнейших операций с ней. Это упрощает и делает более наглядной работу в **ABAQUS**. Для выбора модуля в левой части панели основных компонент есть ниспадающий список *Module* (Рисунок 1.3):

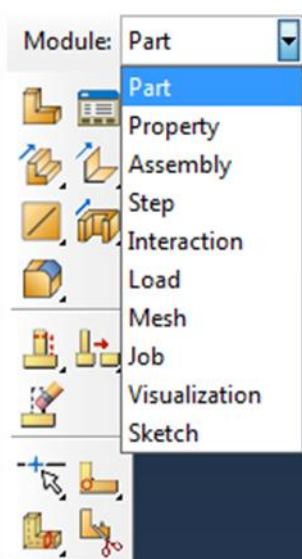


Рисунок 1.3 - ниспадающий список *Module*

PART – модуль, предназначенный для создания деталей, задания их геометрии, опорных точек и систем координат;

PROPERTY – модуль, предназначенный для задания свойств материалов, сечений, применяемых в модели;

ASSEMBLY – модуль, предназначенный для задания взаимного расположения деталей и сборки их в единую модель;

STEP – модуль, предназначенный для создания шагов расчёта и определения выходных данных по результатам;

INTERACTION – модуль, предназначенный для определения взаимодействий между деталями, контактными участками и их свойств;

LOAD – модуль, предназначенный для создания нагрузок, прикладываемых к модели, а также начальных и граничных условий для неё;

MESH – модуль, предназначенный для построения конечно-элементной сетки.

JOB – модуль, предназначенный для создания файла выходных данных, проверки построенной модели, запуска вычислительного процесса и контроля над ним;

VISUALIZATION – модуль, предназначенный для просмотра результатов расчёта и обработки полученных данных;

SKETCH – модуль, предназначенный для сохранения эскизов и чертежей полученной модели.

Так же для ускорения и удобства работы с основными функциями и наглядного представления элементов модели в **Abaqus/CAE** используется дерево модели (Рисунок 1.4). Каждый элемент в дереве модели отвечает за работу с конкретным модулем и создание элемента модели. Ниже обозначены наиболее часто используемые элементы:

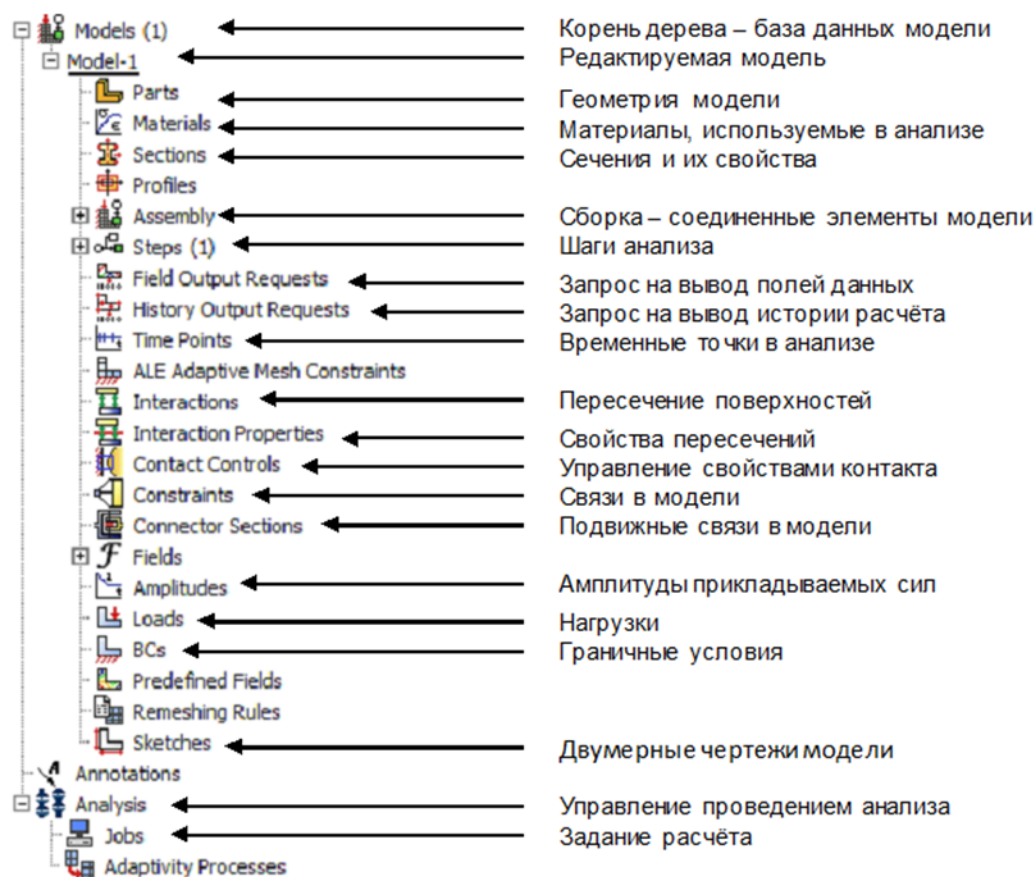


Рисунок 1.4 – Дерево модели с обозначенными наиболее часто используемыми элементами

Глава 2. Основы работы с документацией Abaqus.

Программный комплекс Abaqus Unified FEA поставляется с обширной документацией, описывающей все возможности программного комплекса. Отдельный раздел посвящён примерам решения задач из различных областей механики твёрдого тела. Примеры задач доступны пользователю для ознакомления, редактирования и последующего использования.

При изучении решения конкретной задачи полезно предварительно изучить представленные в документации примеры.

Доступ к документации предоставляется через сайт <https://help.3ds.com>

Для получения доступа к онлайн документации вам необходимо создать учётную запись на сайте Dassault Systemes - 3DPassport. Перейдите на страницу <https://www.3ds.com>, в верхнем правом углу сайта найдите значок . Нажмите на него – вы перейдёте на страницу входа в систему 3DPassport. Для создания учётной записи нажмите «Создать ИД 3DEXPERIENCE».

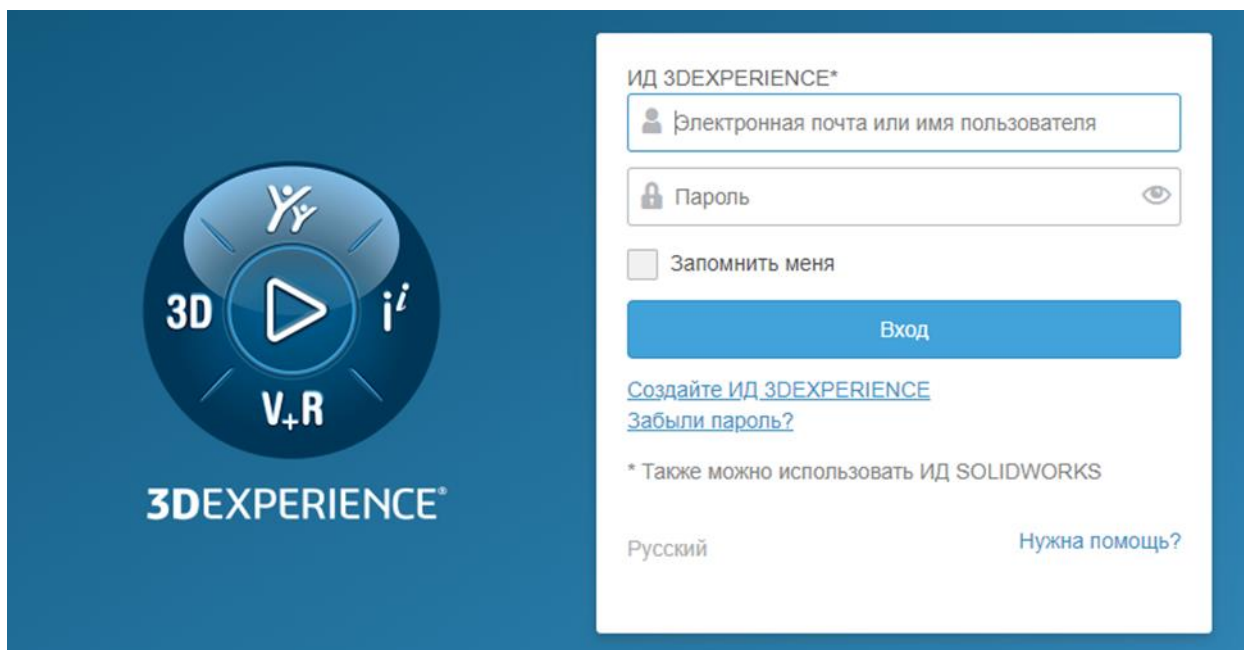


Рисунок 2.1 – Страница входа в учётную запись 3DEXPERIENCE.

После регистрации на странице <https://help.3ds.com> вам необходимо выбрать Version – 2021, Language – English, и нажать на раздел SIMULIA Established Products.

Version: ▼
Language: ▼

Dassault Systèmes 2020 User Assistance

SIMULIA Established Products (Abaqus, fe-safe, Isight, and Tosca)

Рисунок 2.2 – Сайт доступа к документации.

Также вы можете получить доступ к документации к локально установленной копии документации как непосредственно из Abaqus/CAE, так и с помощью ярлыка в меню Пуск=> Dassault Systemes SIMULIA Abaqus Student Edition 2021 => Abaqus Documentation. Для корректной

работы поиска по документации требуется использовать **Internet Explorer**. Другие интернет-браузеры не поддерживаются. После открытия браузера необходимо разрешить открыть заблокированное содержимое (Рисунок 2.3)

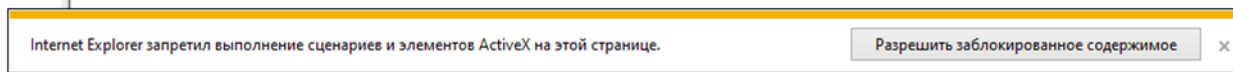


Рисунок 2.3 – Запрос на открытие заблокированного содержимого

На рисунке 2.4 представлен начальный экран документации, состоящий из разделов и рабочей области.



Рисунок 2.4 – Начальная страница Abaqus Unified FEA.

На рисунке 2.5 представлены разделы документации. Каждый раздел отвечает за определённый аспект эксплуатации комплекса. Ниже представлен список разделов, необходимых для изучения при начале работы с программным комплексом Abaqus Unified FEA.



- Searching the Documentation
- ⊕ Preface
- Legal Notices
- ⊖  Abaqus
 - ⊕ Abaqus/CAE
 - ⊕ Analysis
 - ⊕ Benchmarks
 - ⊕ Constraints
 - ⊕ Elements
 - ⊕ Example Problems
 - ⊕ Execution
 - ⊕ Getting Started with Abaqus/CAE
 - ⊕ GUI Toolkit
 - ⊕ GUI Toolkit Reference
 - ⊕ Interactions
 - ⊕ Introduction & Spatial Modeling
 - ⊕ Keywords
 - ⊕ Materials
 - ⊕ Output
 - ⊕ Prescribed Conditions
 - ⊕ Release Notes
 - ⊕ Scripting
 - ⊕ Scripting Reference
 - ⊕ Theory
 - ⊕ User Subroutines
 - ⊕ Verification
- ⊖  Installation, Licensing & Configuration
 - ⊕ Abaqus Configuration

Рисунок 2.5 - Разделы документации

Abaqus/CAE:

Данное руководство содержит детальное описание пре-постпроцессора **Abaqus/CAE**, которое используется для создания в графическом интерфейсе расчётной модели и анализа результатов расчёта.

Analysis:

Данное руководство содержит полное описание по работе с решателями *Abaqus*, в том числе запуску решателя из командной строки, созданию модели в текстовом виде, типов анализов *Abaqus* элементов, моделей материалов, процедур, и т.д. Это основной справочный документ для работы с решателями *Abaqus/Standard* и *Abaqus/Explicit*.

Example Problems:

Данное руководство содержит примеры решённых задач, дающих представление о методах формирования и решения различных задач. В каждой задаче находятся входные файлы *Abaqus*, запустив которые на расчёт или импортировав в **Abaqus/CAE** можно изучить структуру задачи и просмотреть результаты расчёта.

Getting Started with Abaqus/CAE:

Данное руководство содержит учебный курс на английском языке по созданию расчётных моделей в пре-постпроцессоре *Abaqus/CAE*. В учебном курсе подробно рассмотрено моделирование и расчёт различных конструктивных элементов, решение статических, частотных, динамических и контактных задач, обработка результатов. Данный учебный курс даёт возможность изучить большинство основных возможностей *Abaqus Unified FEA*.

Импорт примеров

Для того чтобы изучить задачу из представленных примеров в документации *Abaqus*, загрузить его в *Abaqus/CAE*, или запустить на расчёт необходимо выполнить следующие действия. Откройте раздел документации, содержащий интересующую задачу. В тексте найдите ссылку на файл *.inp – входной текстовый файл *Abaqus* (Рисунок 2.6).

Щелкните правой кнопкой мыши и выберите «*Сохранить объект как...*», после чего сохраните входной файл в рабочей директории *Abaqus*. По умолчанию используется директория **C:\Temp**.

Для того чтобы загрузить интересующий пример в *Abaqus/CAE* необходимо в файловом меню выбрать **File=>Import=>Model...** и выбрать интересующий входной файл (Рисунок 2.7).

Для того чтобы запустить интересующий файл на расчёт в дереве модели выберите контейнер **Job**, дважды щелкните на нем, в выпадающем меню **Source** выберите *Input File* и интересующий Вас входной файл (Рисунок 2.8). Затем щелкните правой кнопкой мыши на появившемся названии модели, и выберете *Submit* (Рисунок 2.9).

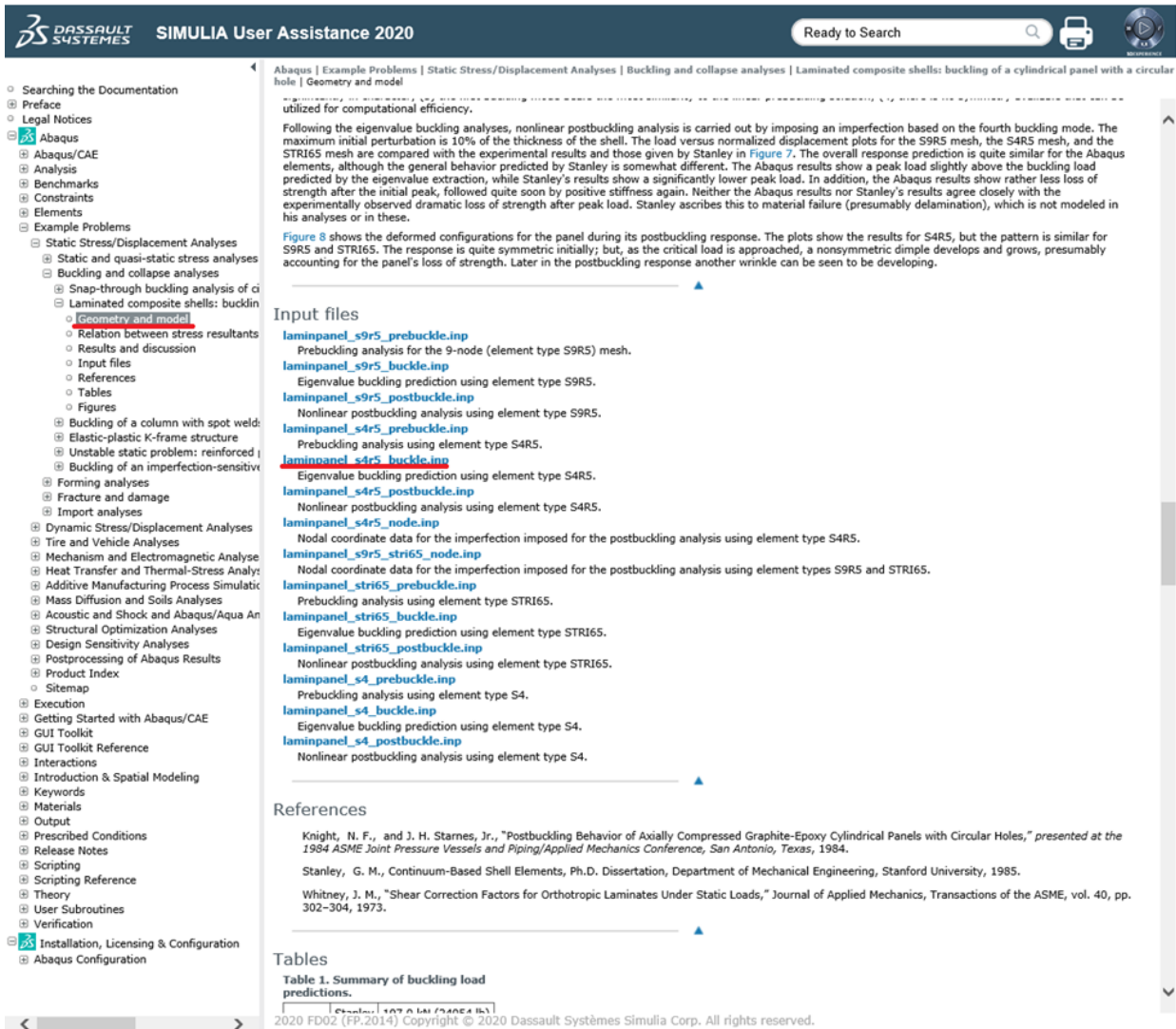


Рисунок 2.6 – Выбор готовой задачи из примера

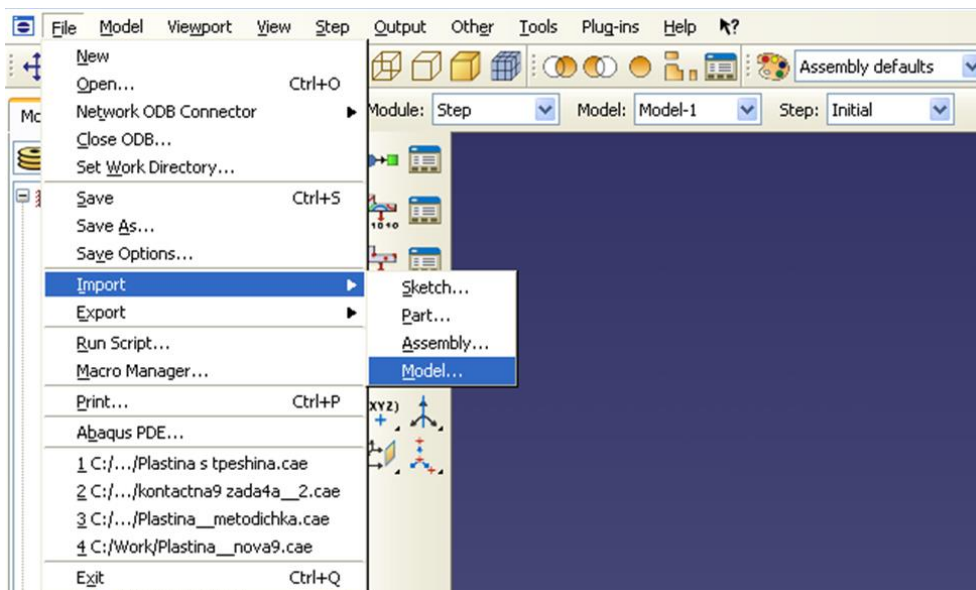


Рисунок 2.7 – Импорт модели

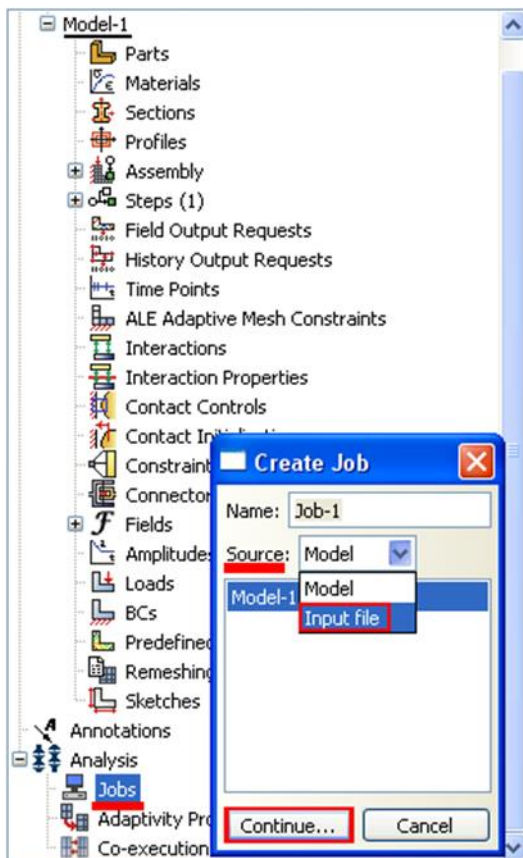


Рисунок 2.8 – Создание задания на расчёт

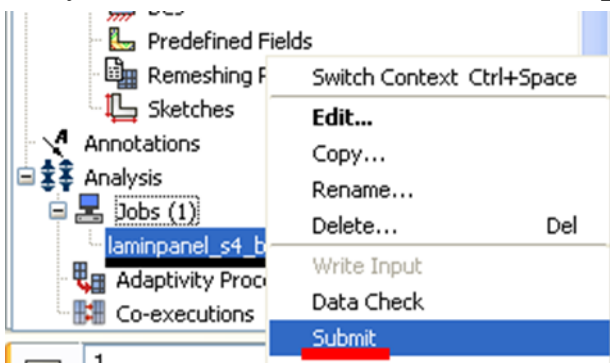


Рисунок 2.9 – Запуск расчёта

Глава 3. Моделирование статической задачи.

Рассмотрим консольно-закреплённую упругую балку длиной 10 см, прямоугольного сечения 5,0*5,0 мм, изготовленную из дюралюминия Д16Т и нагруженную сосредоточенной силой величиной в $P = 1$ Н, приложенной к свободному концу. Ее общая схема представлена на рисунке 3.1:

Начнём работу с создания двумерной деформируемой модели балки. Для этого:

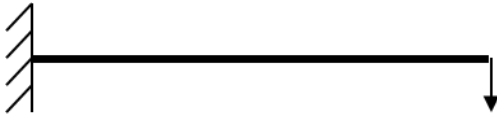



Рисунок 3.1: Консольно-закреплённая балка

Откройте в списке **Module** модуль **PART**. Для создания детали нажмите кнопку **Create Part** , или дважды щёлкните на значке **Parts** в дереве модели.

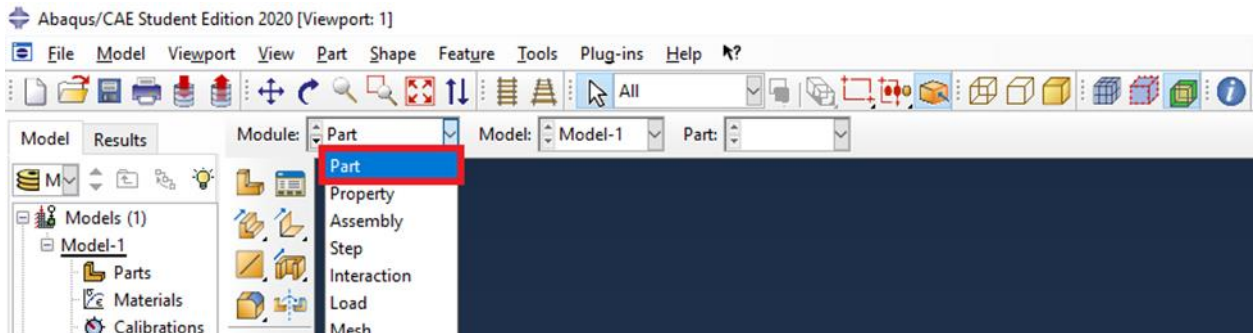


Рисунок 3.2 - Создание геометрической модели

В появившемся окне **Create Part** зададим свойства так, как показано на рисунке 3.3, т. е. создадим двумерную деформируемую кривую типа «wire» с максимальным размером области построения 0.4 м., и присвоим ей имя «Beam-1». Подтвердим заданные свойства нажатием кнопки **Continue**.

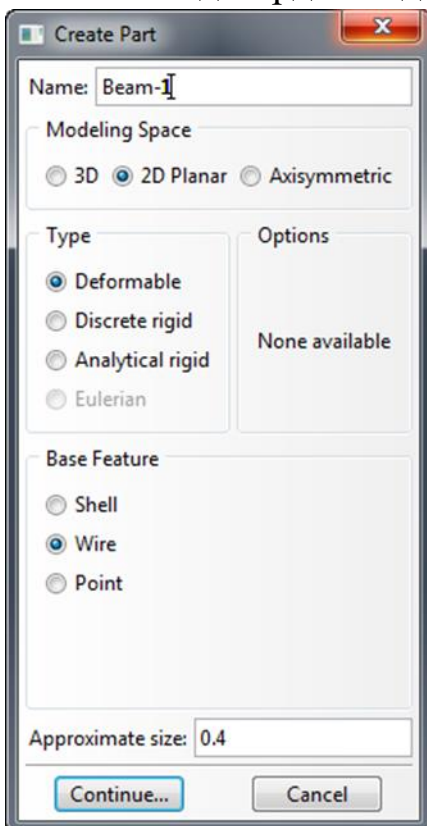


Рисунок 3.3 - Окно **Create Part**

3. На экране появится координатная сетка, сопровождающая построение модели. Построим прямую линию длиной 0.1 м., которая будет

представлять нашу балку. Для этого нажмём кнопку  **Create Lines Connected**.

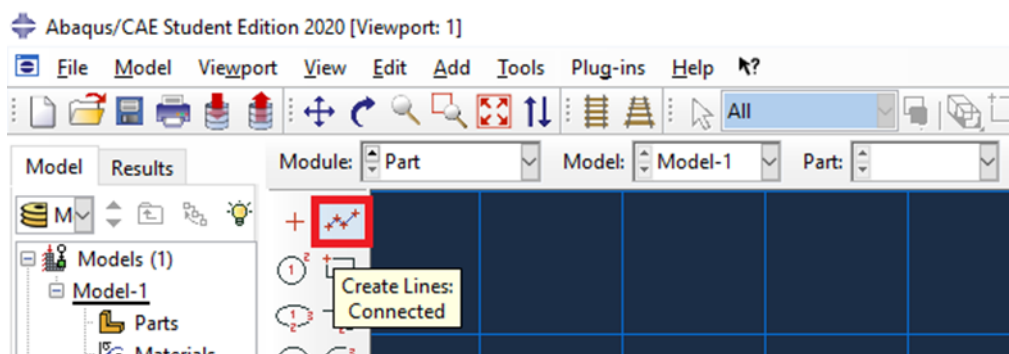


Рисунок 3.4 – Панель инструментов с кнопкой  **Create Lines Connected**

Теперь зададим координаты двух точек в поле ввода, появившемся в панели инструкций, как это показано на **рисунке 3.5**, с координатами (0, 0) и (0.1, 0). После задания координат каждой точки, подтверждаем свой выбор клавишей **Enter** (или средней кнопкой мыши). В случае ошибки можно произвести отмену действия при помощи кнопки **Cancel**.

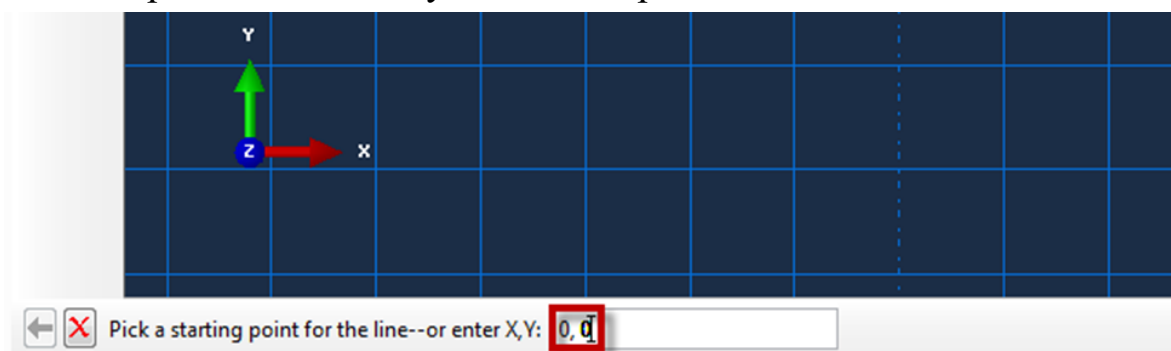




Рисунок 3.5 – Поле ввода координат

Чтобы завершить геометрические построения, нажмите **Cancel** или среднюю кнопку мыши.

4. После выполнения всех геометрических построений нажмите появившуюся внизу на панели инструкций кнопку **Done** (Рисунок 3.6).

После создания геометрической модели балки перейдём к следующему модулю **PROPERTY**:

В модуле **PROPERTY** задаётся материал балки и свойства сечения (Рисунок 3.7).

1. Создадим материал для балки. Для этого можно воспользоваться либо элементом меню **Material => Create** (см. Рисунок 3.8), либо кнопкой **Create Material**  на текущей панели инструментов, или дважды щёлкнуть на иконку **Materials**  в дереве модели - Рисунок 3.8.

Появится окно **Edit Material**, показанное на рисунке 3.9. Назовём материал *Metal*. В средней части окна задаются различные свойства материалов, из которых необходимо задать только два: *General=>Density = 2600 (кг/м³)* и *Mechanical =>Elasticity=>Elastic: Young's Modulus = 5.6e+08*

(Па), Poisson's Ratio = 0.3. Подтвердите ввод нажатием кнопки **ОК**.
Материал создан.

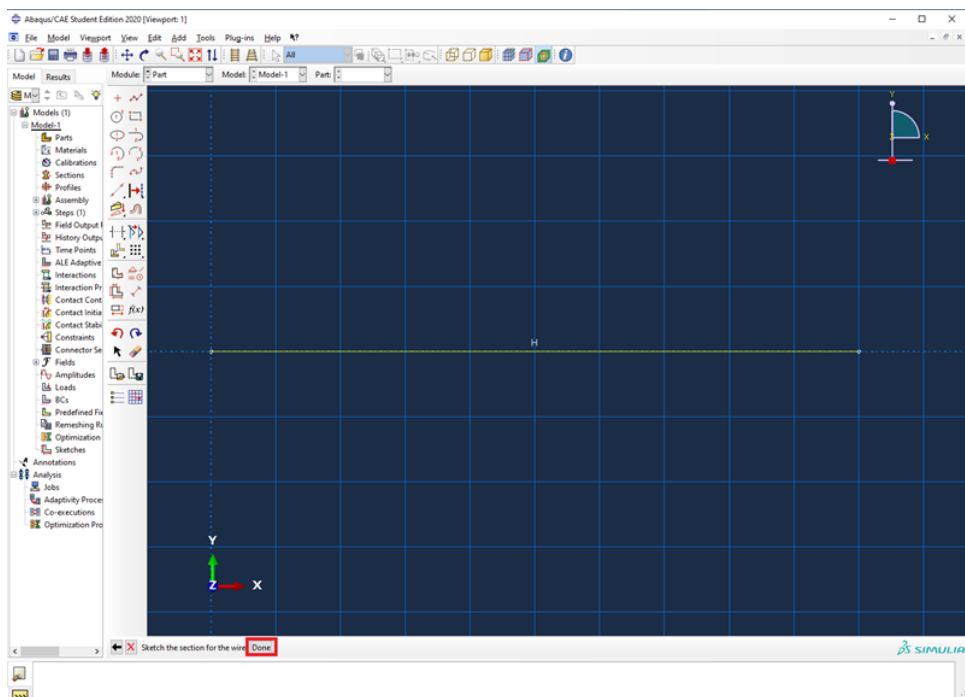


Рисунок 3.6 – Интерфейс пользователя с кнопкой **Done** на панели инструкций

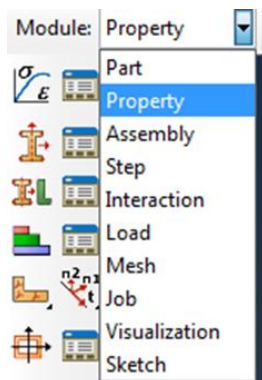


Рисунок 3.7 – Выбор модуля **PROPERTY**

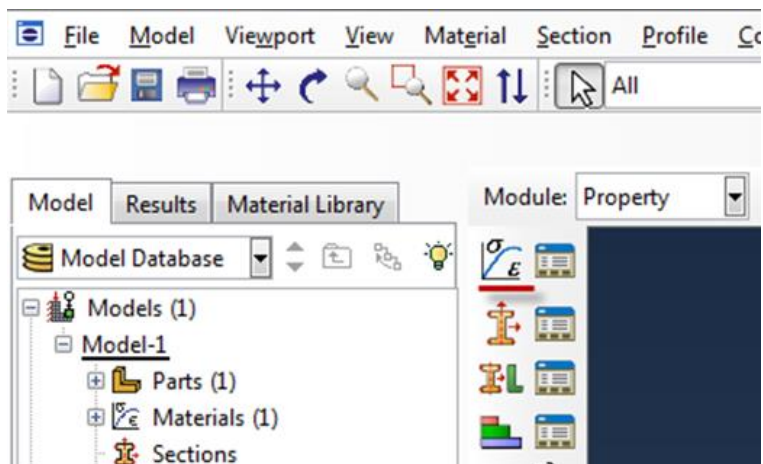


Рисунок 3.8 - Панель инструментов с кнопкой  **Create Material**

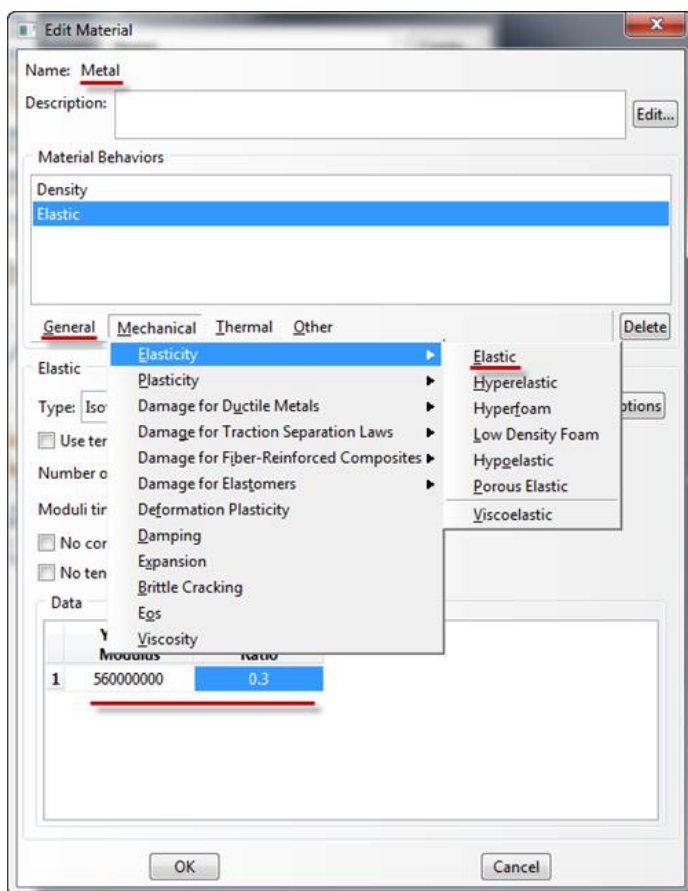




Рисунок 3.9 – Окно **Edit Material**

2. Далее необходимо создать сечение балки, присвоить ему заданный материал и только затем присвоить это сечение всей балке. Для создания сечения нажмите кнопку  **Create Section** (либо дважды щёлкните по иконке , либо воспользуйтесь командами меню **Section=> Create**) как показано на рисунке 3.10.

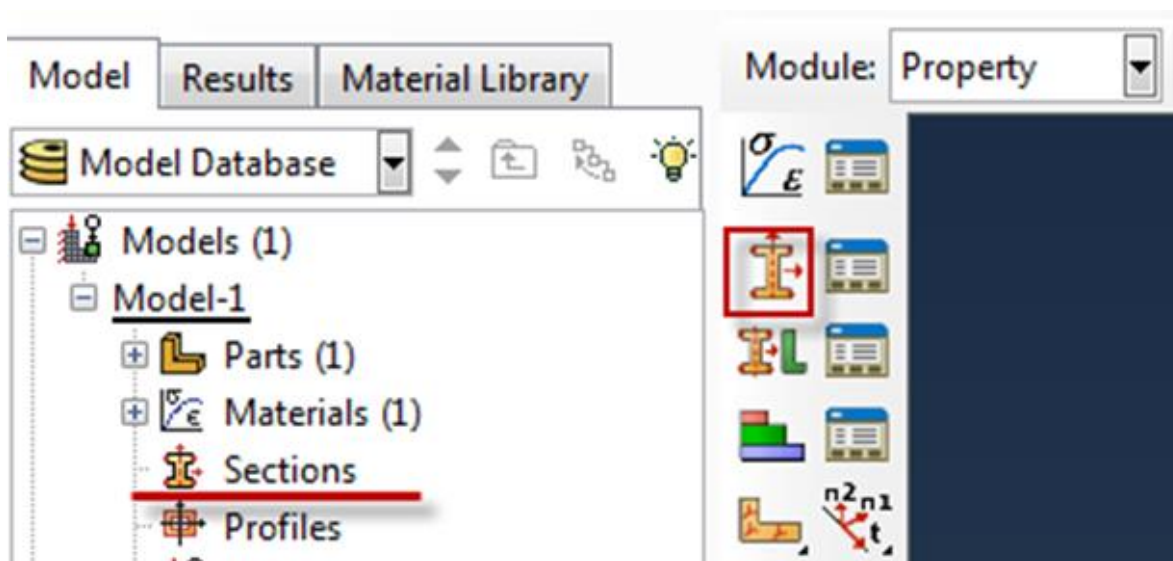


Рисунок 3.10 – Панель инструментов с кнопкой  **Create Section**

В появившемся окне **Create Section** (Рисунок 3.11) нужно указать категорию геометрии тела и тип, и сечения- *Beam*. Назовите сечение *Beam Section*. Подтвердите выбор, нажав кнопку **Continue**.

Далее появится окно **Edit Beam Sections** (Рисунок 3.12) в котором нужно присвоить сечению материал и задать профиль. Для этого в поле *Material Name* выберете ранее созданный материал *Metal*. Далее необходимо задать профиль сечения: нажмите на кнопку **Create** рядом с полем **Profile name**.

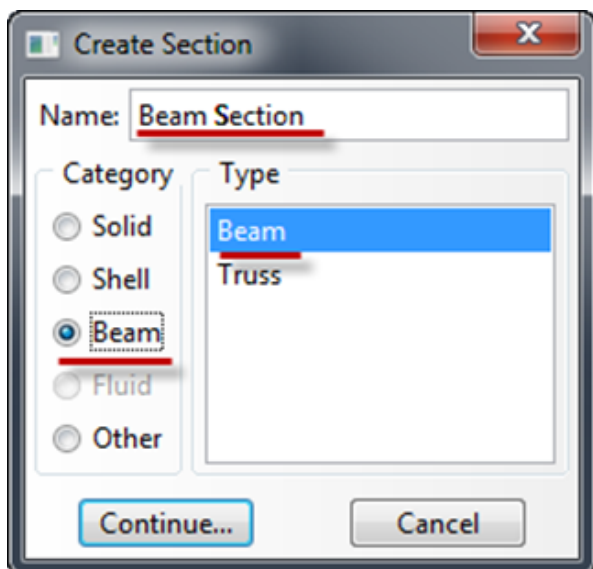


Рисунок 3.11 – Окно **Create Section**

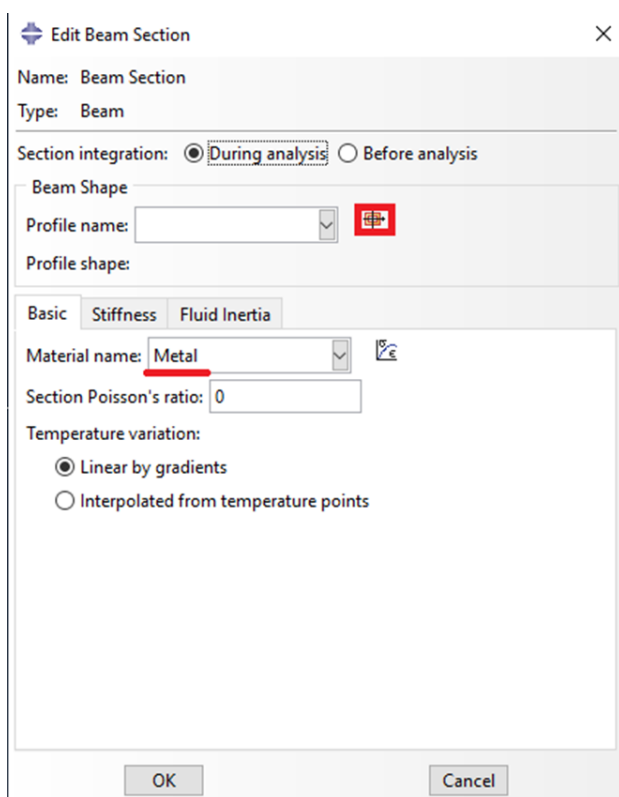


Рисунок 3.12 – Окно **Edit Beam Sections**

В появившемся окне **Create Profile** (Рисунок 3.13) выберите **Rectangular** (прямоугольник). Назовём наш профиль *Rectangular*. Подтвердим выбор, нажав кнопку **Continue**. В окне **Edit Profile** (Рисунок 3.14), зададим размеры сторон сечения $a = 0.005$, $b = 0.005$. Подтвердите ввод кнопкой **OK**.

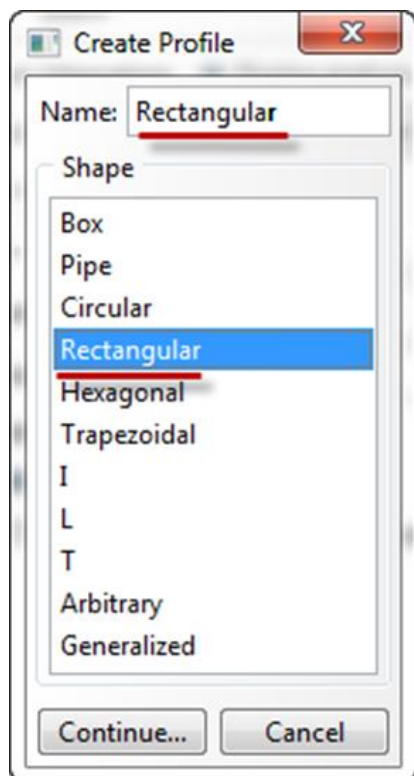


Рисунок 3.13 – Окно **Create Profile**

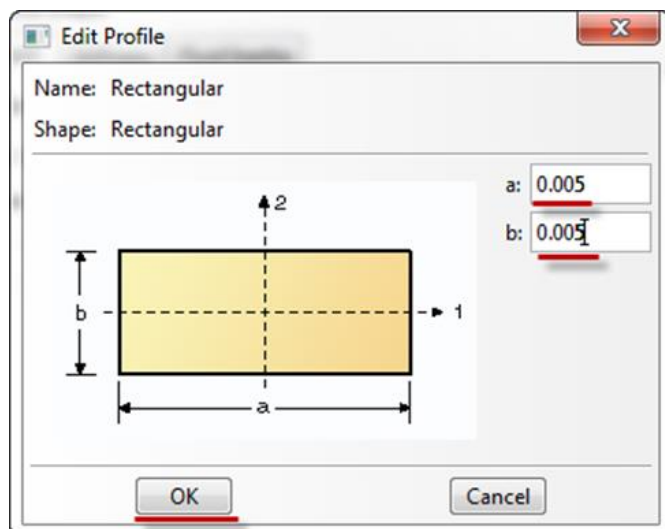



Рисунок 3.14 - Окно **Edit Profile**

После этого выберете созданный профиль в поле **Profile name** (Рисунок 3.12) и завершите создание сечения нажатием на **OK**.

3. Теперь присвоим построенное сечение ранее созданной балке. Для этого используйте кнопку в текущей панели инструментов (либо дважды

щелкните по элементу  Section Assignments в дереве модели, либо используйте команды меню: **Assign => Section**).

С помощью мыши укажите на балку, она будет выделена красным цветом. Нажмите **Done**. В появившемся окне (Рисунок 3.16) выберите сечение и подтвердите выбор нажатием кнопки **OK**.

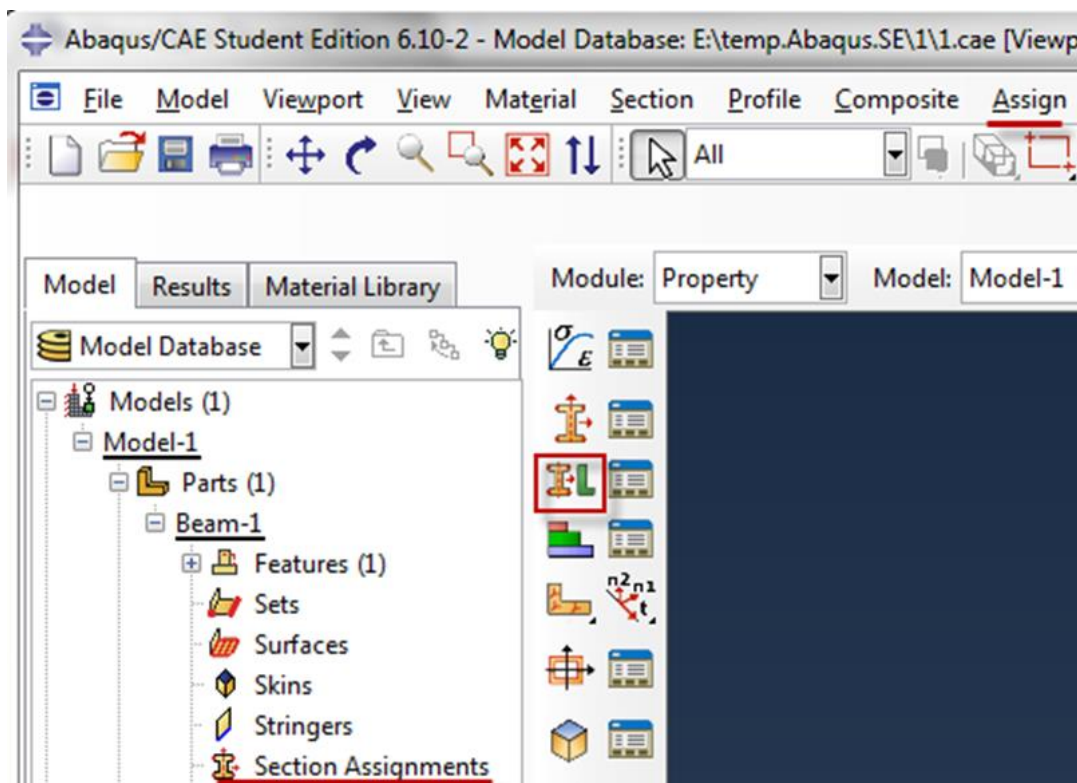


Рисунок 3.15 – Панель инструментов с кнопкой  **Assign Section**

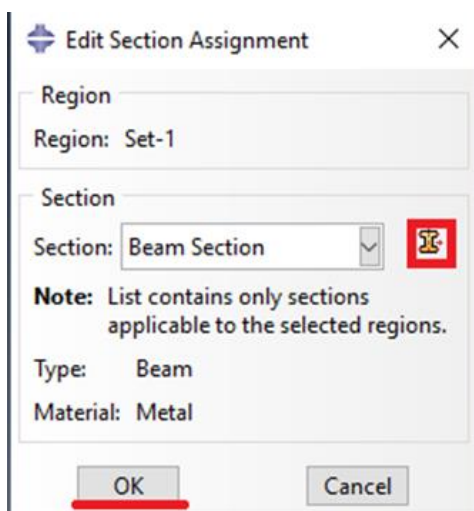



Рисунок 3.16 – Окно **Edit Section Assignment**

4. Осталось определить, как направлено сечение внутри балки. Для задания ориентации сечения нажмите кнопку  **Assign Section Orientation** (либо используйте команду меню **Assign => Beam Section Orientation**). С помощью мыши укажите на балку, она будет выделена красным цветом, и подтвердите выбор нажатием кнопки **Done** (Рисунок 3.17).

На панели инструкций появится поле, в котором необходимо задать направление вектора вдоль оси «X» (стороны a) сечения. Введите числа (0, 0, -1) в соответствующее поле (Рисунок 3.18), нажмите **Enter** и, убедившись в правильности выбора направления сечения, кнопку **OK**.

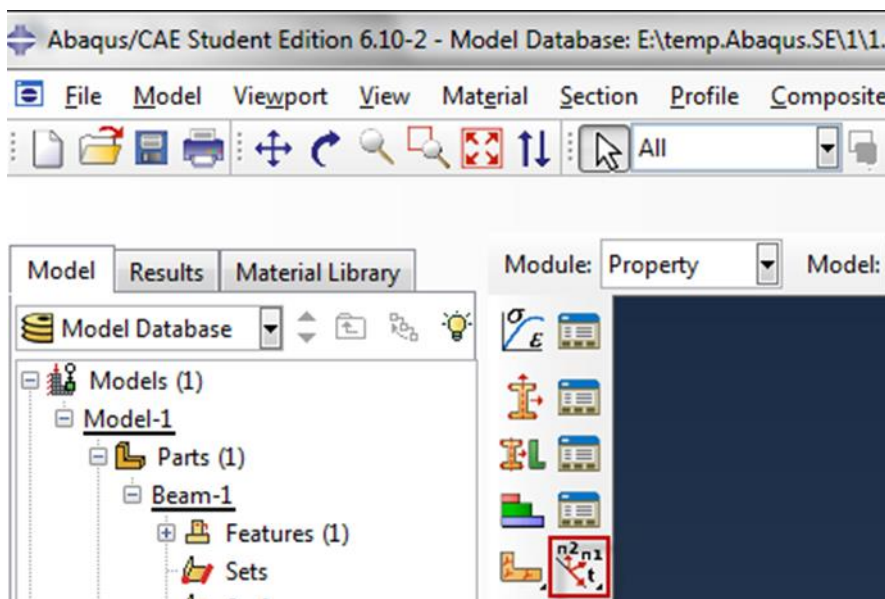


Рисунок 3.17 – Панель инструментов с кнопкой  **Assign Section Orientation**

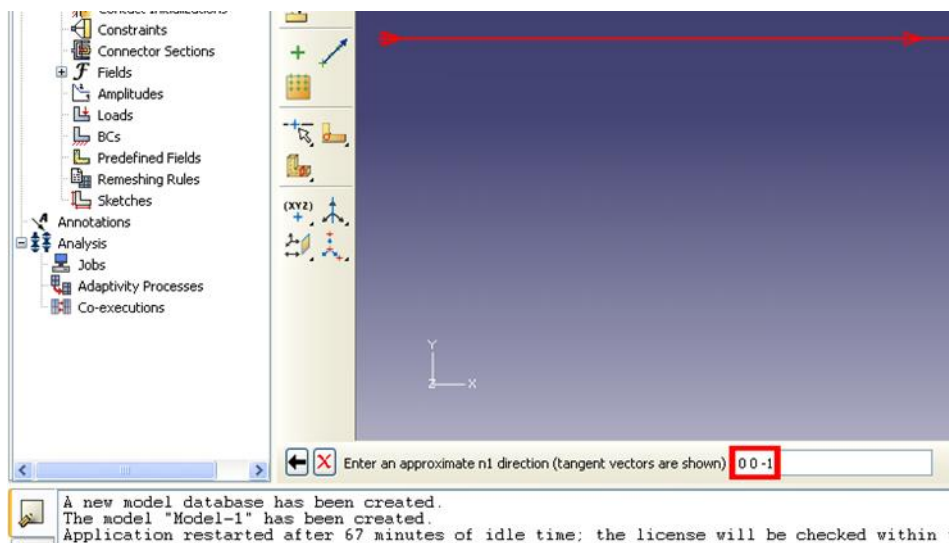




Рисунок 3.18 – Поле ввода для вектора направления

Перейдём к модулю **ASSEMBLY** (Рисунок 3.19). Как было сказано выше модуль **Assembly**, служит для создания привязок (ссылок на детали) и объединения деталей в сборки. Несмотря на то, что в данной модели всего одна деталь, сборку все равно необходимо сформировать.

Поскольку в рассматриваемом случае деталь всего одна, достаточно нажать кнопку **Create Part Instance**  (либо в дереве модели дважды кликнуть по элементу , либо воспользоваться командами: меню **Instance => Create**) (Рисунок 3.19).

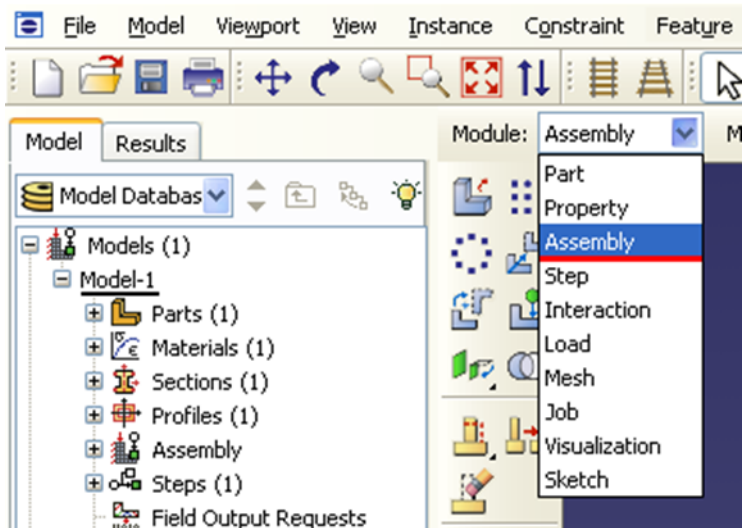


Рисунок 3.19 – Выбор модуля ASSEMBLY

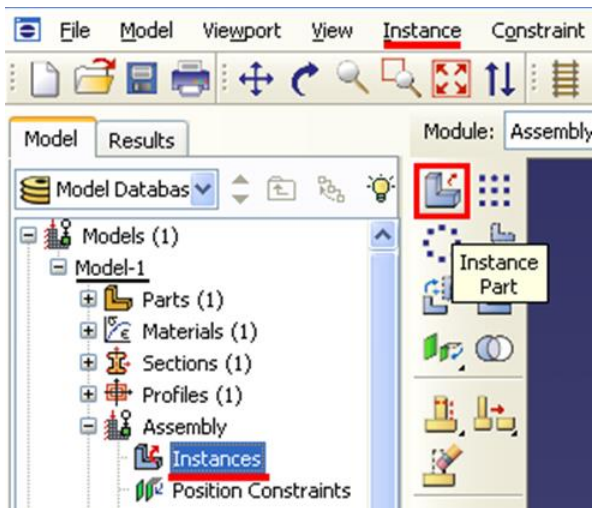


Рисунок 3.20 – Панель инструментов с кнопкой  Create Part Instance

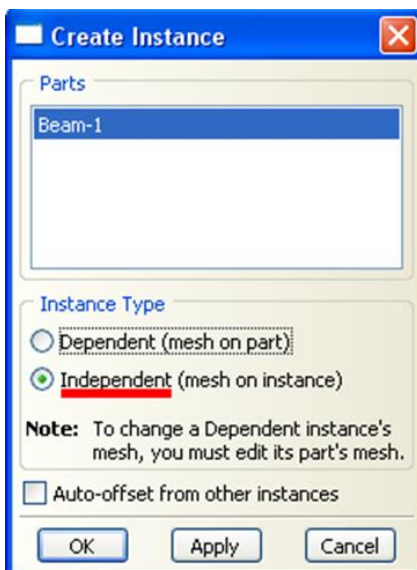


Рисунок 3.21 – Окно Create Instance

Появится окно со списком созданных деталей Parts. В нашем случае деталь всего одна, выберем её – она будет выделена красным цветом, в разделе **Instance Type** укажите **Independent** и подтвердите выбор, нажав **ОК**. Цвет балки поменялся на синий.

Перейдите к модулю **STEP** (Рисунок 3.22). Поскольку Abaqus представляет собой программный комплекс и использует разные решатели в зависимости от постановки задачи, необходимо определить, каким именно решателем мы будем пользоваться.

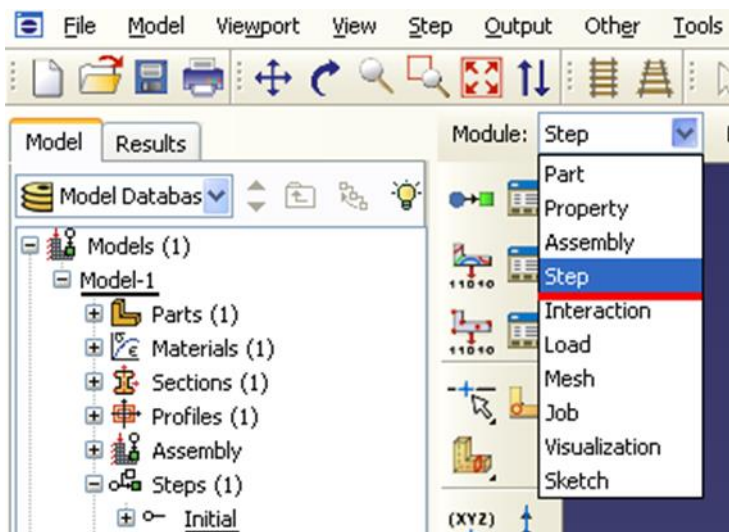




Рисунок 3.22 – Выбор модуля **STEP**

С помощью кнопки **Create Step**  (либо дважды кликните элемент  Steps (1) в дереве модели, либо с помощью команды меню **Step => Create**), создайте шаг расчёта.

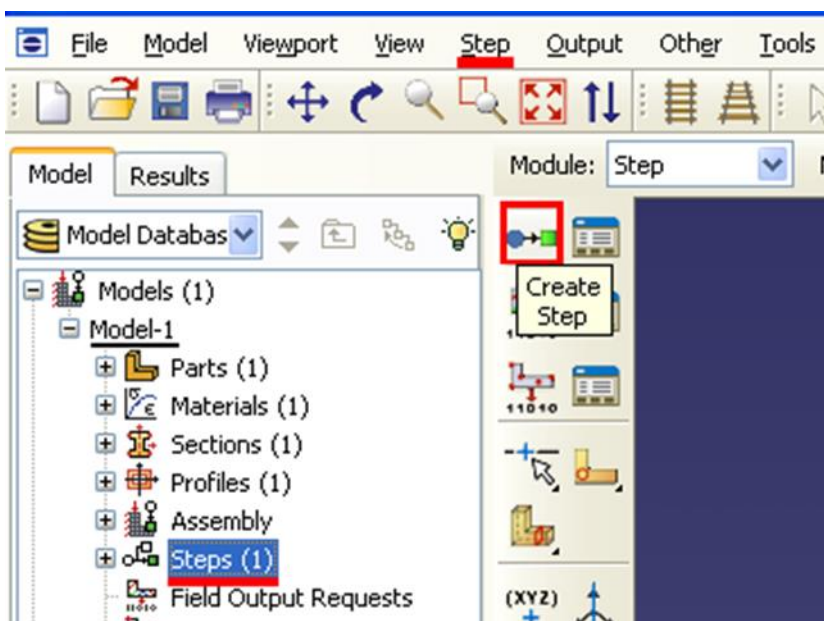


Рисунок 3.23 – Панель инструментов с кнопкой  **Create Step**

Появляется окно **Create Step** (Рисунок 3.24), в котором уже указан начальный шаг расчёта *Initial*. Задайте следующий шаг *Static, General* и

присвойте ему имя – *Loading*. Нажав на кнопку **Continue**, вызовите окно параметров шага расчёта **Edit Step** (Рисунок 3.25), В графе **Description** укажите тип решаемой задачи - Console Beam и нажмите **ОК**.

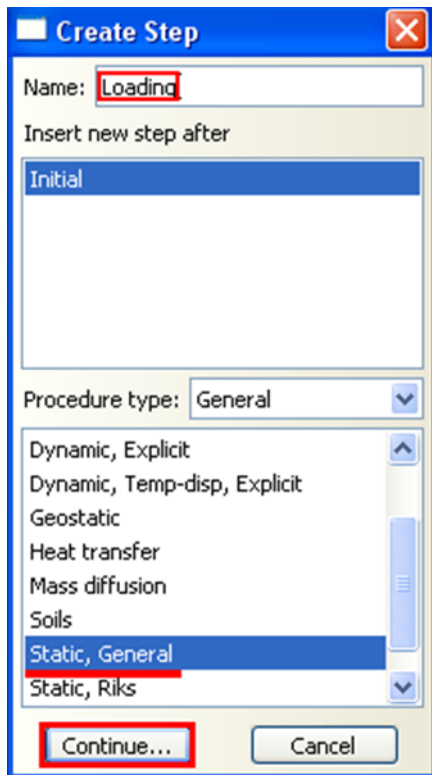


Рисунок 3.24 – Окно **Create Step**

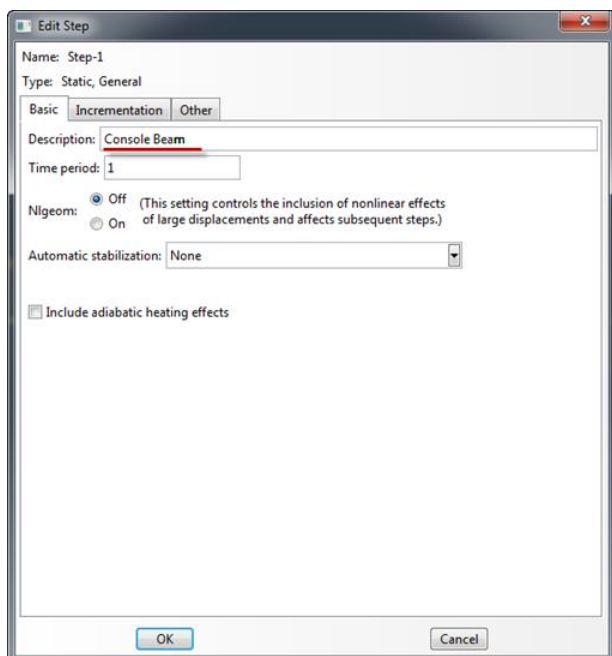





Рисунок 3.25- Окно **Edit Step**

В модуле **STEP** есть две важные функции,  **Create Field Output** и  **Create History Output** (Рисунок 3.26). Они позволяют задавать переменные, которые надо определить в ходе расчёта – напряжения,

деформации, энергии и т.п. Часть из них задаётся автоматически. Просмотреть заданные по умолчанию выходные параметры, а также внести изменения можно с помощью сопутствующих менеджеров – они есть в каждом модуле и вызываются одинаковыми иконками . Так же доступ к этим функциям можно получить через соответствующие элементы дерева модели, а доступ к их менеджерам – кликнув по названию правой кнопкой мыши и выбрав **Manager**.

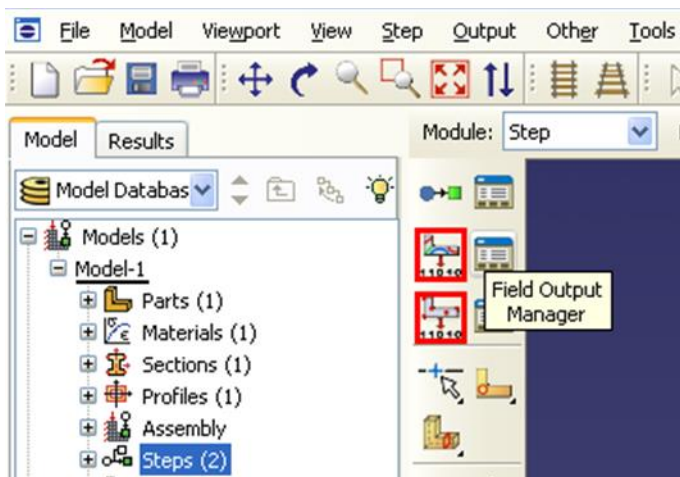


Рисунок 3.26 – Панель инструментов с кнопками  **Create Field Output** и  **Create History Output**

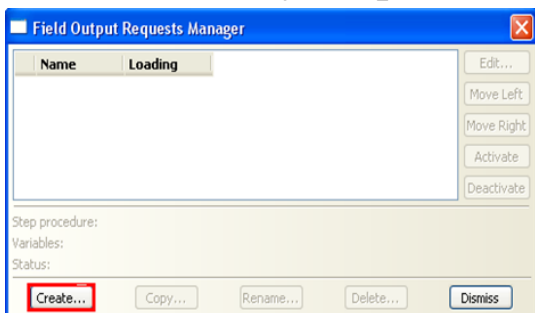



Рисунок 3.27 – Окно **Field Output Requests Manager**

С помощью кнопки  **Field Output Manager** (Рисунок 3.26) (либо с помощью команд меню **Output => Field Requests => Manager**) вызовите окно **Field**.

Output Requests Manager (Рисунок 3.27). Нажмите кнопку **Create**, появится окно **Create Field** (Рисунок 3.28). Нажимаем **Continue** для вызова окна **Edit Field Output Requests** (Рисунок 3.29), где мы можем выбрать необходимые выходные данные из списка. Отметьте, флажки так, как показано на рисунке 3.29.

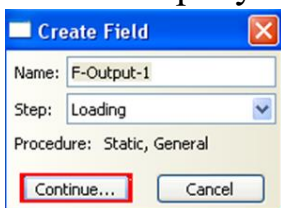


Рисунок 3.28 – Окно **Create Field**

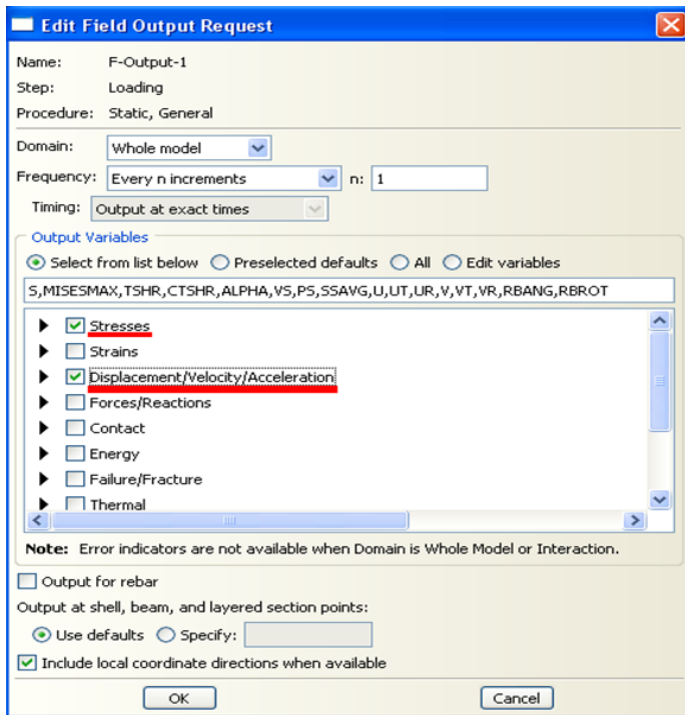


Рисунок 3.29 – Окно **Edit Field Output Requests**

Далее нажмите **OK** и закройте окно **Field Output Requests Manager** (Рисунок 3.27) кнопкой **Dismiss**.

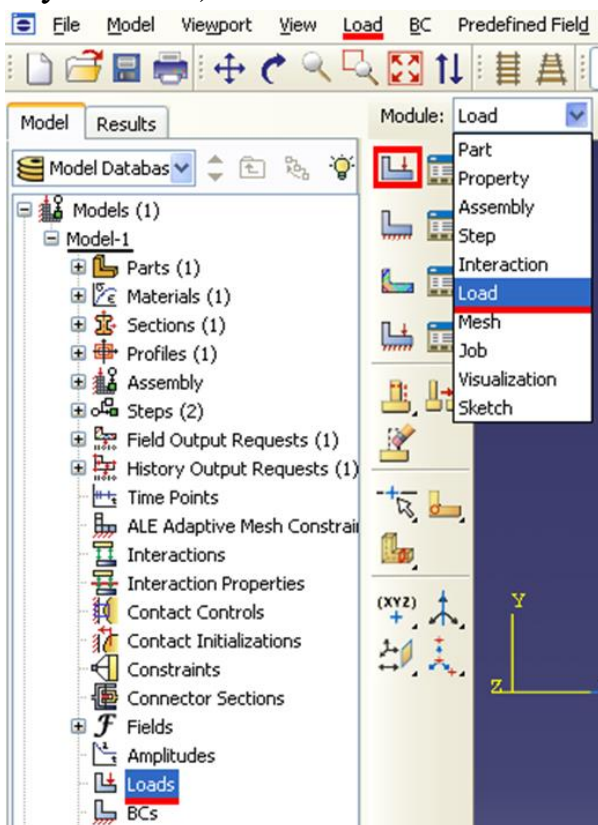




Рисунок 3.30 – Выбор модуля **LOAD** и панель управления с кнопкой **Create Load**

Перейдём к модулю **LOAD**. **LOAD** – модуль, предназначенный для создания нагрузок, прикладываемых к модели, а также начальных и

граничных условий. Зададим сосредоточенную силу, действующую на конец балки с помощью кнопки **Create Load**  (либо дважды кликнув по элементу дерева меню **Loads** , либо команд меню **Load => Create**). В появившемся окне **Create Load** (Рисунок 3.31) в графе **Step** укажите шаг *Loading*, на котором действует нагрузка. В графе присвойте имя *Tip Load*. Далее определите категорию **Category** нагрузки **Mechanical** и **Types for Selected Step** (тип нагружения), как сосредоточенная сила **Concentrated Force**.

Нажмите кнопку **Continue** и переходите к заданию точки приложения нагрузки. Укажете точку на конце балки, как показано на рисунке 3.32, нажимаем **Done**.

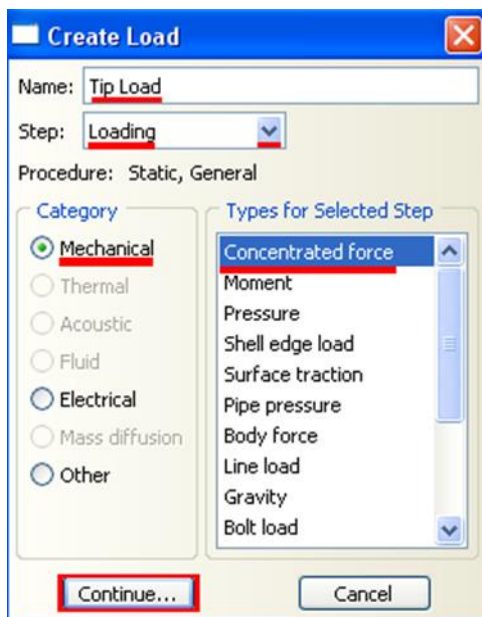



Рисунок 3.31 – Окно **Create Load**



Рисунок 3.32 – Точка на конце балки для задания воздействия

После этого откроется окно **Edit Load** (Рисунок 3.33), где мы задаём величину сосредоточенной силы $CF2 = -1$. Нажатием кнопки **OK** подтвердите выбор. Нагрузка на балку задана.

Затем приступим к заданию граничных условий на свободном конце балки. Для этого используйте кнопку **Create BC**  (либо дважды щелкните по элементу дерева модели, либо команды меню **BC => Create**).

В появившемся окне **Create Boundary Condition** (Рисунок 3.35) задайте на шаге **Initial** категорию граничного условия **Mechanical** и его тип **Symmetry/Antisymmetry/Encastre**. Присвойте граничному условию имя *BeamBound*, и нажмите кнопку **Continue**.

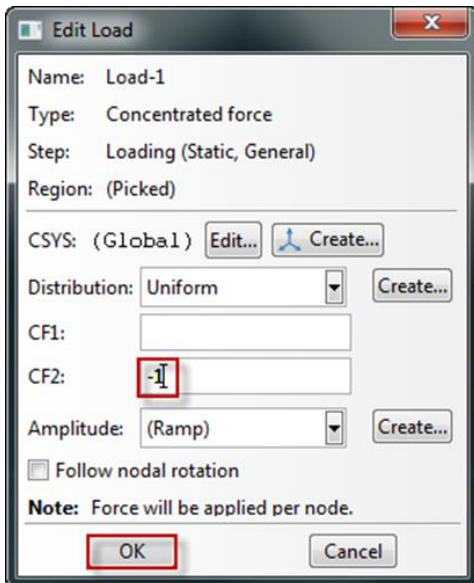


Рисунок 3.33 – Окно **Edit Load**

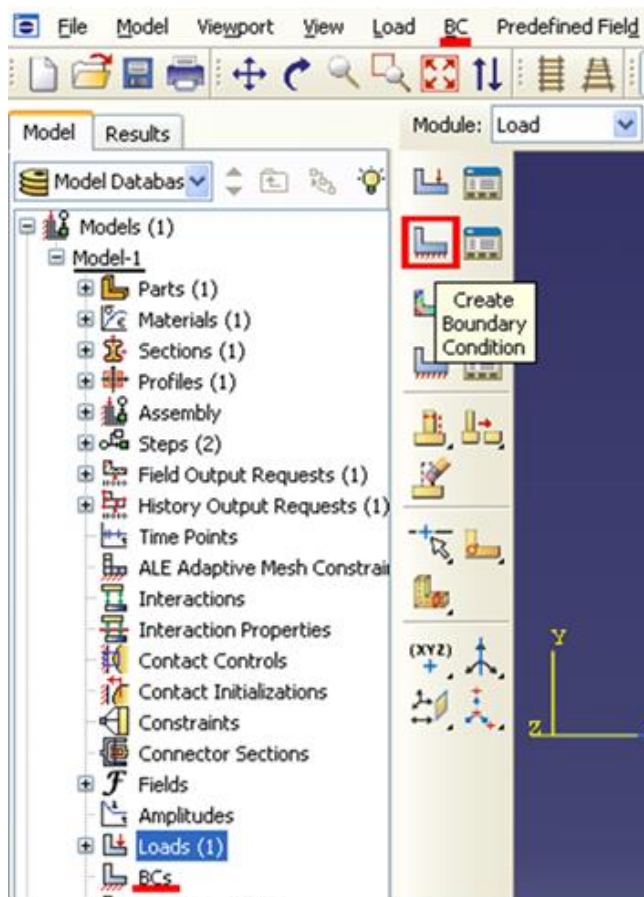


Рисунок 3.34 – Панель инструментов с кнопкой **Create Boundary Condition**

Укажите на свободный конец балки, как это показано на рисунке 3.36.

Подтвердите выбор нажатием кнопки **Done**. После этого откроется следующее окно **Edit Boundary Condition** (Рисунок 3.37). В нем выберите последнюю графу **Encastre**, то есть нулевые линейные и угловые перемещения в указанной точке, и нажмите **OK**. Граничные условия заданы.

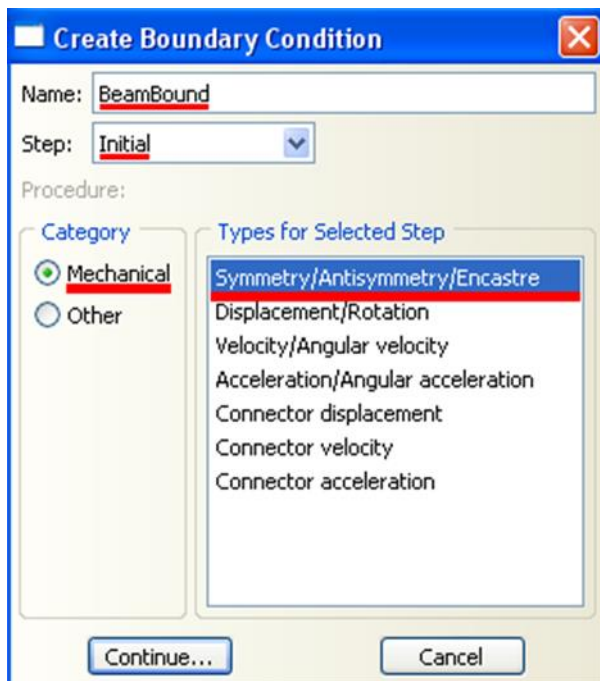




Рисунок 3.35 – Окно **Create Boundary Condition**



Рисунок 3.36 - Точка на конце балки для задания граничных условий

Следующим этапом является создание конечно-элементной сетки. В **Abaqus/CAE** для создания сетки и ассоциации свойств конечных элементов с заданными свойствами, предназначен модуль **Mesh**. Перейдите в модуль **MESH** (Рисунок 3.38).

Прежде, чем построить сетку, надо определить размеры элементов. С этой целью в **Abaqus/CAE** используется опция **Seed**, создающая узлы будущей сетки. Нажмите на кнопку  **Seed Part Instance** и продолжайте удерживать треугольную закладку в ее нижнем правом углу, пока не появится подменю, в котором выберите кнопку  **Seed Edge By Number** (Рисунок 3.39), либо воспользуйтесь командами меню **Seed => Edge By Number**. С помощью мыши выделите балку и в окне на панели инструкций задайте количество элементов вдоль неё – 10 (Рисунок 3.40).

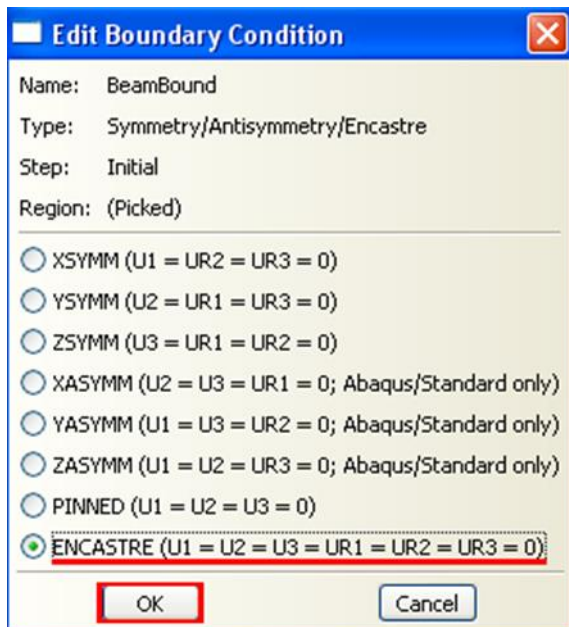


Рисунок 3.37 – Окно **Edit Boundary Condition**

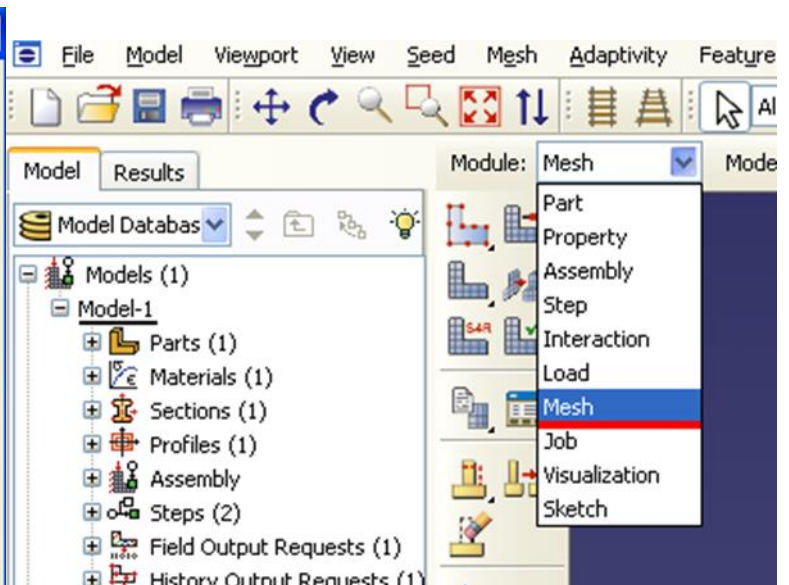


Рисунок 3.38 – Выбор модуля **MESH**

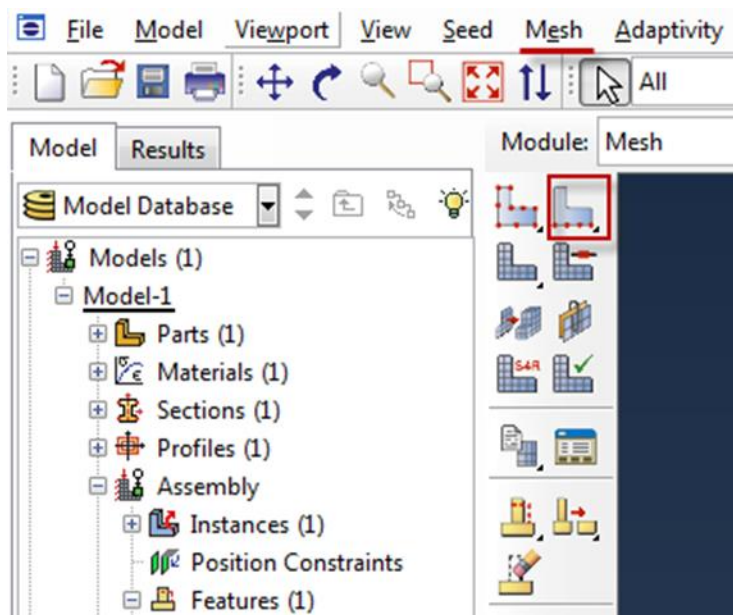


Рисунок 3.39 – Панель инструментов с кнопкой **Seed Edge By Number**

Подтвердив ввод клавишей **Enter**, вы увидите на балке ряд окружностей, обозначающих предполагаемые положения узлов сетки. Нажмите кнопку **Done**. Затем необходимо задать тип конечных элементов, на основе которых будет построена конечно-элементная модель балки. Кнопка **Assign Element Type** (Рисунок 3.41) или команды меню **Mesh => Element Type** вызывает окно выбора типа конечных элементов сетки (Рисунок 3.42).

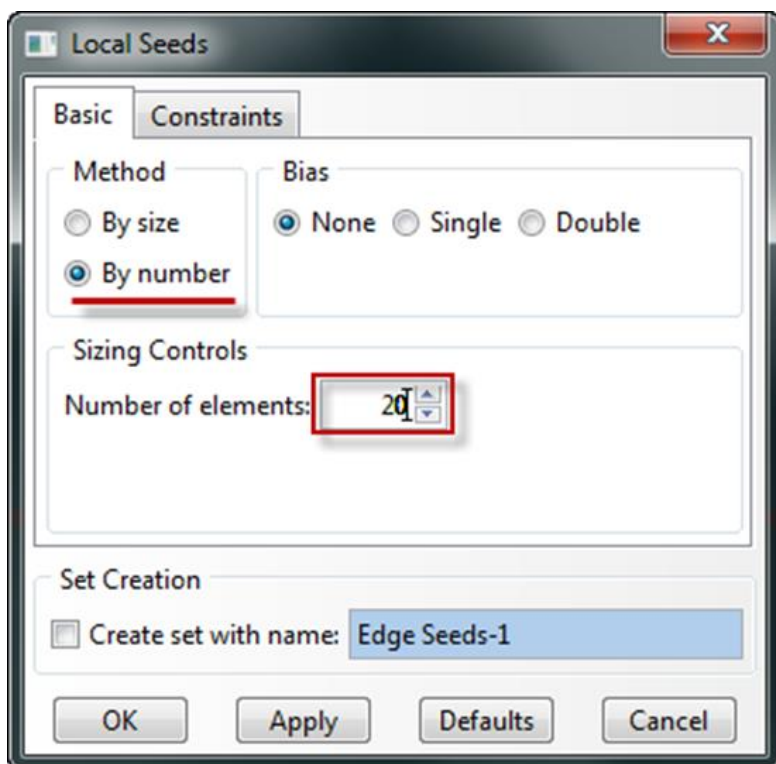


Рисунок 3.40 окно **Local Seeds**

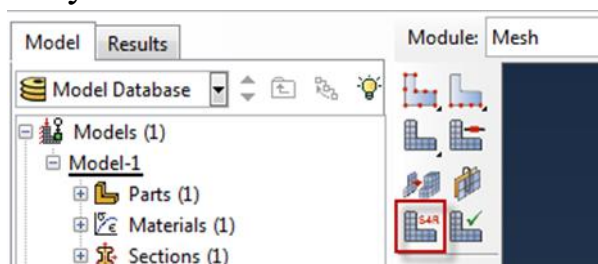





Рисунок 3.41 – Панель инструментов с кнопкой  **Assign Element Type**

Выберите тип элемента B21H, как это показано на рисунке, задав линейный порядок элемента, содержащегося в стандартной библиотеке, из разряда балочных, работающего на сдвиг в гибридной формулировке.

Вид конечно-элементной модели представлен на рисунке 3.44.

Выполнив описанные операции необходимые для построения сетки, нажмите кнопку **Mesh Part Instance**  или используйте команды меню **Mesh – Part Instance – Create** (Рисунок 3.43). Нажмите **YES** (Рисунок 3.44) и балка покроется одномерной сеткой. Конечно - элементная модель готова.

Перейдите к модулю **JOB** (Рисунок 3.45). С помощью кнопки  **Create Job** (Рисунок 3.46) (либо команд меню **Job => Create**, или дважды кликнув по элементу  в дереве модели) создайте задание на расчёт. В появившемся окне **Create Job** (Рисунок 3.47), присвойте заданию имя *Beam2D-Bending*. Имя необходимо задавать уникальным. Это позволит избежать путаницы, когда у Вас накопится значительное число расчётов.

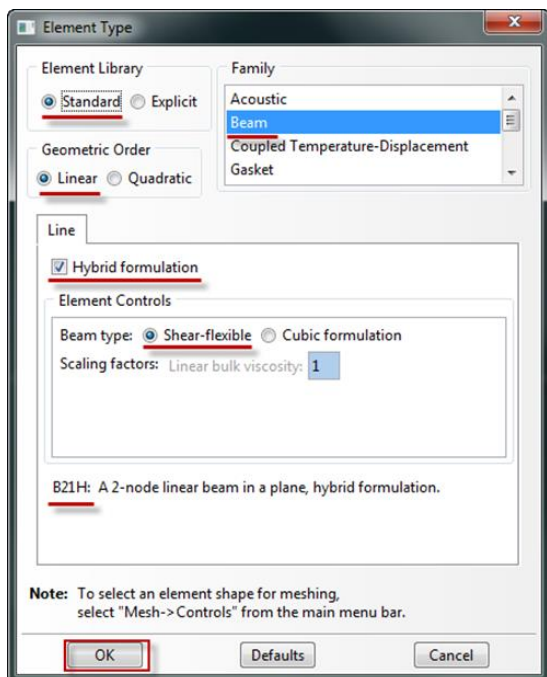


Рисунок 3.42 – Окно **Element Type**

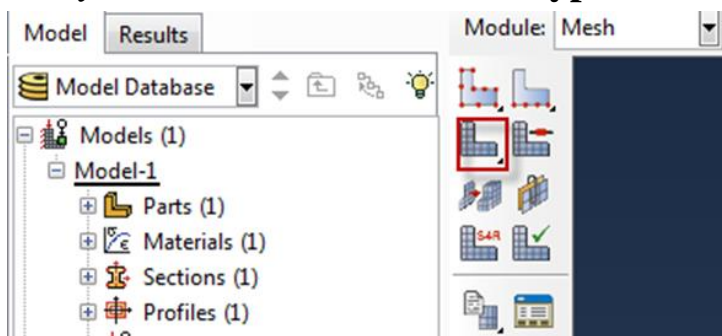


Рисунок 3.43 – Панель инструментов с кнопкой **Mesh Part Instance**



Рисунок 3.44 - Вид конечно-элементной модели

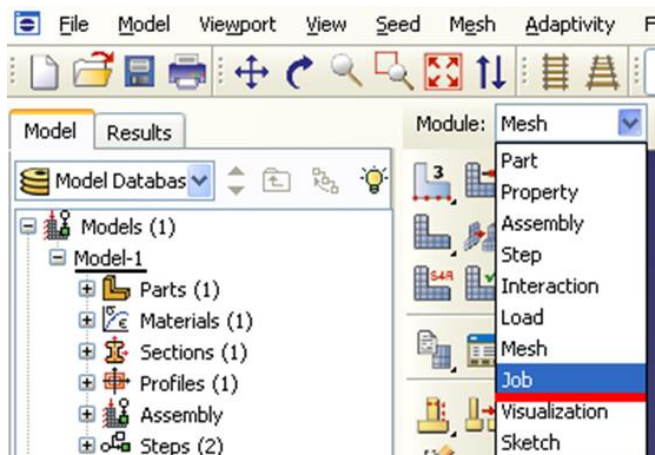


Рисунок 3.45 – Выбор модуля **JOB**

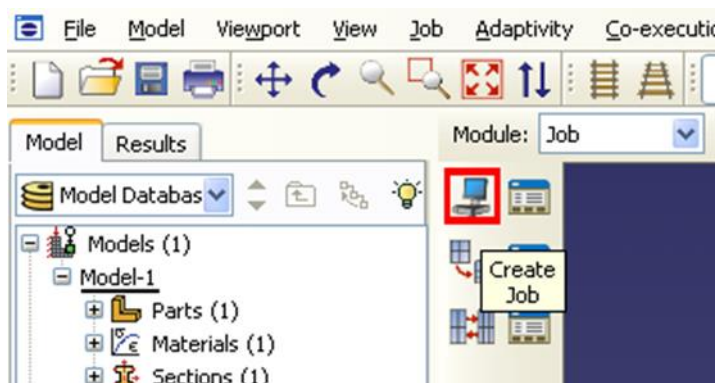


Рисунок 3.46 – Панель инструментов с кнопкой **Create Job**

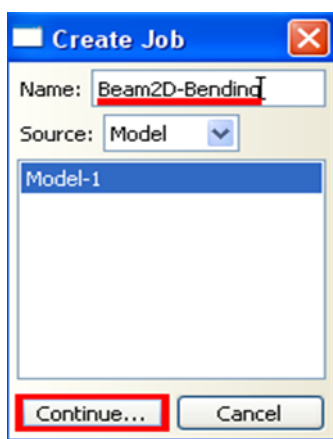


Рисунок 3.47 – Окно **Create Job**

Для продолжения нажмите кнопку **Continue** и в окне **Edit Job** (Рисунок 3.48), задайте тип вычисления **Full Analysis**, очередность выполнения **Background** и время запуска **Immediately**. Можете также указать описание выполняемой работы (*Bending static*). Это удобно, когда к модели прикладываются различные нагрузки, граничные условия или существует несколько шагов расчёта. Подтвердите ввод нажатием кнопки **OK**. Задание на расчёт сформировано.

Чтоб запустить расчёт, вызовите **Job Manager** (Рисунок 3.49) (либо раскройте элемент **Jobs** дерева модели, кликните правой кнопкой по заданию **Beam2D-Bending** и выберите **Submit**, либо командами меню **Job => Manager**).

В появившемся окне **Job Manager** (Рисунок 3.50) нажмите **Submit**. Надпись **Running** говорит о начале работы процесса.

Abaqus/CAE в процессе работы позволяет производить мониторинг расчёта. Для этого необходимо нажать **Monitor** в окне **Job Manager** (Рисунок 3.50).

Открылось диалоговое окно мониторинга (Рисунок 3.51). Верхняя половина этого диалогового окна отображает информацию, доступную в файле состояний (**.sta**), который Abaqus создаёт при запуске расчёта. Этот файл содержит краткую сводку о ходе выполнения задания.

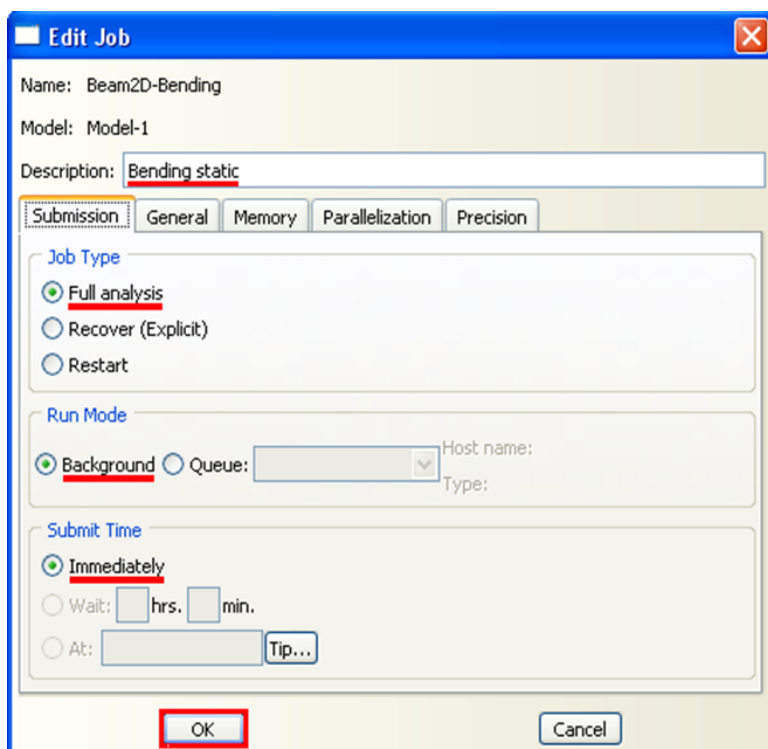


Рисунок 3.48 – Окно Edit Job

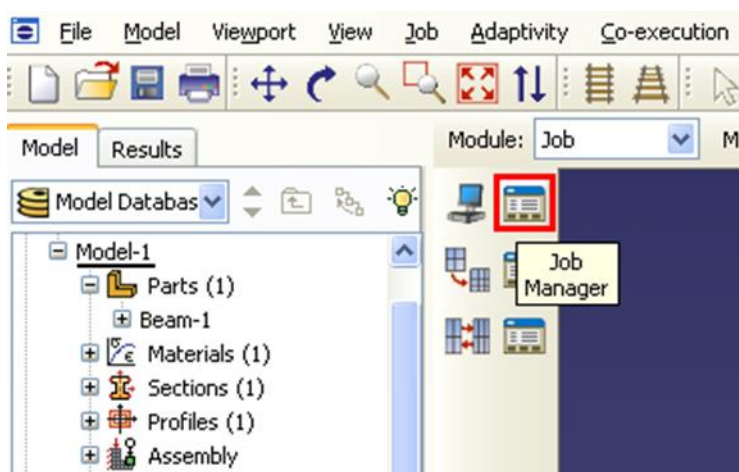


Рисунок 3.49 – Панель инструментов с кнопкой Job Manager

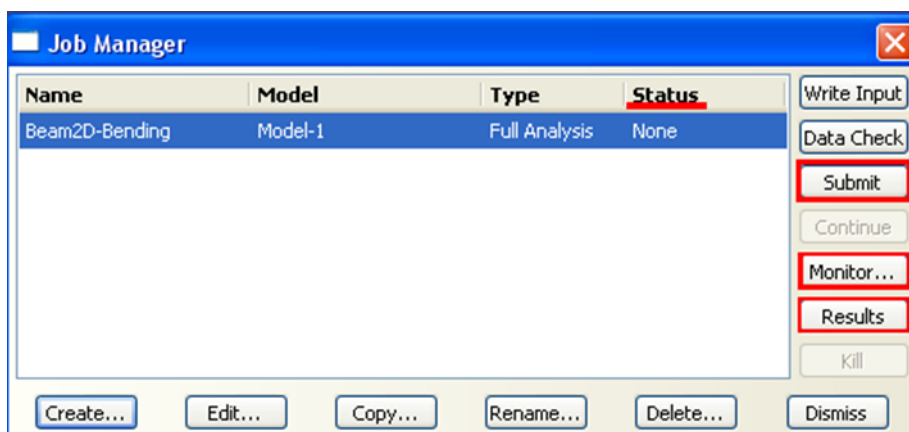


Рисунок 3.50 – Окно Job Manager

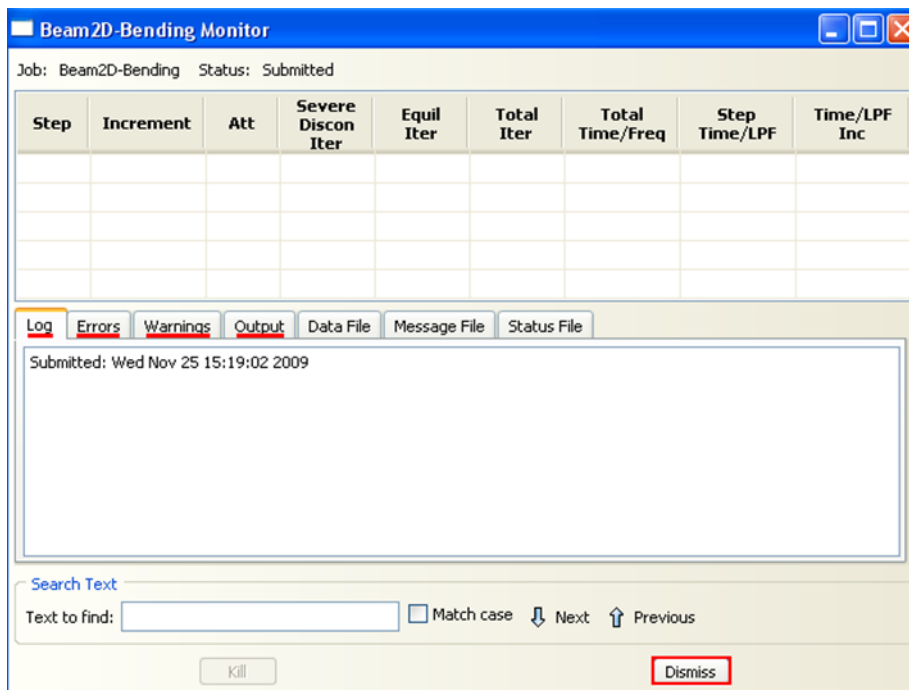


Рисунок 3.51 – Диалоговое окно мониторинга

Нижняя часть окна отображает следующую информацию:

В закладке Log, отображаются начальное и конечное время анализа, а также этап выполнения расчёта и краткие сообщения о возникновении критических ошибок. Отображаемые данные сохраняются в файле журнала (.log).

В закладках Errors и Warnings, отображаются критические ошибки или предупреждения, которые появляются в файле данных (.dat) и сообщений (.msg). Если конкретная область модели порождает ошибку или предупреждение, то автоматически будет создан узел или набор элементов, которые содержат эту область. Вместе с сообщением об ошибке или предупреждении появляется имя узла или набора элементов, и вы можете видеть этот набор с помощью дисплейной группы в модуле Visualization.

Пока не будут исправлены причины, порождающие сообщения об критических ошибках, выполнение анализа будет невозможно. Кроме того, всегда следует проанализировать любые предупреждающие сообщения, чтобы определить, не нужны ли какие-либо корректирующие действия или эти сообщения можно безопасно проигнорировать.

Abaqus/CAE ограничивает количество сообщений об ошибках и предупреждениях, которые могут появиться в мониторе задания (по умолчанию эти пределы составляют 10 для сообщений об ошибках и 50 для предупреждающих сообщений). Если пределы для сообщений превышены, то информацию о дополнительных ошибках и предупреждениях можно найти в упомянутых файлах (.sta, .dat, .msg).

В закладке Output, отображаются названия рассчитанных этапов анализа, записанных в базу данных результатов .odb.

Щелкните Dismiss, чтобы закрыть диалоговое окно мониторинга задания.

Когда в окне **Job Manager** (Рисунок 3.50) статус сменится на **Completed**, нажимайте кнопку **Results**, чтобы просмотреть результаты расчёта.

Вы автоматически перейдёте в модуль **VISUALISATION**. Кнопка **Fast Plot Deformed** показывает вид деформированной модели, кнопка **Plot Undeformed** (Рисунок 3.52) возвращает исходную модель, кнопка **Plot Contour** отображает распределение по модели результирующей переменной, по умолчанию – напряжения по Мизесу, в виде цветовых градаций. Как обычно, все эти кнопки продублированы одноименными командами в меню **Plot**. Вы можете заказать распределение любой переменной, используя команду меню **Result => Field Output**. В возникшем окне, укажите интересующую вас переменную.

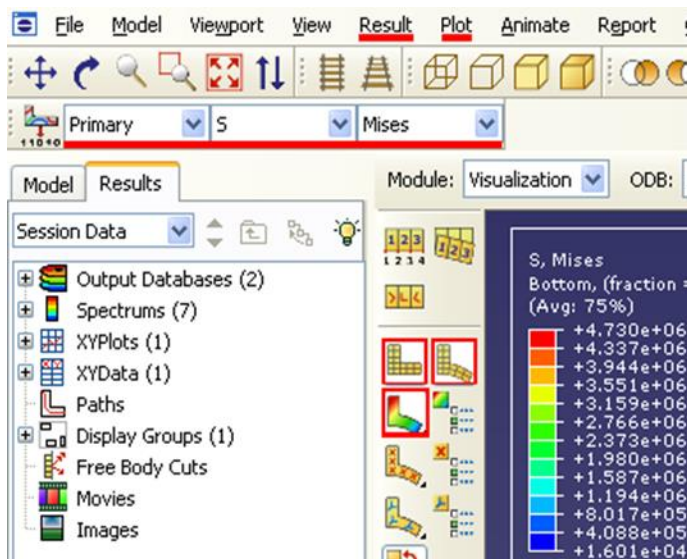


Рисунок 3.52 - Панель инструментов модуля **VISUALISATION**

Выведем на экран нумерацию узлов и элементов нашей балки. Для этого воспользуемся кнопкой **Common Options** (Рисунок 3.53)

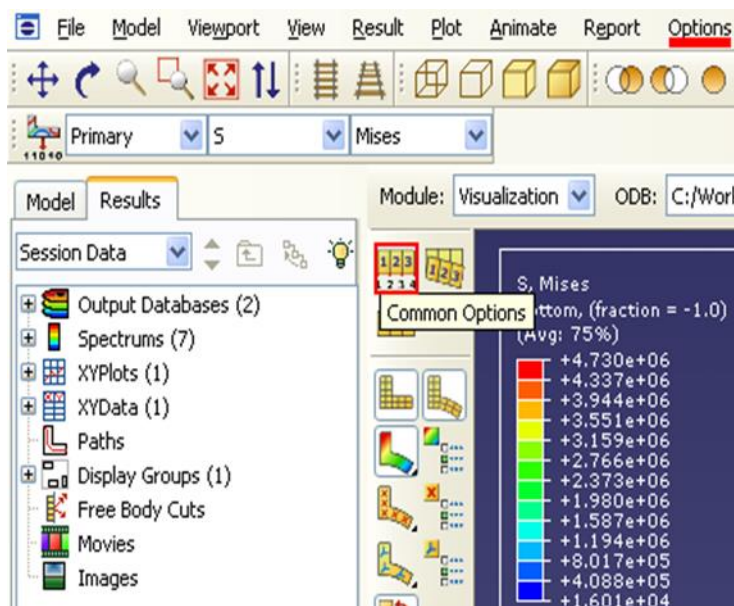


Рисунок 3.53 – Панель инструментов с кнопкой **Common Options**

В появившемся окне **Common Plot Options** выбираем закладку **Labels** и ставим галочки так, как показано на рисунке 3.54. Также в этом окне можно изменить масштабный коэффициент деформации (через закладку **Basic**).

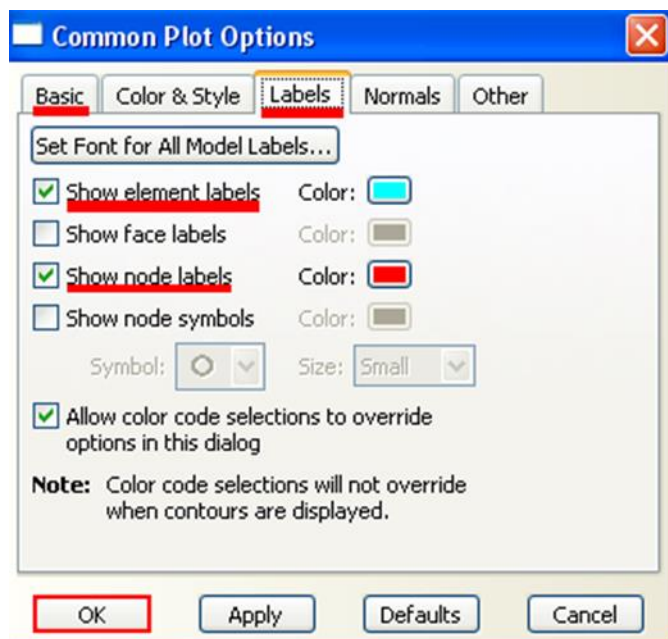


Рисунок 3.54 – Окно Common Plot Options

Сгенерируем отчёт:

В главном меню выберите Report => Field Output.



Рисунок 3.55 – Выбор Field Output

В появившемся окне с закладкой **Variable** диалогового окна **Report Field Output** (Рисунок 3.56) примите позицию, отмеченную как **Integration Point**. Щелкните по треугольнику рядом с **S:Stress components**, чтобы открыть список доступных переменных. В этом списке включите **S11**.

На странице с закладкой **Setup** введите название отчёта **balka.rpt**. В области **Data** в нижней части страницы выключите опцию **Column total**. Щелкните **Apply**.

Напряжения элементов будут записаны в файл отчета. На странице с закладкой **Variable** диалогового окна **Report Field Output** измените позиционирование на **Unique Nodal**. Выключите **S:Stress components**, и выберите **Magnitude** из списка доступных переменных **U:Spatial displacement**. Щелкните **Apply**.

В отчёт будут добавлены перемещения в узлах, а окно **Report Field Output** закроется.

Откройте в текстовом редакторе файл **balka.rpt**. Ниже показано содержимое этого файла (Рисунок 3.57). Ваша нумерация узлов и

элементов может отличаться от представленной. Малые величины могут быть вычислены несколько иначе в зависимости от вашей системы.

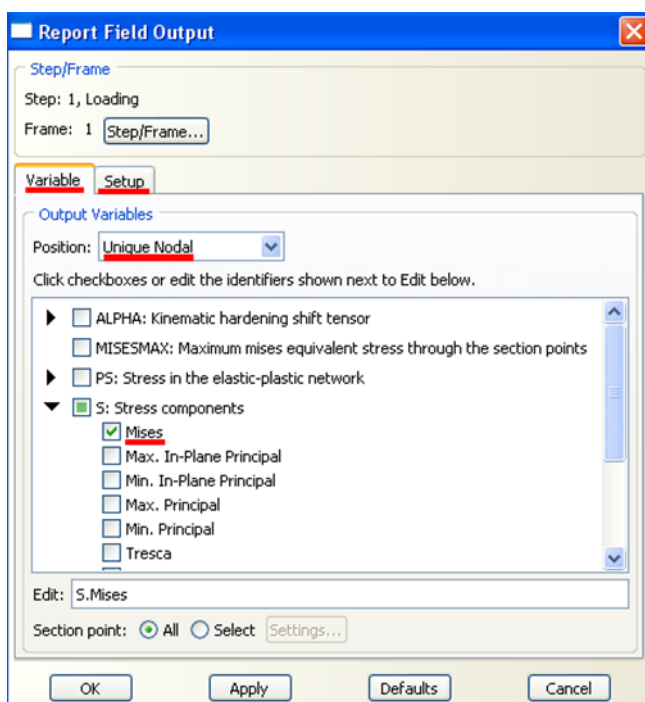


Рисунок 3.56 – Окно Report Field Output

```
Source 1
-----
ODB: C:/Work/Beam2D-Bending.odb
Step: Loading
Frame: Increment      1: Step Time = 1.000

Loc 1 : Integration point values at beam < rectangular > < elset =
ASSEMBLY_BEAM-1-1_PICKEDSETS > from source 1 : Bottom, (fraction = -1.0)
Loc 2 : Integration point values at beam < rectangular > < elset =
ASSEMBLY_BEAM-1-1_PICKEDSETS > from source 1 : Top, (fraction = 1.0)

Output sorted by column "Element Label".

Field Output reported at integration points for part: BEAM-1-1

      Element      Int      S.S11      S.S11
      Label        Pt        @Loc 1    @Loc 2
-----
      1            1        -22.8E+03  22.8E+03
      2            1        -20.4E+03  20.4E+03
      3            1        -17.9999E+03  18.0001E+03
      4            1        -15.5999E+03  15.6001E+03
      5            1        -13.1999E+03  13.2001E+03
      6            1        -10.7999E+03  10.8001E+03
      7            1         -8.39985E+03  8.40015E+03
      8            1         -5.99984E+03  6.00016E+03
      9            1         -3.59983E+03  3.60017E+03
     10           1         -1.19983E+03  1.20017E+03

Minimum
  At Element      S.S11      S.S11
  Int Pt          @Loc 1    @Loc 2
-----
Minimum
  At Element      -22.8E+03  1.20017E+03
  Int Pt          1          10
  Int Pt          1          1

Maximum
  At Element      -1.19983E+03  22.8E+03
  Int Pt          10          1
  Int Pt          1          1


Total
      -119.999E+03  120.001E+03
```

Рисунок 3.57 – Содержимое файла **balka.rpt**.

Построим график перемещений X-Y в узлах сетки по длине балки. Для этого необходимо построить путь, вдоль которого будет построен график.

Путь представляет собой линию, которая определяется заданием серии номеров узлов конечных элементов модели.

Создадим путь:

Щелкните по инструменту  (Рисунок 3.58), чтобы отобразить контурный график модели.

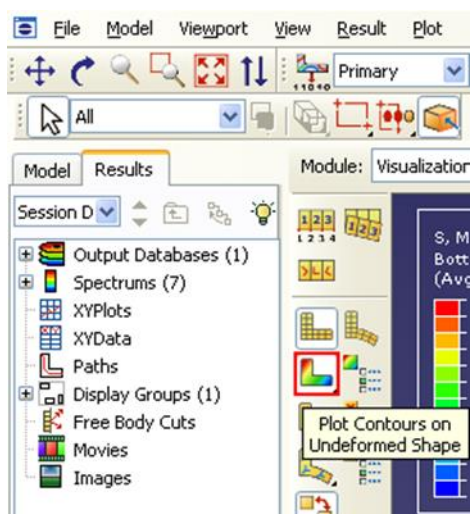


Рисунок 3.58 – панель инструментов с кнопкой 

Чтобы отобразить номера узлов, используйте диалоговое окно Common Plot Options (Рисунок 3.54).

В Дереве Результатов дважды щелкните Paths (Рисунок 3.59).

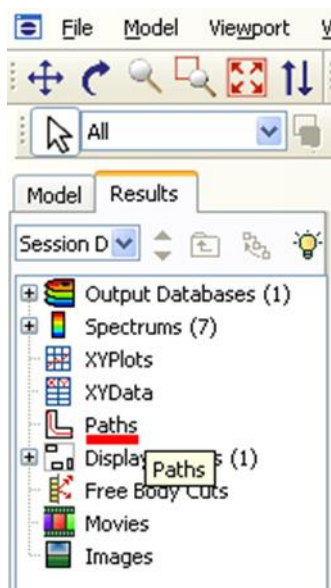


Рисунок 3.59 – Дерево Результатов

Появится диалоговое окно Create Path (Рисунок 3.60).

Дайте пути имя **Displacement**. Примите выбор по умолчанию Node list в качестве типа пути, и щелкните Continue.

Появится диалоговое окно Edit Node List Path (Рисунок 3.61). В поле Node Labels наберите **1:11:1** и нажмите ОК. (Этот ввод задаст диапазон узлов от 1 до 11 с шагом 1). В качестве альтернативного способа вы можете

указать узлы списка непосредственно в окне просмотра, щелкая Add Before... или Add After... в диалоговом окне Edit Node List Path.

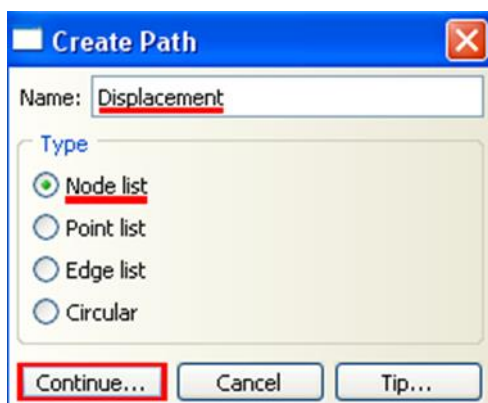


Рисунок 3.60 – Окно Create Path

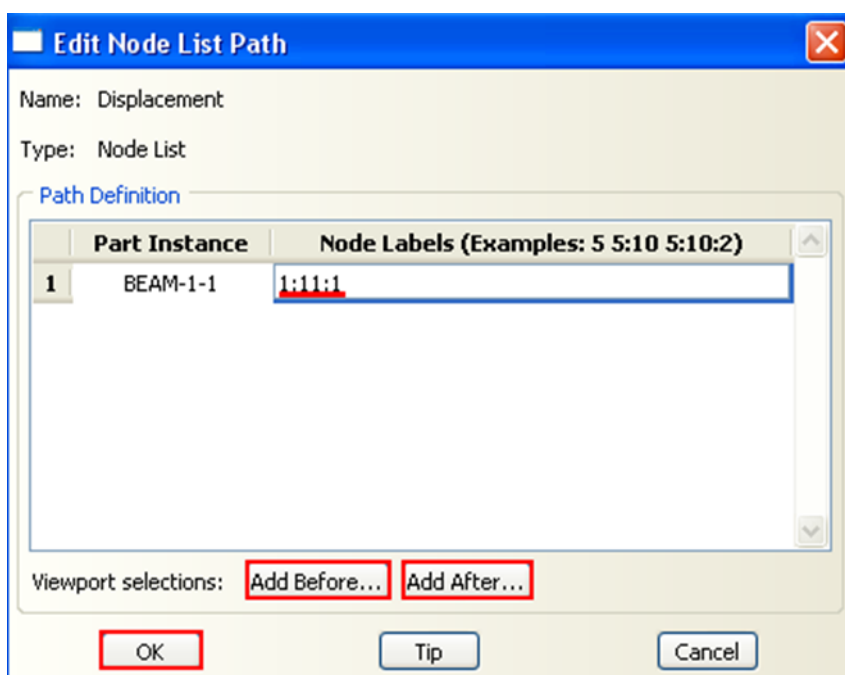


Рисунок 3.61 – Окно Edit Node List Path.

Выбранный путь будет подсвечен на геометрии модели в текущем окне просмотра. Щелкните ОК, чтобы создать путь закрыть диалоговое окно Edit Node List Path.

Построим график с использованием созданного пути: В Дереве Результатов дважды щелкните по контейнеру XYData (Рисунок 3.62). Щелкните Plot, чтобы создать X-Y график вдоль пути.

В появившемся диалоговом окне Create XY Data (Рисунок 3.63) выберите Path и щелкните Continue.

Появится диалоговое окно XY Data from Path (Рисунок 3.64). В выпадающем меню Path выберите созданный путь. Оставьте без изменений параметры в области X Values **текущего** диалогового окна. В области Y Values диалогового окна выбирается переменная для вывода по оси Y графика. В качестве выводимой переменной выберем U,U2 – перемещения

в узлах балки по оси Y. Для этого необходимо щёлкнуть на кнопке Field Output, и в появившемся окне выбрать переменную U2, после чего нажать кнопку **ОК** (Рисунок 3.65).

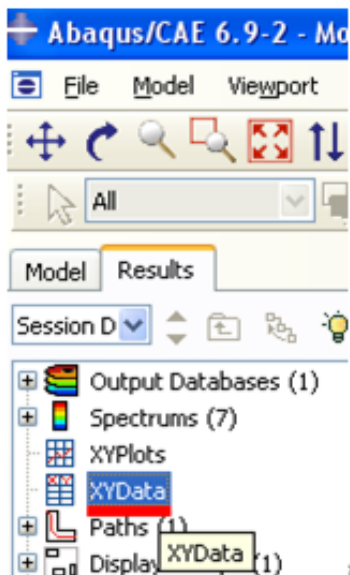


Рисунок 3.62 – Выбор XYData

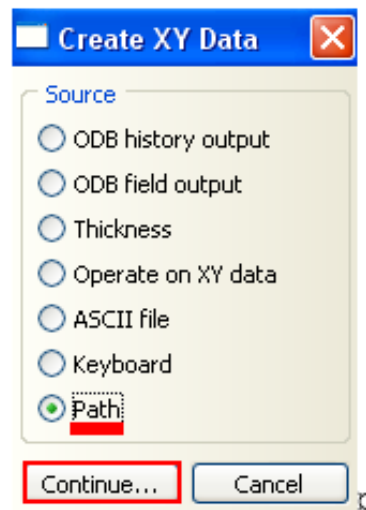


Рисунок 3.63 – Окно Create XY Data

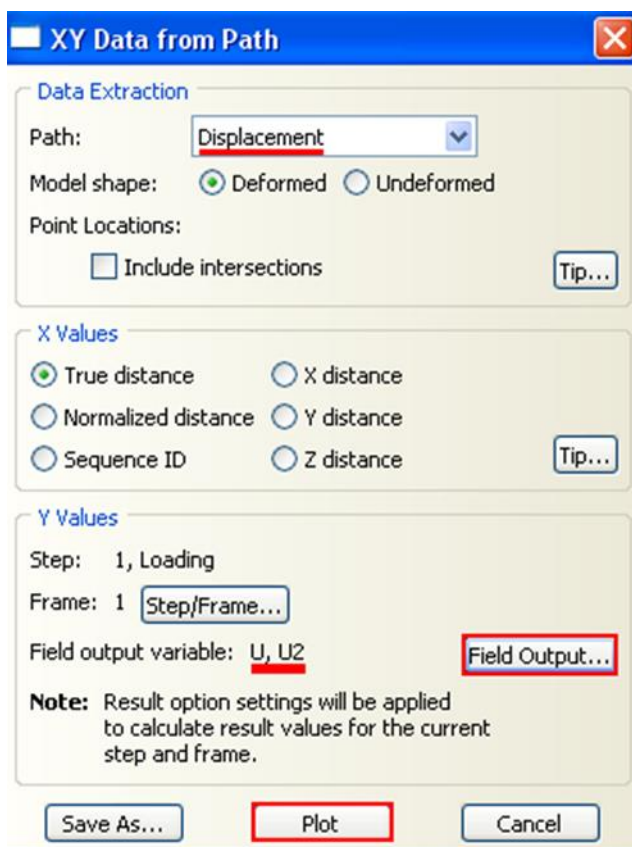


Рисунок 3.64 – Окно XY Data from Path

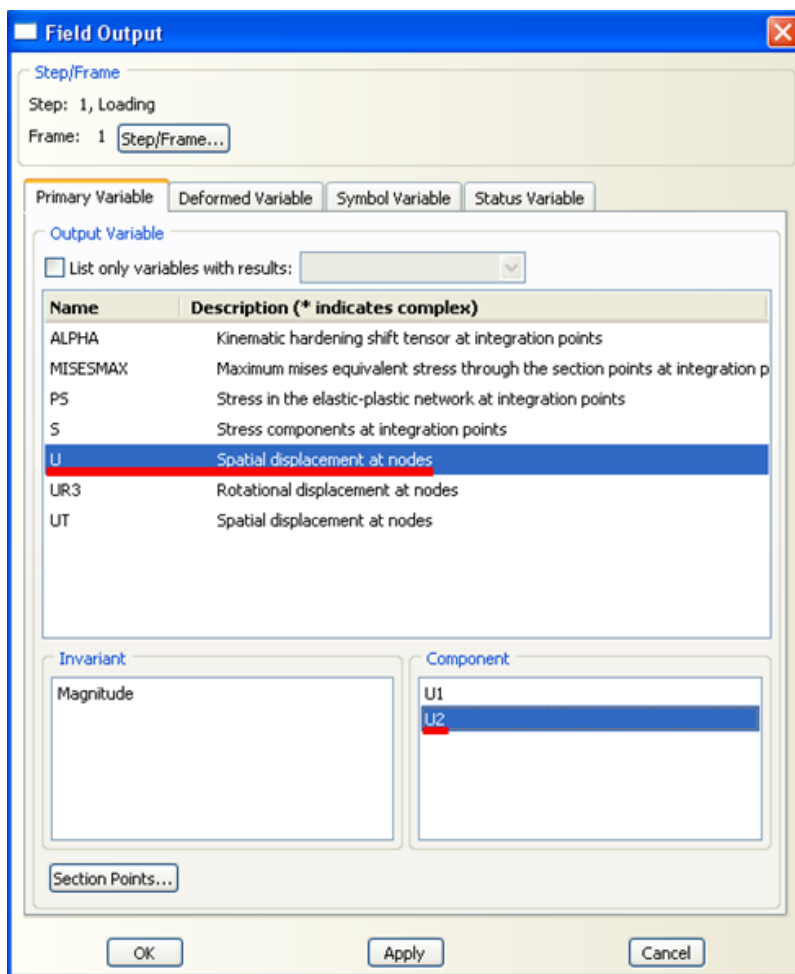


Рисунок 3.65 – Окно Field Output

Итоговый график имеет вид, представленный на рисунке 3.66

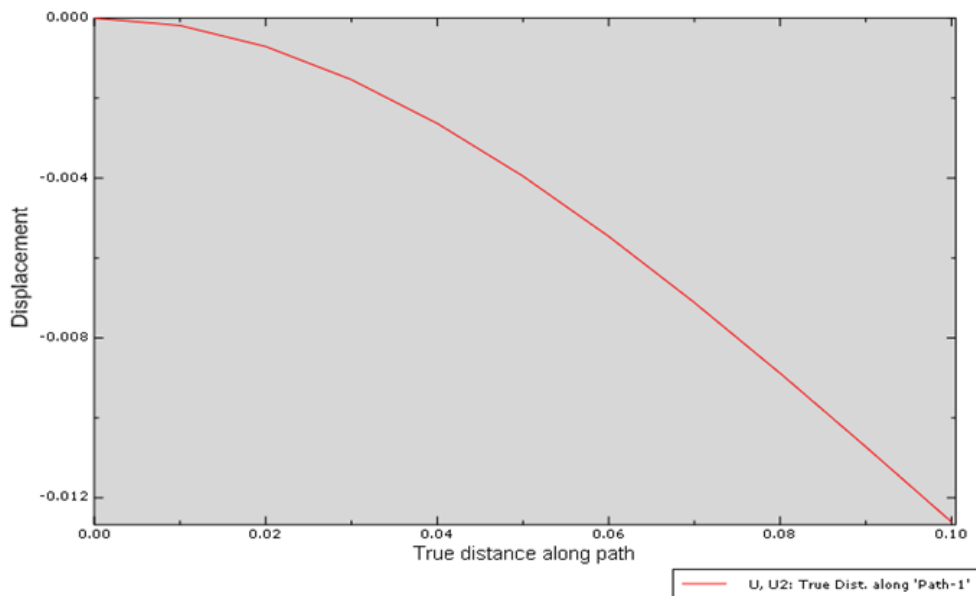


Рисунок 3.66 – Итоговый график расчёта

Окончательное решение имеет вид:

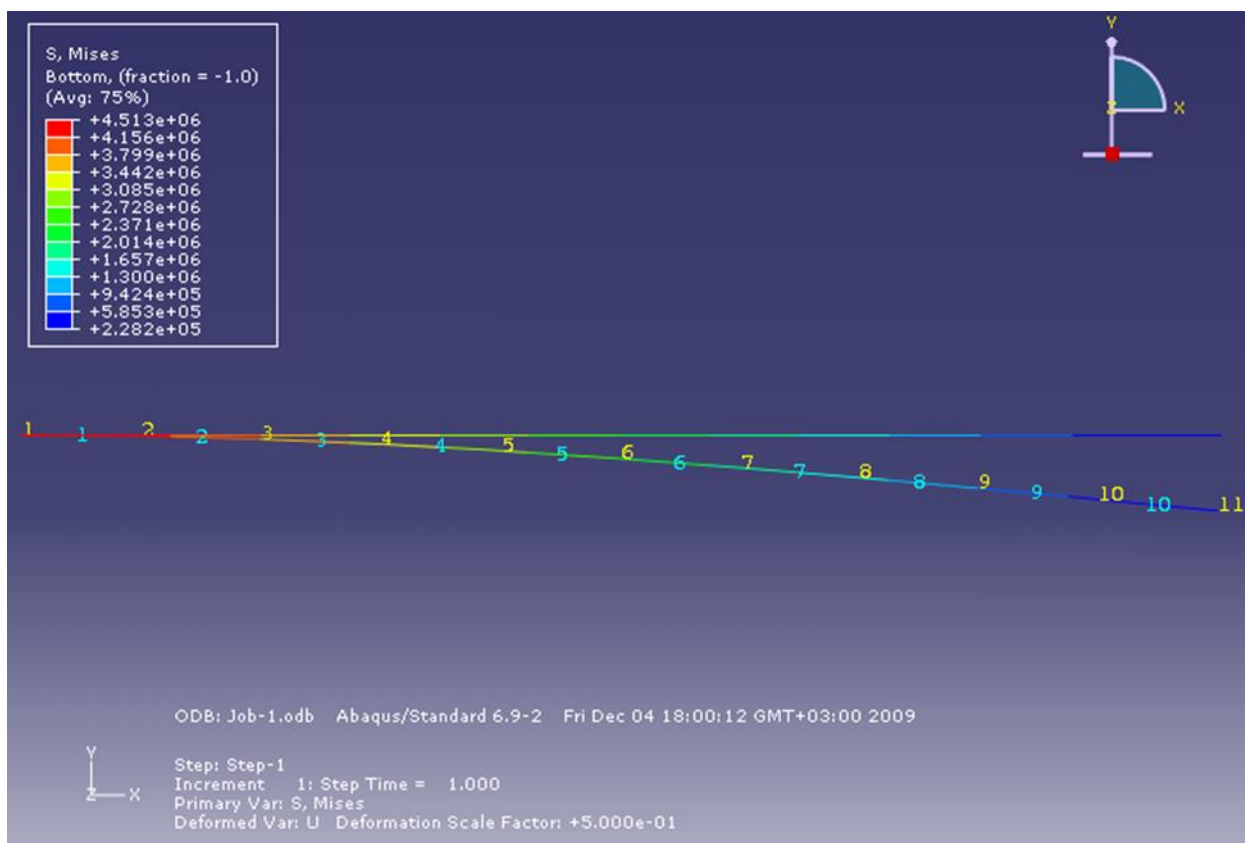


Рисунок 3.67 – Окончательное решение расчёта

Глава 4. Моделирование динамической задач.

Рассмотрим задачу о свободных колебаниях балки, возбуждаемых при мгновенном снятии действующей нагрузки. Используем ранее созданную в Главе 1 модель, добавив необходимые расчётные этапы. Модель из Главы 1 содержит балку, закреплённую с одного конца и нагруженную сосредоточенной силой на другом. Для того чтобы создать модель свободных колебаний балки, потребуется добавить к созданной ранее модели новый расчётный шаг, на котором заданная нагрузка будет снята.

Откройте файл, содержащий модель балки, и сохраните, присвоив ей новое имя.

Для проведения расчёта необходимо создать копию модели, результаты расчёта которой уже есть. Для этого необходимо вызвать менеджер моделей, используя команду меню **Model => Copy Model** и скопировать **Model-1** в **Model-2** (Рисунок 4.1). Все дальнейшие действия будут проводиться с новой моделью.

Создадим новый шаг анализа – линейный динамический расчёт. Для этого перейдите в модуль **STEP**. Дважды кликните по элементу **STEPS** в дереве модели, либо запустите модуль менеджер, отвечающий за создание и редактирование шагов анализа **Step – Manager**, или создайте новый шаг, используя кнопку **Create Step**. Выберите **Procedure type => General**, метод

анализа – **Dynamic, Implicit**. Назовите шаг *Dynamic Loading* (Рисунок 4.1). Обратите внимание, чтобы в поле *Insert new step after* был выбран шаг анализа *Loading* – новый расчётный шаг будет создан после выделенного в данном поле.

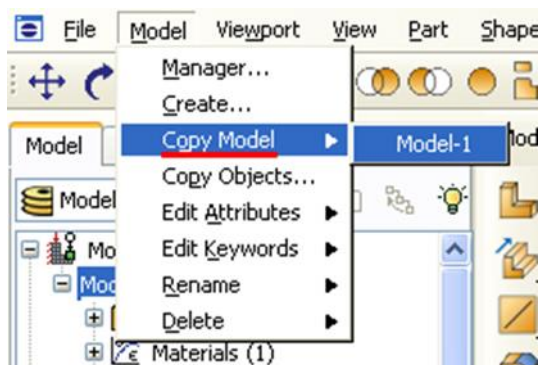


Рисунок 4.1 – Копирование модели

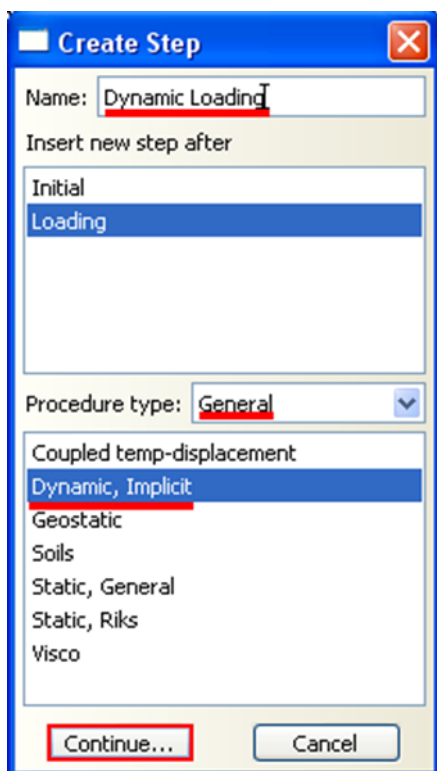


Рисунок 4.2 – Окно **Create Step**

В окне **Edit Step** задайте параметры по выбору шага по времени. В **Basic** укажите описание *Free Beam* и в поле **Time period**, задайте время, в течение которого будут рассматриваться свободные колебания балки – 3 сек (Рисунок 4.3). В **Incrementation** задайте тип – **Fixed**, максимальное число шагов – 300, постоянный шаг по времени **Increment size** – «0.01» с (Рисунок 4.4). В параметрах **Other** введите коэффициент численного демпфирования **Time Integrator Parameter**, равный -0.33 (знак «минус» обязателен) и нажмите кнопки **OK** и **Dismiss** (Рисунок 4.5).

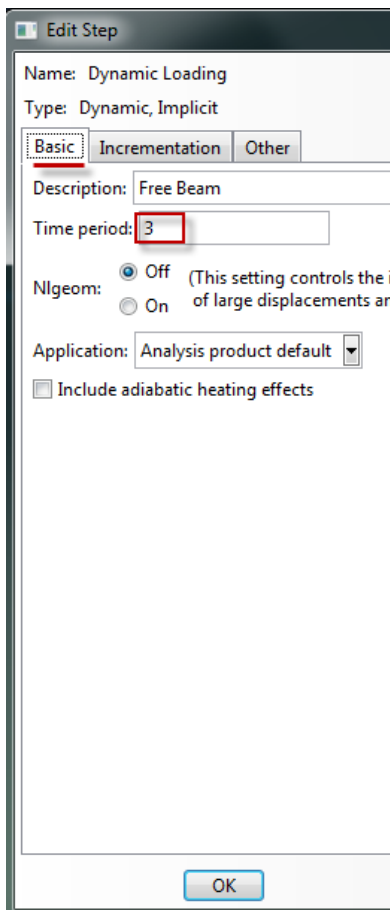


Рисунок 4.3 – Вкладка **Basic** в окне **Edit Step**

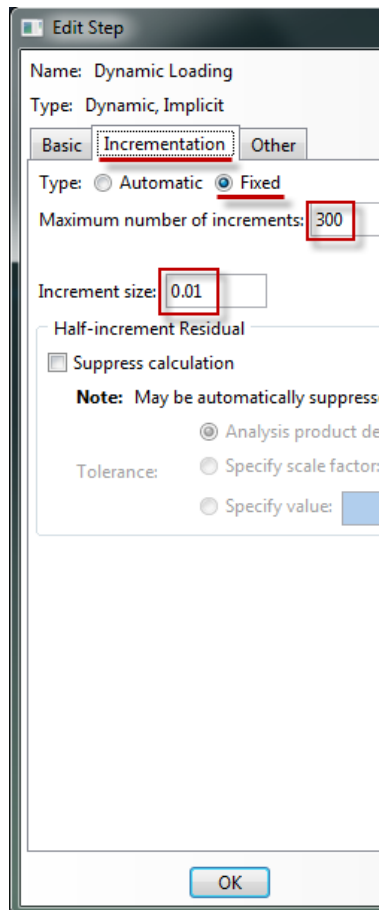


Рисунок 4.4 - Вкладка **Incrementation** в окне **Edit Step**

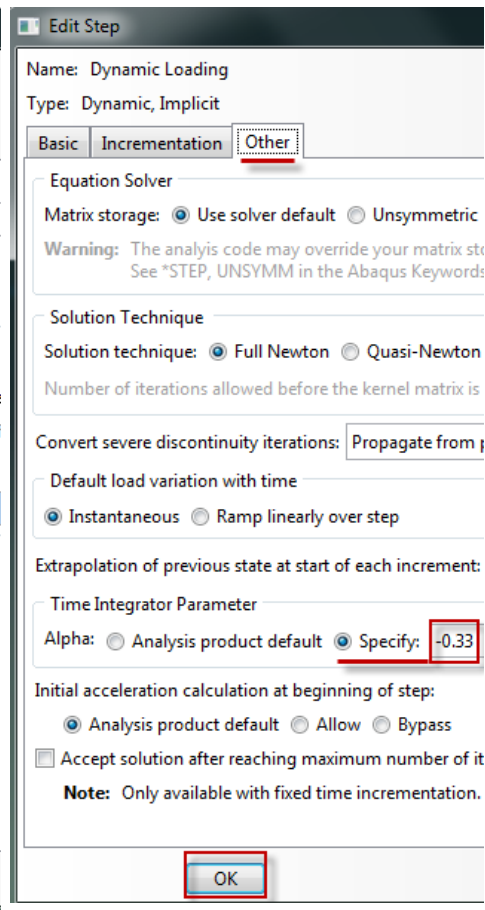


Рисунок 4.5 - Вкладка **Other** в окне **Edit Step**

Для вывода результатов расчётов по времени **History Output** необходимо определить точки модели, в которых будут записываться данные в зависимости от времени. Запустите менеджер групп, выбрав элемент меню **Tools => Set => Manager**, в котором создайте новую группу, нажав **Create**. В создаваемую группу добавим одну точку - точку, к которой на шаге *Loading* была приложена сосредоточенная сила. По умолчанию группа точек геометрической модели носит имя **Set-1**, но ей можно присвоить и собственное имя при помощи кнопки **Rename**. Это бывает особенно полезно при анализе моделей с большим числом заданных групп точек. Укажите заданную точку мышью и нажмите кнопки **Done**, а затем закройте менеджер нажатием **Dismiss** (Рисунок 4.6).

Запустите менеджер результатов по времени, кликнув правой кнопкой мыши по элементу дерева модели **History Output Requests** и выбрав пункт *Manager*, или же при помощи команд меню **Output => History Output Request => Manager** или соответствующей кнопки. Здесь для шага *Dynamic Loading* задаются свои переменные для вывода, в частности перемещения, скорости и ускорения **Displacement/Velocity/Acceleration**

заданной выше группы **Set-1**, которую необходимо указать в окне **Domain**, выбрав раздел **Set** (Рисунок 4.7).

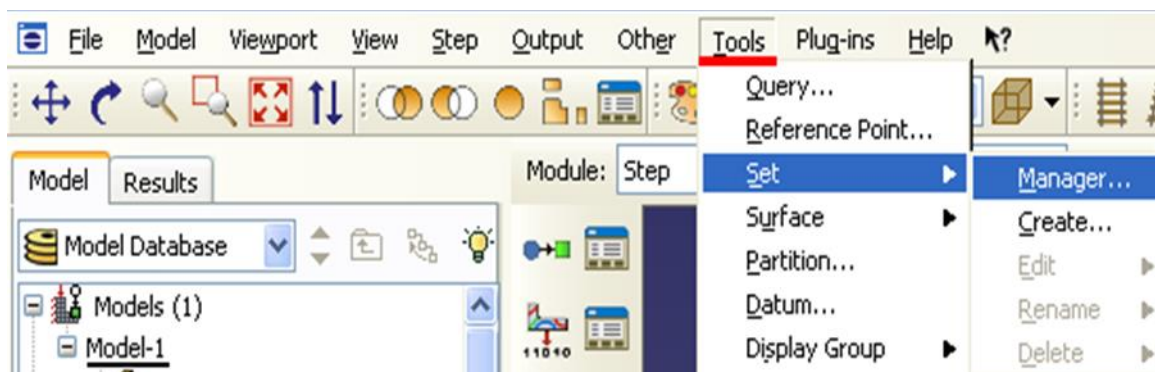


Рисунок 4.6 – Открытие менеджера групп

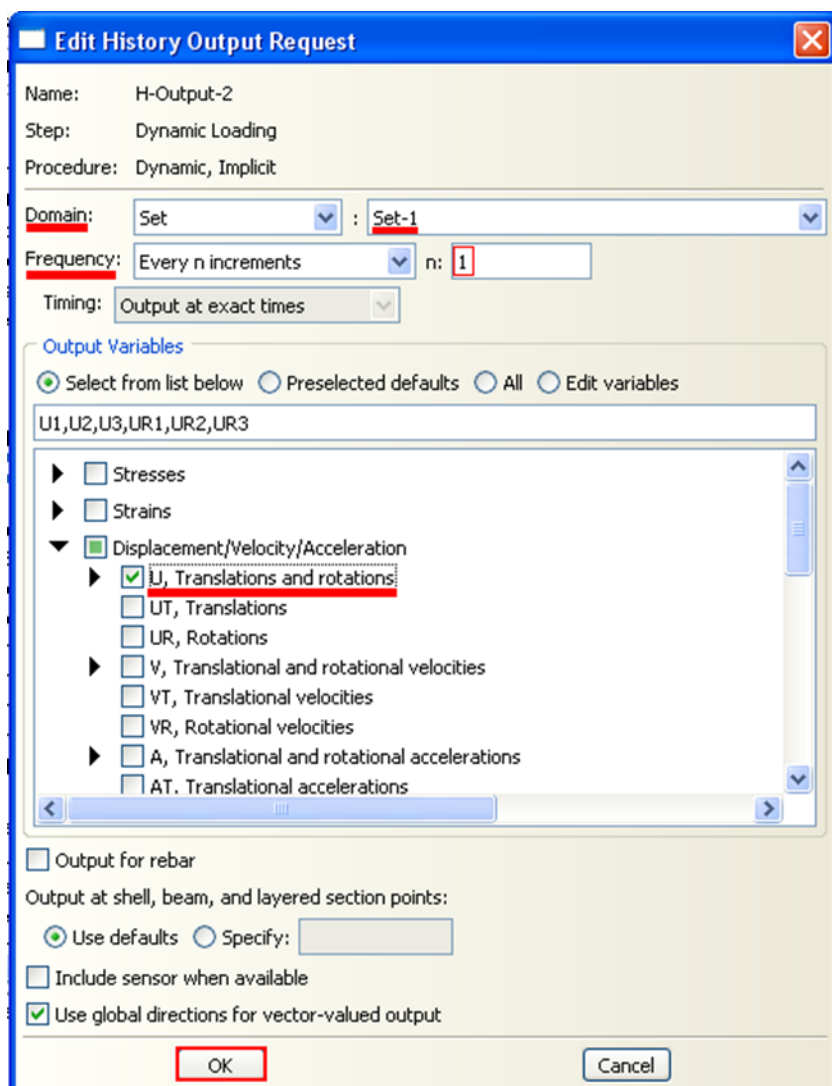


Рисунок 4.7 – Окно **Edit History Output Requests**

Так как на шаге *Dynamic Loading* рассматриваются свободные колебания балки, то необходимо убрать нагрузку, приложенную на предыдущем шаге. Для этого перейдём в модуль **LOAD**. В менеджере нагрузок изменяем

состояние **Propagated** на состояние **Inactive** кнопкой **Deactivate** (Рисунок 4.8).

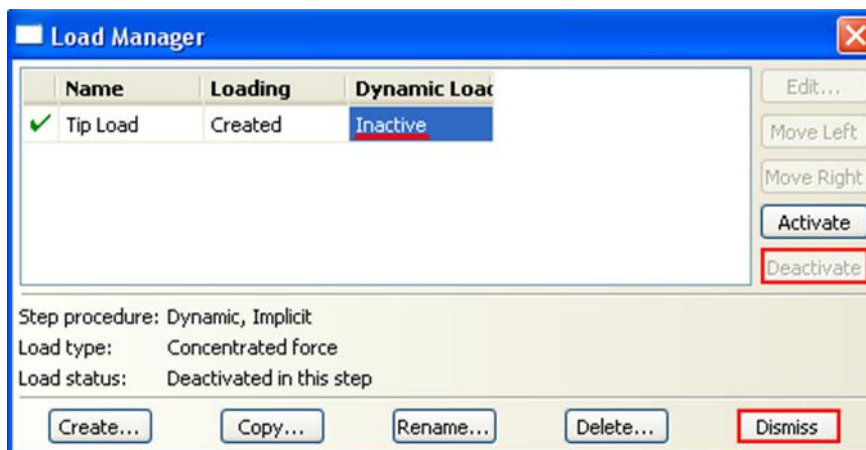


Рисунок 4.8 – Окно **Load Manager**

Затем в модуле **JOB** создадим новое расчётное задание и осуществим запуск расчёта. Запустите **Job Manager** и создайте задание на расчёт при помощи кнопки **Create**. В появившемся окне **Create Job** выберете **Model-2** – задание на расчёт будет создано именно для неё. Присвойте этому процессу уникальное имя - *Beam3D-Frequencies*. После создания нового задания на расчёт запустите его кнопкой **Submit**. После окончания расчёта откройте базу данных результатов нажатием кнопки **Results** в менеджере заданий или открытием в модуле **VISUALIZATION** соответствующего файла выходных данных с расширением *.odb. (Рисунок 4.9).

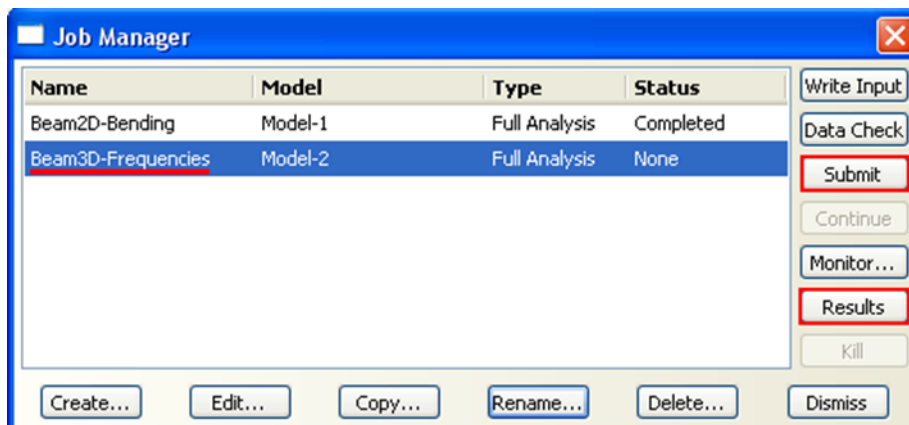





Рисунок 4.9 – Окно **Job Manager**

Выведем анимацию процесса колебаний. Для этого выберите команду меню **Animate => Time History**, либо нажмите кнопку **Time History Animate** . В окне просмотра будет воспроизводиться колебательный процесс. Для динамического отображения возникающих в балке напряжений воспользуйтесь кнопкой **Plot Contours on Deformed Shape**  (Рисунок 4.10).

Изменить параметры анимации можно, нажав на кнопку **Animation Options** , расположенную на панели инструкций. В частности, для того

чтобы просмотреть колебательный процесс от начала до конца, один раз, без повторений необходимо в появившемся окне **Animation Options** задать параметр **Mode** в значение **Play once**.

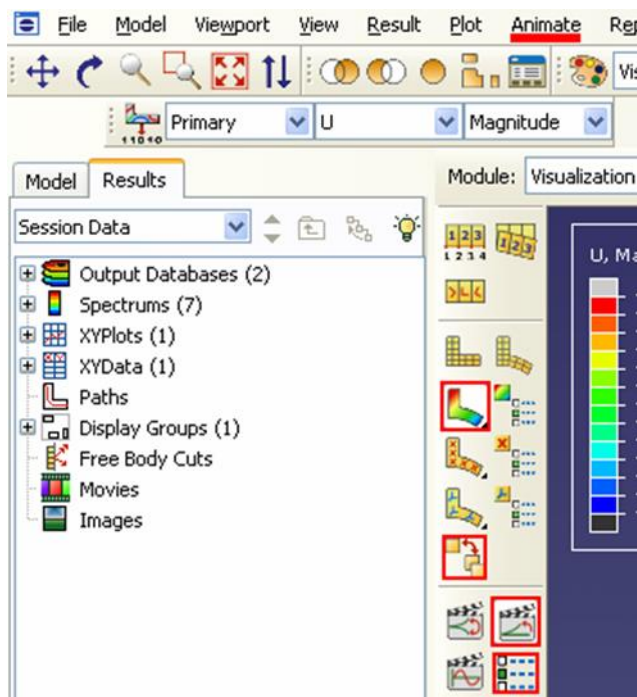


Рисунок 4.10 – Панель инструментов с кнопкой Plot Contours on Deformed Shape 

Для вывода графиков по времени необходимо воспользоваться элементом меню **Result** => **History output**. В появившемся окне выберите переменную, по которой требуется построить график. Например, выберите переменную, отвечающую за вывод графика перемещения точки, к которой на шаге Dynamic Loading была приложена сила **Spatial Displacement: U2 at Node 11 in NSET SET-1** (Рисунок 4.11).

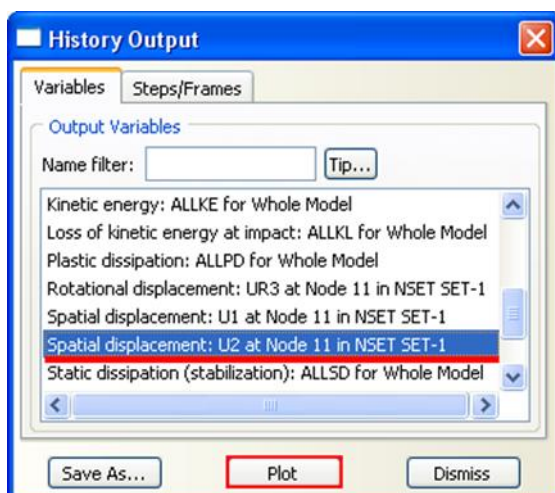
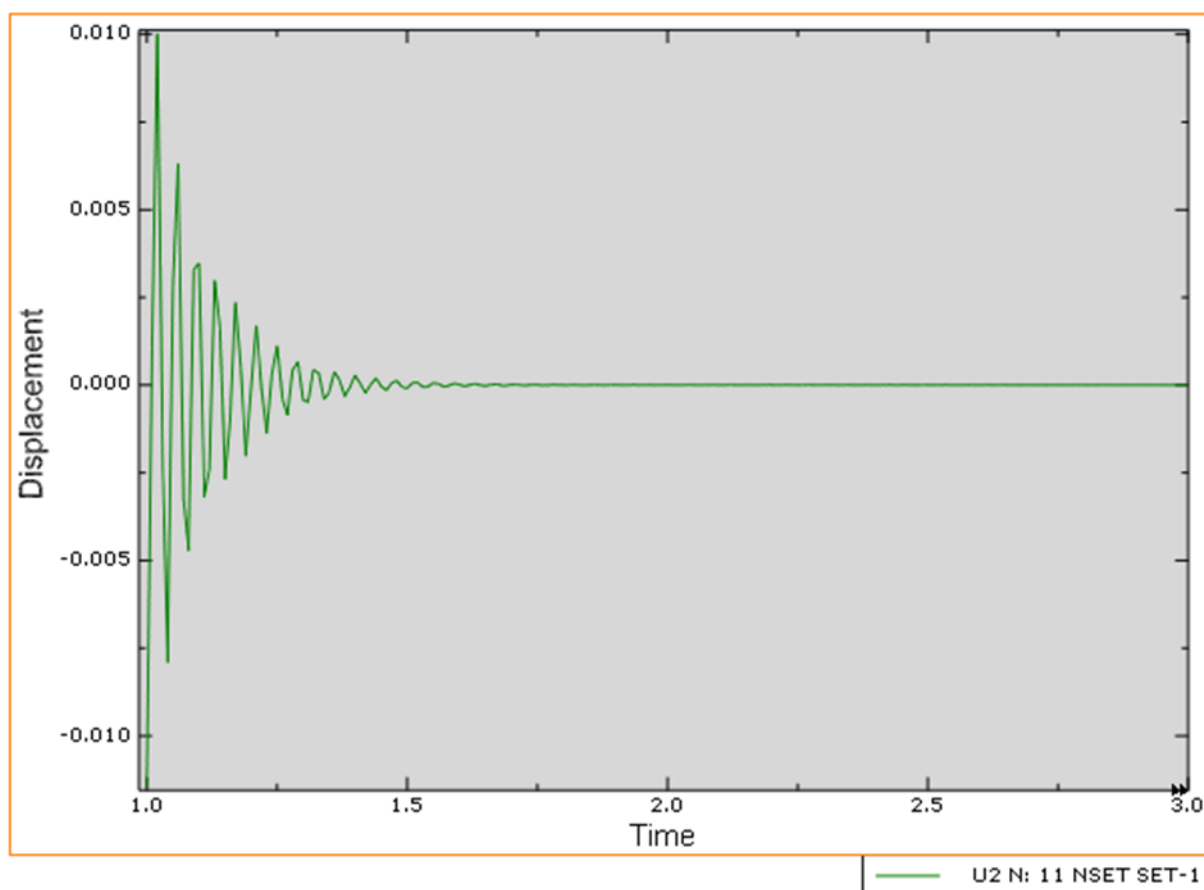


Рисунок 4.11 – Окно History Output

При нажатии на кнопку **Plot** на экран будет выведен график выбранной переменной по времени (Рисунок 4.12). Для изменения параметров выводимого графика служит инструмент **XY Curve Options**. При нажатии на соответствующую кнопку появляется одноименное окно, которое позволяет изменить вид выводимой кривой: задать вид линии кривой и т.п. Также может быть полезен инструмент **XY Plot Options**, с помощью которого осуществляется изменение параметров области построения, таких, как легенда и сетка.



ГЛАВА 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МАТЕРИАЛОВ (ИЗОТРОПНЫЕ, ОРТОТРОПНЫЕ, СЛОИСТЫЕ, ГИПЕРЭЛАСТИЧНЫЕ). ЗАДАНИЕ ПРЕДЕЛОВ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ И ПРОЧНОСТИ, ПЕРЕХОД К НЕЛИНЕЙНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧЕ.

На предыдущем занятии мы моделировали конструкцию, сделанную из изотропного материала, предположив, что деформация линейно зависит от напряжения. Но, как известно, в реальных материалах участок пропорциональности не бесконечен, и в общем случае диаграмма растяжения имеет вид, представленный на рисунке 5.1. На ней есть участок пластичности, характеризующийся тем, что значительные деформации сопровождаются небольшими изменениями напряжения. Таким образом,

для любого моделируемого материала статическая задача может стать нелинейной после перехода предела пропорциональности. Рассмотрим моделирование это явление в **ABAQUS**.

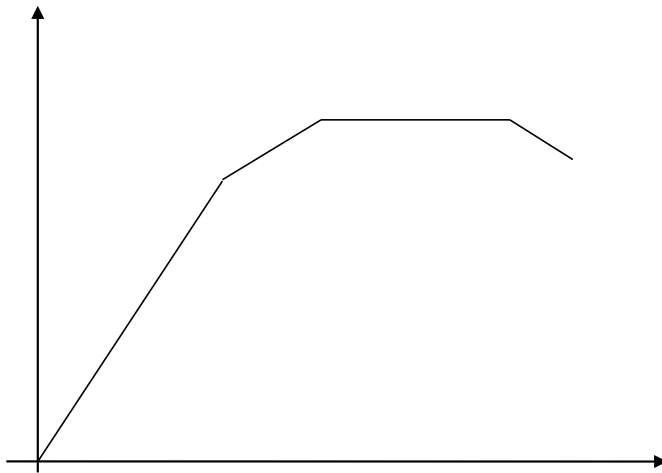


Рисунок 5.1 – Общий вид диаграммы растяжения

5.1 Моделирование пластичного материала

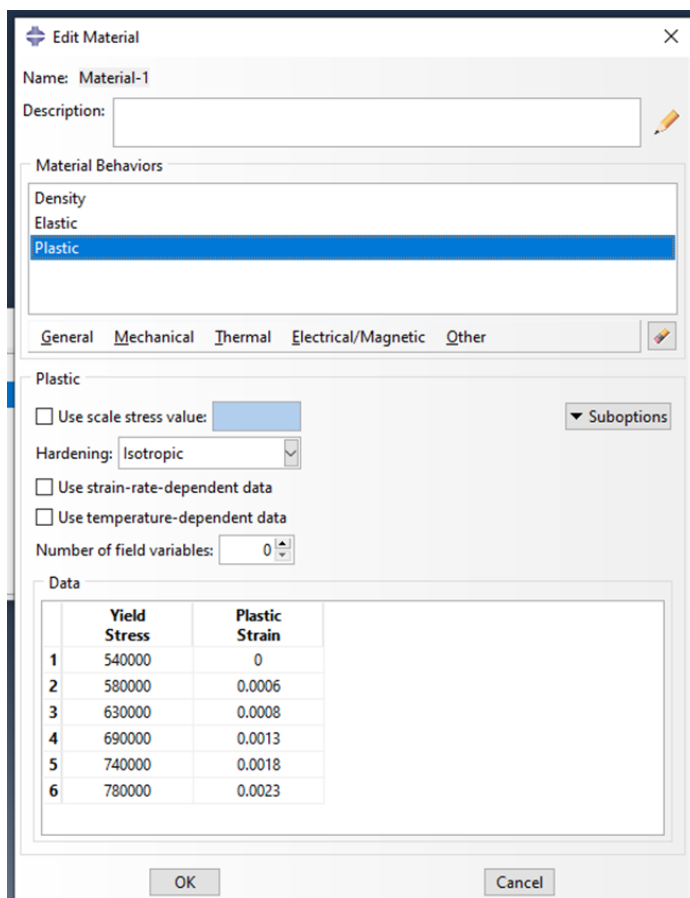


Рисунок 5.2 – Задание пластичного материала

Для создания материала перейдите в модуль **PROPERTY** и создадим в нем новый материал уже известным вам способом или путём нажатия кнопки **Create** в менеджере материалов. Задайте новые свойства описав медь: $Density = 5400$ (кг/м³), $Young's Modulus = 4.3e+8$, $Poisson's Ratio = 0.28$. Теперь в меню **Mechanical** выберите пункт **Plasticity – Plastic**. Появится таблица, по умолчанию состоящая из одной строки и двух столбцов: **Yield Stress** и **Plastic Strain**. В них, соответственно, задаётся напряжение и соответствующая ему пластическая деформация в табличном виде. Обратите внимание на то, что эта деформация нулевая, поскольку так описываются не точки на диаграмме растяжения, а отклонение от прямой с углом наклона, равным арктангенсу модуля Юнга. Заполните таблицу так, как показано на **рисунке 5.2**. Заметим, что первое число в ней соответствует пределу пропорциональности, а последнее – пределу прочности материала.

Присвойте материалу новое имя - *Copper*. Далее известным вам методом создайте сечение (кнопкой *Create Section*) и присвойте его вашей модели.

5.2 Моделирование анизотропного материала на примере фанеры

Но медь – изотропный материал. Попробуем теперь задать материал ортотропный, например, фанеру. Для этого создайте в менеджере материалов новый материал с именем *Plywood*. Задайте плотность материала: $Density = 1460$ (кг/м³). В разделе **Mechanical** задайте свойство **Elastic**, в появившемся окне найдёте поле **Type** и переключите с его помощью тип материала с *Isotropic* на *Orthotropic*. Определите матрицу жесткости фанеры:

$D1111 = 2.3e+8$ Па, $D1122 = 3.8e+5$ Па, $D2222 = 4.3e+8$ Па, $D1133 = 5.6e+5$ Па, $D2233 = 3.4e+7$ Па, $D3333 = 3.8e+9$ Па, $D1212 = 2.7e+5$ Па, $D1313 = 3.6e+6$ Па, $D2323 = 4.3e+5$ Па. (Рисунок 5.3)

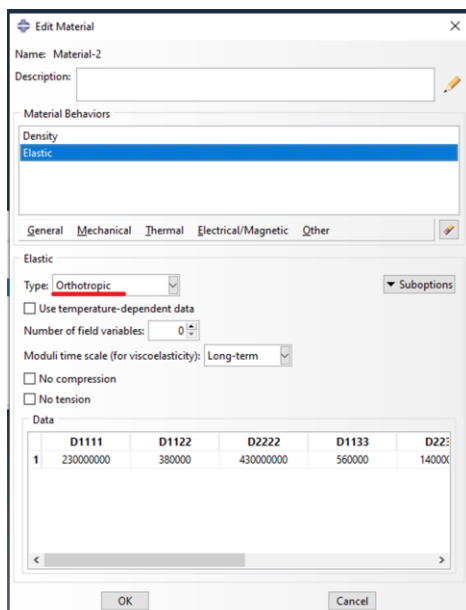


Рисунок 5.3 – Задание анизотропного материала

Теперь надо задать ориентацию материала. Для этого сначала создайте локальную систему координат **Datum Csys** при помощи кнопки **Create datum Plane: 3 Points** или команд меню *Tools – Datum, Type = Csys, Method = 3 points*. В появившемся окне **Create Datum Csys** выберите *Coordinate System Type* как *Rectangular* и задайте новой системе имя, по умолчанию *Datum csys-PlyWood*. Нажав кнопку **Continue**, выберите точку начала координат. Появятся новые координатные оси, выделенные красным цветом. Подтвердите ввод нажатием кнопки **Create Datum**. Нажмите на панели инструментов кнопку *Assign Material orientation* или используйте команды меню **Assign – Material orientation**. Укажите мышью на всю деталь и нажмите кнопку **Done**. Теперь выделите мышью вновь созданную систему координат и нажмите на кнопку **Axis-3** для ориентации усиленного волокна фанеры вдоль детали. Подтвердите нулевой угол отклонения от оси кнопкой **Enter** и завершите ориентацию материала кнопкой **ОК**.

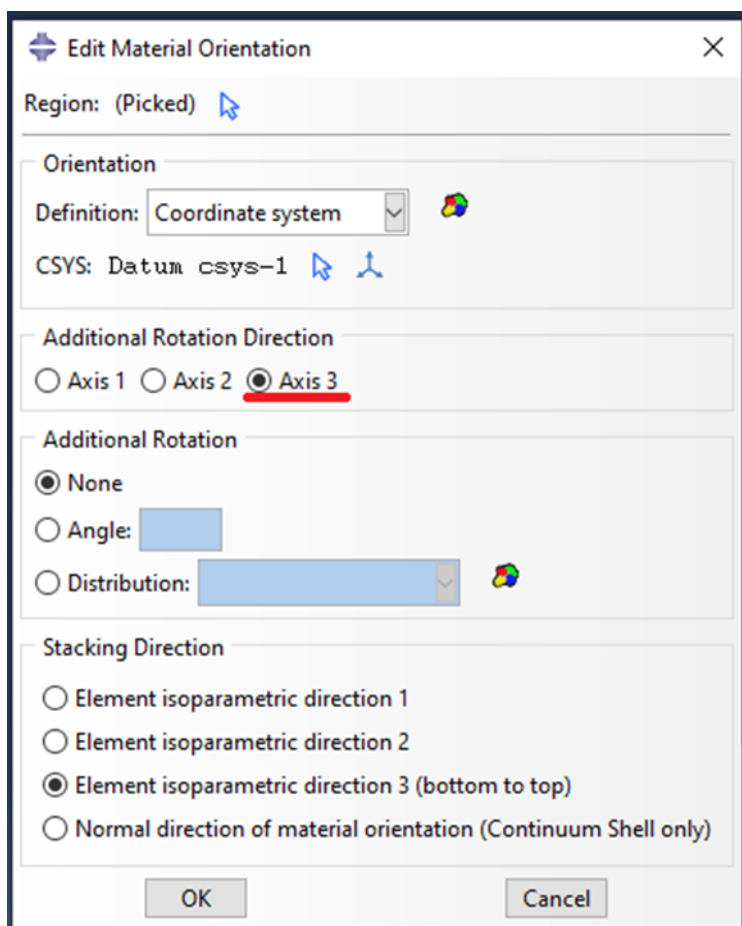


Рисунок 5.4 – Задание ориентации материала

5.3 Моделирование композитных материалов

Далее рассмотрим моделирование композитных материалов. Они состоят из ортотропных слоёв, повернутых под разными углами, друг относительно друга и склеенных в слоистый пакет. Для этого создайте новый материал с именем *Composite* и определите *Elastic* как *Engineering Constants* (Рисунок

5.5). Задайте следующие свойства: $Density = 4850$ (кг/м³), $Young's Modulus: E1 = 3.6e+8$ Па, $E2 = 2.8e+7$ Па, $E3 = 4.5e+7$ Па, $Nu12 = 0.34$, $Nu13 = 0.23$, $Nu23 = 0.28$, $G12 = 3.2e+7$ Па, $G13 = 4.0e+7$ Па, $G23 = 6.2e+7$ Па. После этого нажмите кнопку **ОК**.

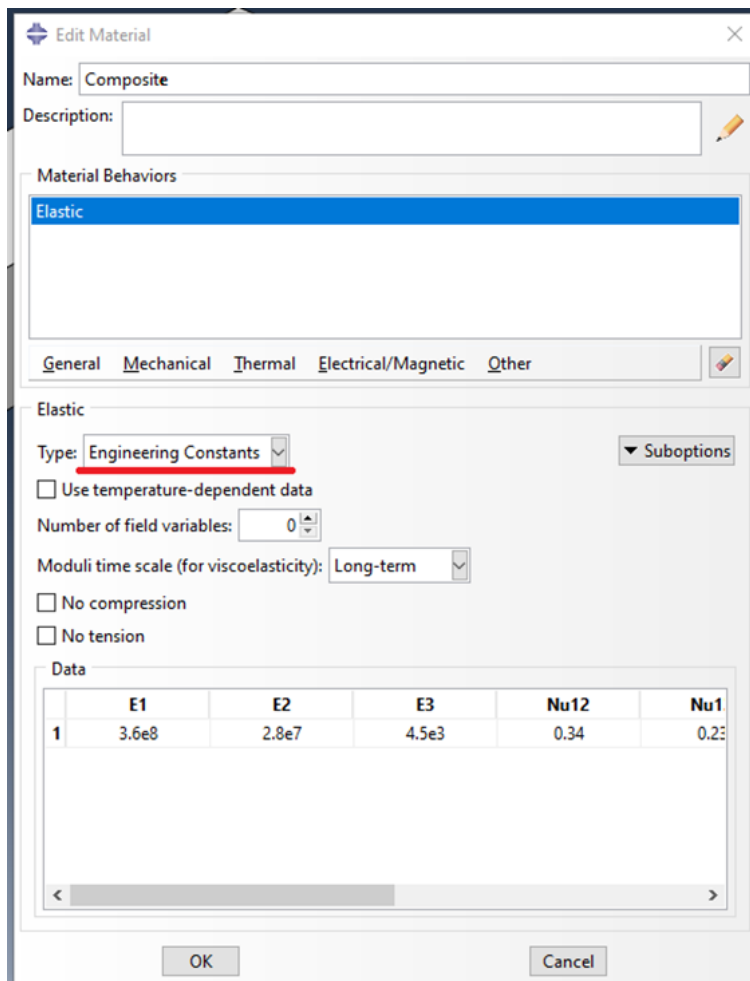


Рисунок 5.5 – Задание компактного материала

Далее известным вам методом создайте сечение (кнопкой *Create Section*) и присвойте его вашей модели не забыв, как и в предыдущем случае, после присвоения балке свойств сечения задать и ориентацию материала.

5.4 Моделирование гиперэластичных материалов

Наконец, научимся моделировать резину. Она относится к гиперэластичным материалам с обратной выпуклостью кривой растяжения – сжатия. Модуль Юнга для резины близок к $\frac{1}{2}$, что говорит о малых объёмных деформациях. Создайте новый материал с именем Rubber и определите *Type* как *Isotropic*. Задайте плотность материала $Density=1870$ кг/м³ и выберите опцию *Hyperelastic* (Рисунок 5.6). Выберите Test data в качестве Input source. Эта опция требует ввода пробных данных, полученных на основании эксперимента, их можно задать в виде таблицы в препроцессоре CAE, что производится по умолчанию, или через отдельный файл.

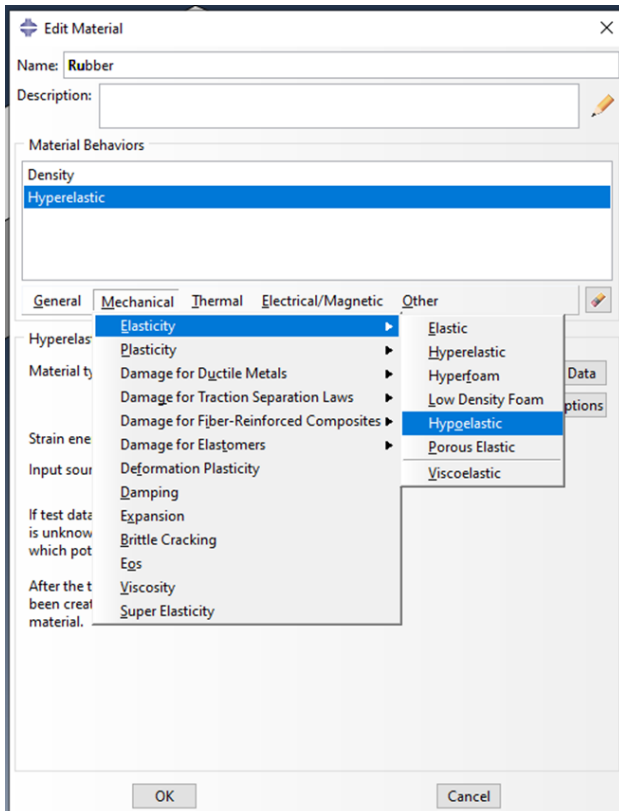


Рисунок 5.6 – Выбор задания гиперэластичного материала

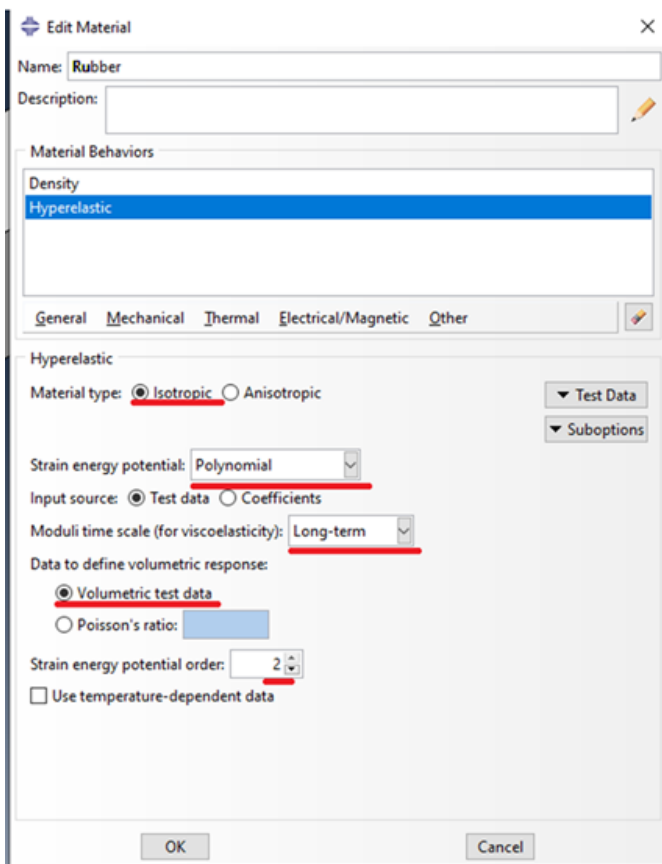


Рисунок 5.7 – Задание гиперэластичного материала

Выберите полиномиальную модель, при помощи которой будете аппроксимировать потенциал энергии деформации материала, задав *Strain energy potential* как *Polynomial* и *Moduli time scale (for viscoelasticity)* как *Long-term*, а порядок полиномов *Strain energy potential order* установите равным 2. (Рисунок 5.7).

Теперь надо ввести сами пробные данные, то есть точки, по которым будет построена диаграмма растяжения для резины. Для этого нажмите кнопку **Test Data** и выберите подопцию *Uniaxial test data*. Заполните появившуюся на экране таблицу *Suboption Editor* так, как показано на рисунке 5.8. Здесь *Nominal Stress* и *Nominal Strain* – номинальные напряжения и соответствующие им деформации. Подтвердите ввод, нажав **ОК**.

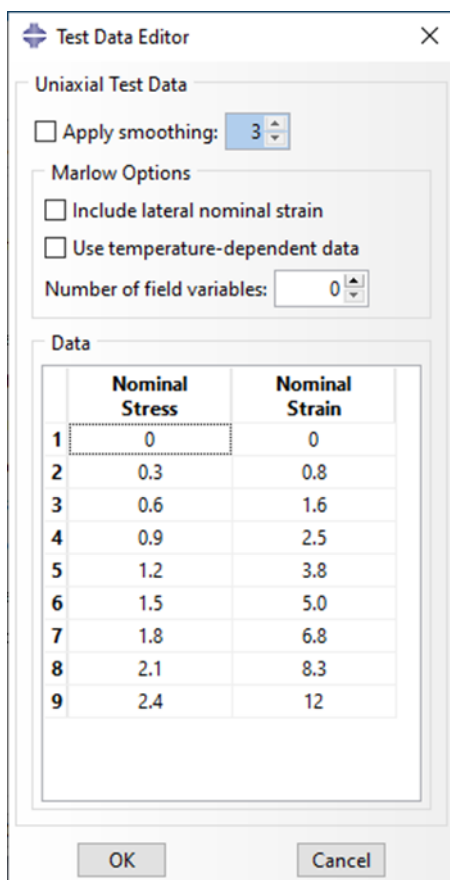


Рисунок 5.8 - Таблица *Suboption Editor*

В **ABAQUS** есть разные модели для задания гиперэластичных материалов: полиномиальная, Муни-Ривлина, Марлоу, Арруды-Бойса и другие. Мы уже задали полиномиальную модель с $N=2$. Чтобы увидеть, насколько точно она соответствует экспериментальным данным, необходимо произвести оценку материала. Это можно сделать непосредственно в менеджере материалов, указав вновь созданный материал и нажав кнопку *Evaluate*, либо с помощью команд меню **Material – Evaluate – Rubber**. Возникнет окно **Evaluate Material** (Рисунок 5.9)

В нем задайте *Source* как *Test data*, а в качестве тестов для модели материала Standard Tests выберите одноосное растяжение-сжатие *Uniaxial* и чистый сдвиг *Planar*. Для каждого из них задайте масштаб деформации *Nominal Strain*, то есть верхний предел деформаций в таблице пробных данных, в нашем случае 12.

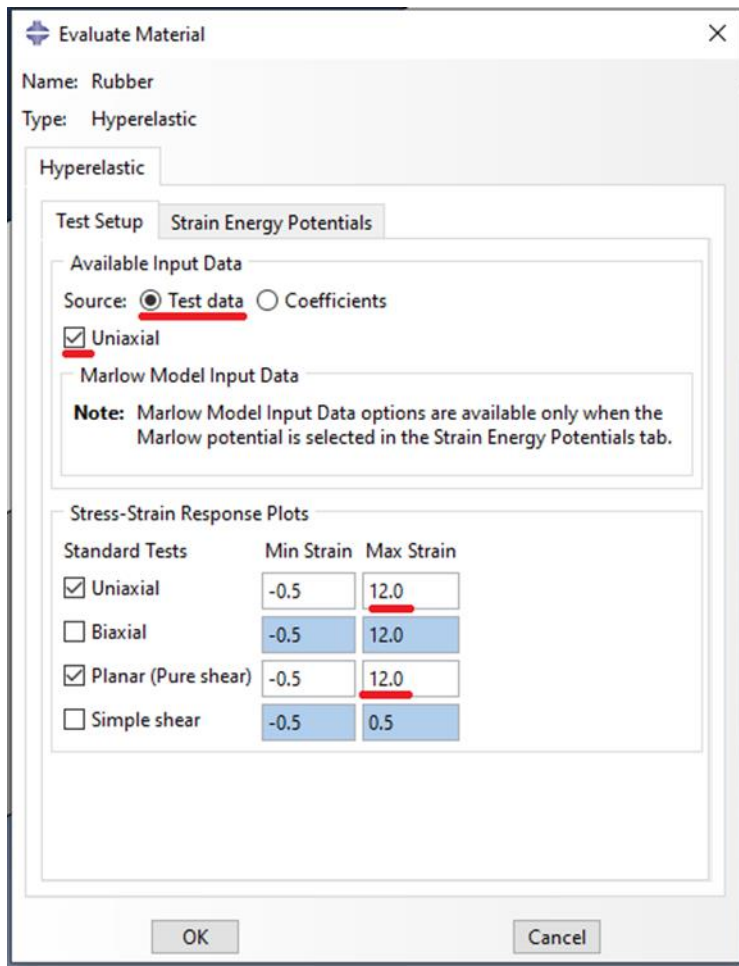


Рисунок 5.9 - Окно Evaluate Material

Откройте закладку *Strain Energy Potentials* и выберите модели, для которых будет проведено сравнение с пробными данными, например, *Polynomial*, *Mooney-Rivlin* и *Odgen*. Подтвердите ввод нажатием кнопки **OK**.

Если все сделано правильно, на экране появятся графики (Рисунок 5.11), показывающие процессы нагружения пробного образца для эксперимента и заданных моделей потенциала энергии деформации. Обратите внимание на погрешность полиномиальной модели и закройте графики.

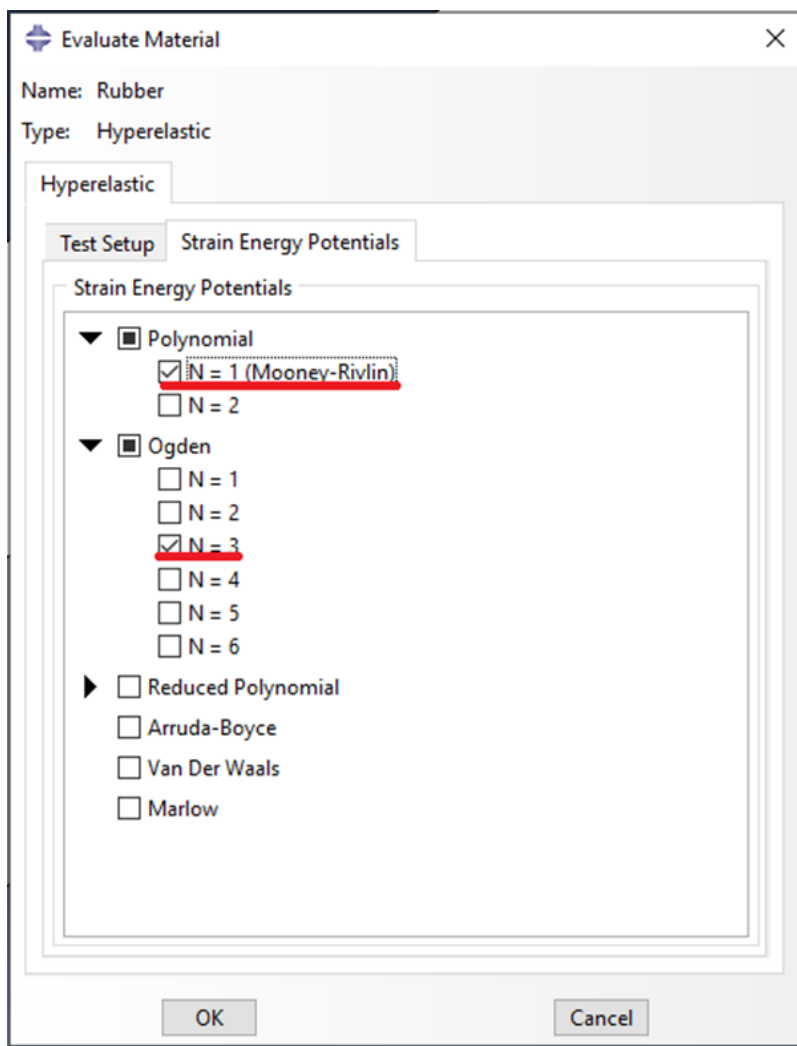


Рисунок 5.10 - Закладка Strain Energy Potentials

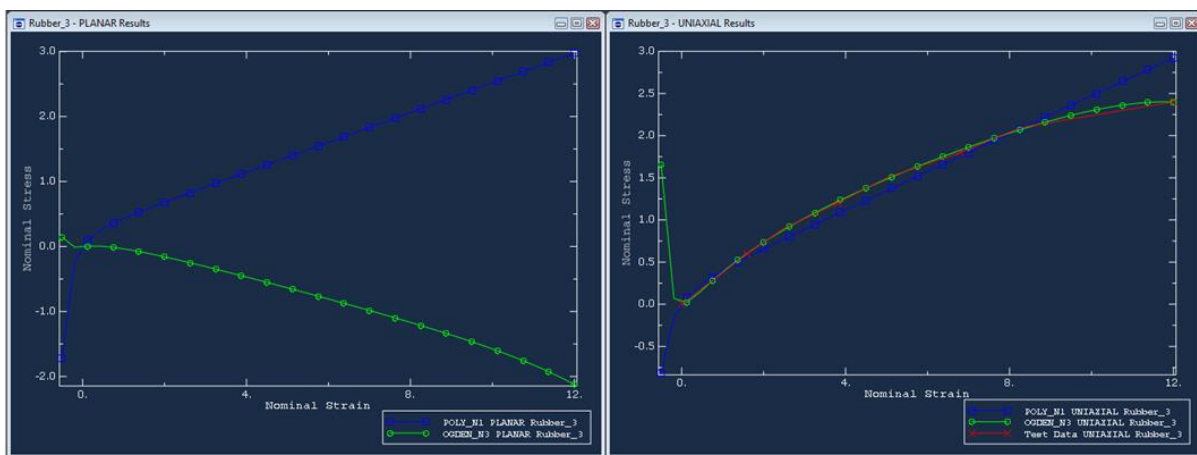


Рисунок 5.11 – Графики процесса нагружения пробного образца
Ориентацию материала задавать на этот раз не надо.

ГЛАВА 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ С КОНТАКТНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ.

Данная глава посвящена описанию моделирования статического нагружения стальных поворотных петель. Геометрическая модель состоит из поворотных петель, соединённых штифтом. Петли моделируются как 3-х мерные деформируемые тела, а штифт, как абсолютно жёсткое тело. Геометрическая модель в сборе представлена на рисунке 6.1. На левую петлю заданы ограничения по перемещениям, а к правой - приложено растягивающее давление. Данная задача является более сложной, как с точки зрения построения геометрической модели, так и выполнения самого анализа.

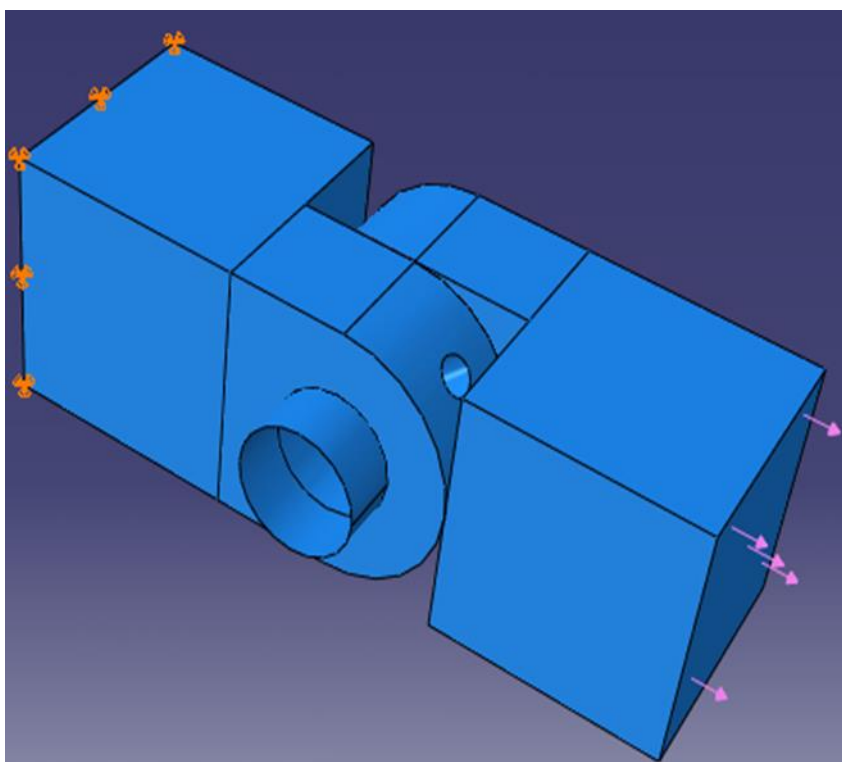



Рисунок. 6.1 - Геометрическая модель поворотных петель в сборе

Для начала приступим к определению геометрии модели. В этом примере мы создадим трёхмерное деформируемое тело. Общие принципы построения геометрической модели были рассмотрены на предыдущих уроках. Поэтому в данном разделе подробное описание получают лишь операции связанные непосредственно с 3-х мерным моделированием в **Abaqus.CAE**.

6.1 Построение геометрической модели.

Создадим рабочую плоскость. Для этого используем клавишу **Create Part** . В появившемся окне **Create Part** (Рисунок. 6.2) дайте детали имя **Hinge-hole**, и примите установки по умолчанию: **3D** (трёхмерного), **deformable** (деформируемого) тела и **extruded** (выдавливание) в качестве

базового свойства. В текстовом поле **Approximate size** наберите **0.250**. Щелкните **Continue**, чтобы закрыть диалоговое окно.

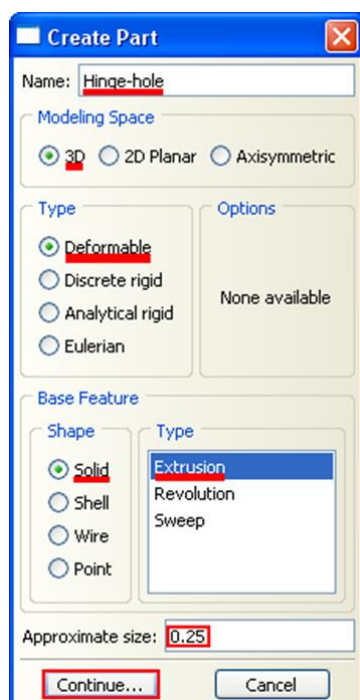




Рисунок 6.2 – Окно Create Part

В появившемся рабочем поле рисуем произвольный прямоугольник, воспользовавшись кнопкой . Теперь при помощи кнопки **Add Dimension**  вводим характерные размеры верхнего и левого ребра равными 0.04 м. Щелкните средней кнопкой мыши и в появившемся окне Edit Base Extrusion введите значение 0.04 м. для Depth (глубины) и нажмите ОК (Рисунок. 6.3)

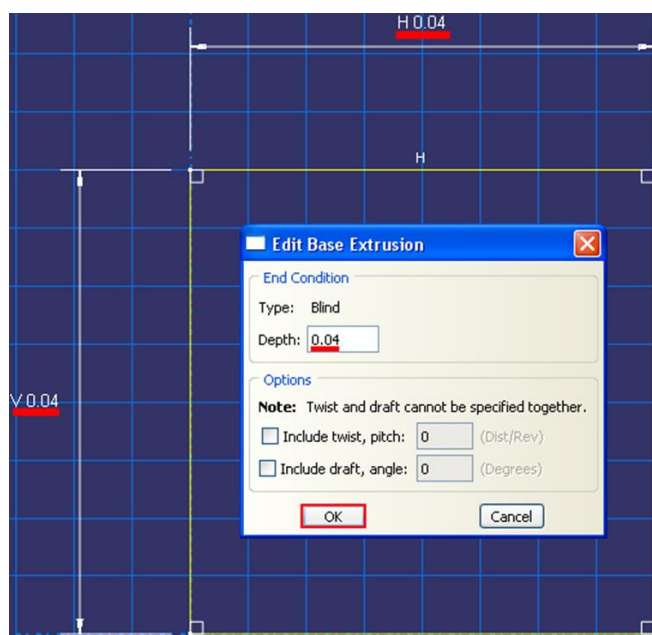


Рисунок 6.3 – Окно Edit Base Extrusion

Далее необходимо добавить фланец к базовому элементу. Вы выберите одну грань куба, чтобы определить плоскость эскиза и выдавите нарисованный профиль на половину глубины куба. Куб с фланцем показаны на рисунке 6.7.

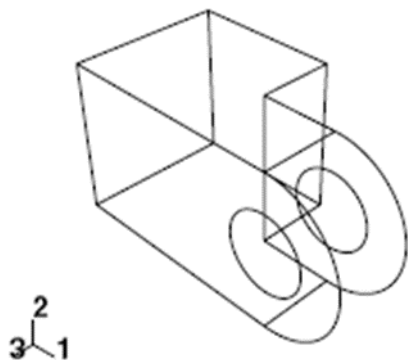


Рисунок. 6.4 – Схема куба с фланцем

Для этого в главном меню выберите Shape =>Solid => Extrude.

Выберите поверхность для определения плоскости эскиза. Далее выберите переднюю грань куба, как показано на рисунке 6.5.

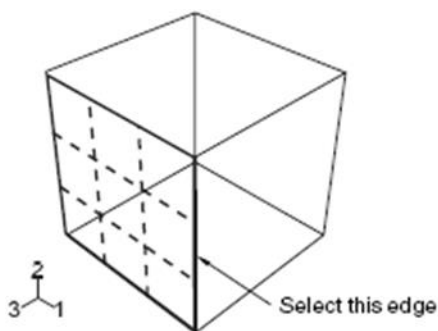


Рисунок. 6.5 – Схема выбора грани куба

Создадим эскиз фланца. Как и раньше, сначала будет нарисована примерная форма нового геометрического элемента. Из палитры инструментов **Эскиза** выберите инструмент **Create Lines** (связанная линия). Построим прямоугольную часть фланца, нарисовав три линии следующим образом (Рисунок. 6.6):

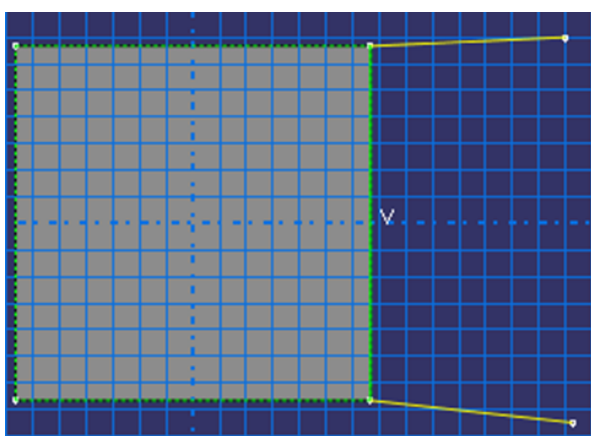


Рисунок. 6.6 = Построение прямоугольной части фланца (Этап 1)


1) Начните в любой точке справа от куба, соедините линию с верхней правой вершиной куба.

2) Протяните следующую линию к нижней правой вершине куба. Этой линии автоматически будет присвоено вертикальное ограничение.

3) Заключительная линия протягивается от правой нижней вершины куба до произвольной точки справа от него.





Если вы допустили ошибку в процессе рисования, используйте в Эскизе инструменты отката ↶ или стирания 🧼 .

Щелчком средней кнопки мыши в графическом окне, выйдем из инструмента **Create Lines** (соединительной линии). Уточните рисунок, определив следующие ограничения и размеры (Рисунок. 6.7):

а) Для того, чтобы задать на верхнюю и нижнюю линии условие горизонтальности необходимо воспользоваться опцией **Add Constraint** .

б) Присвоить ограничение равной длины этим двум линиям

в) Поставить размеры линий равными 0.02 м.

Замкнём профиль, добавив дугу полуокружности, используя инструмент **Create Arc** (окружность через 3 точки)  . Выберите две вершины на открытых концах прямоугольника в качестве концевых точек дуги, начиная с верхней. Далее выберите любую точку справа от эскиза. Теперь определим ограничения касания между концами дуги и горизонтальными линиями, чтобы уточнить чертёж. Для этого нужно воспользоваться опцией **Add Constraint**  . Из списка выбрать опцию **Tangent** и поочередно кликнуть по дуге и одной из линий. Для того, чтобы нарисовать отверстие фланца, воспользуемся опцией **Create Circle** (окружность по центру и точки на периметре)  . Используйте инструмент **Add Dimension** (размер)  , чтобы изменить значение радиуса на 0.01 м.. Если центр круга не совпадает с центром дуги, то установите размер вертикального расстояния между центром окружности и точкой периметра. Отредактируйте этот размер, так чтобы расстояние стало равно 0. Это подгонит расположение точки на периметре таким образом, что она будет в той же горизонтальной плоскости, как и центральная точка круга (Рисунок. 6.7).

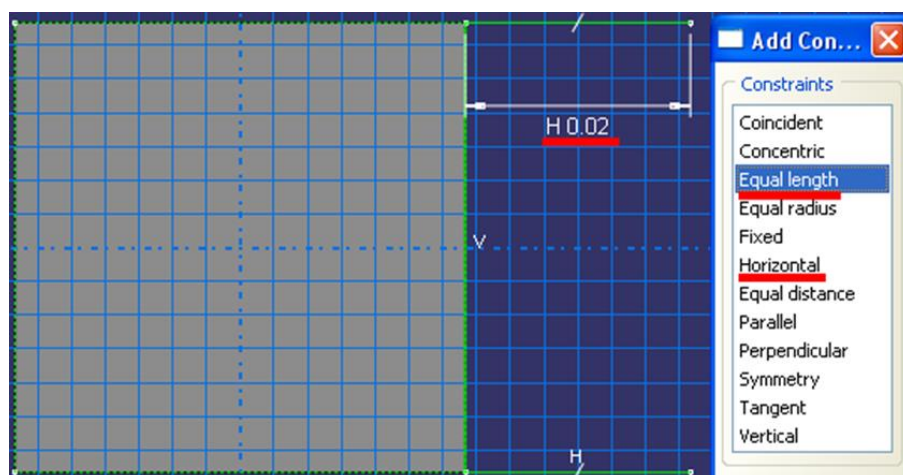


Рисунок. 6.7 - Построение прямоугольной части фланца (Этап 2)

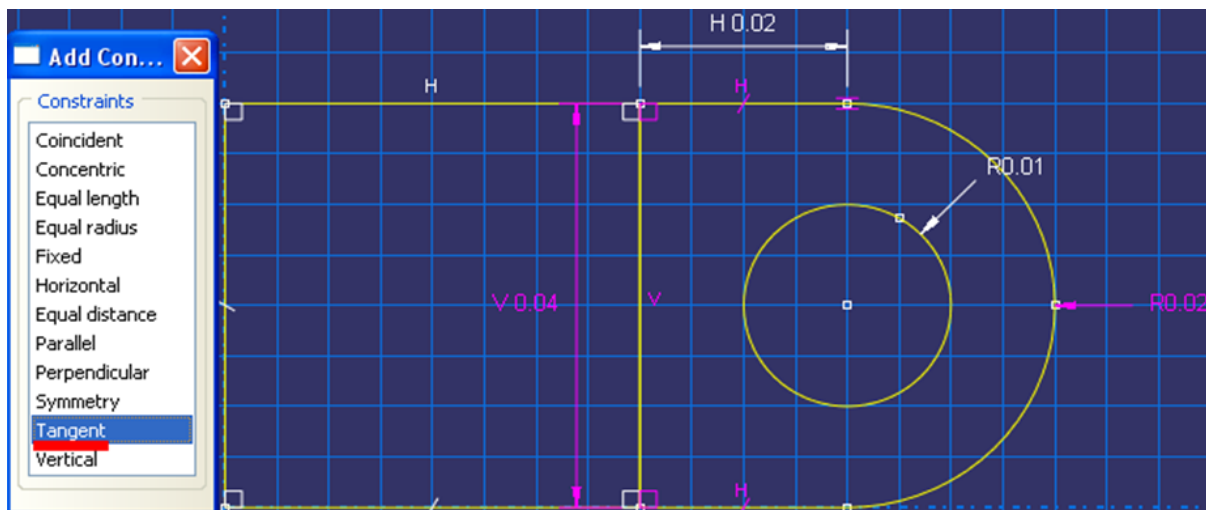


Рисунок 6.8 - Построение прямоугольной части фланца (Этап 3)

Щелкните средней кнопкой мыши, чтобы выйти из режима Эскиз. В диалоговом окне Edit Extrusion, примите установленный по умолчанию Type, как Build, чтобы указать, что вы предоставите глубину выдавливания и в поле Depth введите глубину 0.02 м. Щелкните Flip, чтобы перевернуть направление выдавливания, как показано на рисунке 6.9.

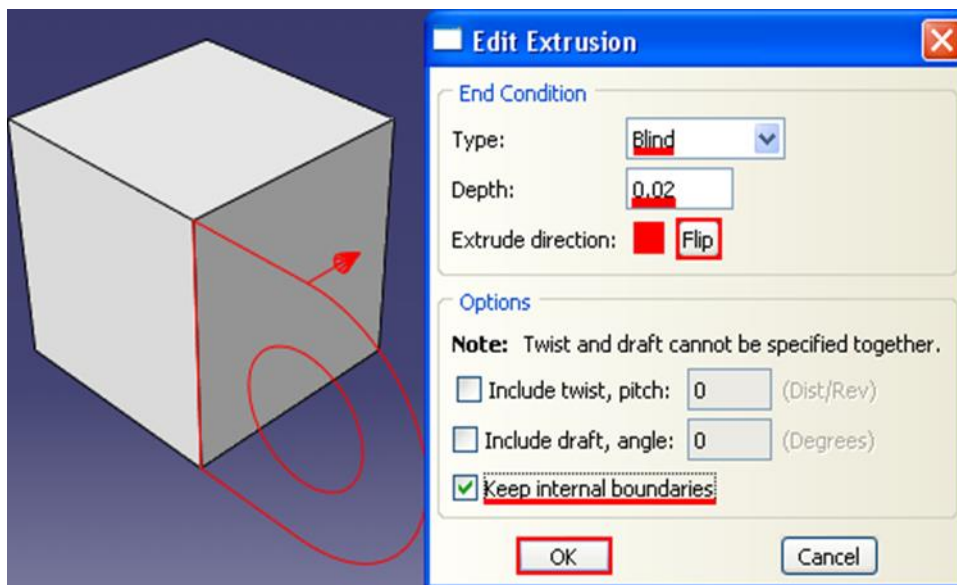


Рисунок. 6.9 – Окно Edit Extrusion

Включите опцию Keep internal boundaries. Когда вы включаете эту опцию, **Abaqus/CAE** сохраняет грань, которая создана между выдавленным базовым элементом и остальной частью детали. В результате выдавленный фланец сохраняется как вторичная часть и не сливается с кубом.

Фланец имеет небольшое отверстие для смазки, как показано на рисунке 6.10. Создание отверстие в нужном положении требует подходящей базовой плоскости для построения профиля для выдавливаемого выреза, как показано на рисунке 6.11.

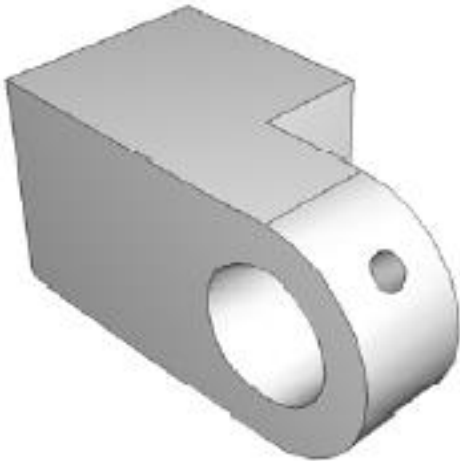


Рисунок. 6.10 – Схема фланца с отверстием

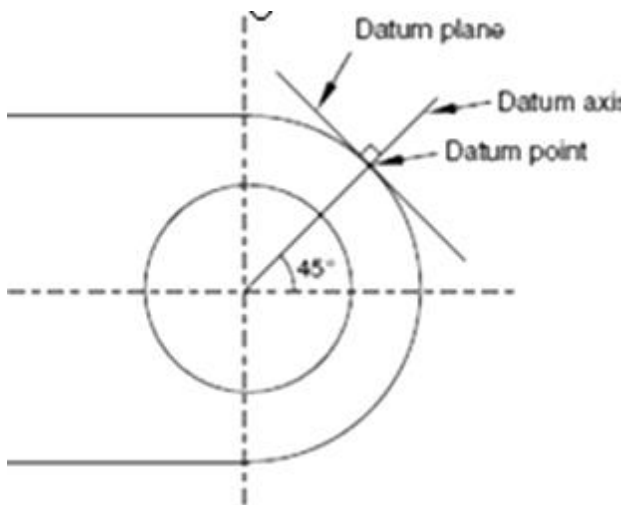


Рисунок. 6.11 – Схема построения вспомогательной плоскости

Вы создадите эскиз окружности на базовой плоскости, которая касается фланца, и **Abaqus/CAE** выдаст окружность по нормали к базовой плоскости и по нормали к фланцу. Для начала создадим базовую плоскость для этого:

а) В главном меню выберите **Tools=>Datum**. **Abaqus/CAE** откроет диалоговое окно **Create Datum**.

б) Создайте базовую точку вдоль криволинейного ребра фланца, через которую будет проходить базовая плоскость. Для этого в диалоговом окне **Create Datum** (Рисунок. 6.12) выберите тип базового элемента **Point**. Из списка выберите **Enter Parameter**. Далее нужно выбрать криволинейное ребро, как показано на рисунке 6.12. Обратите внимание на направление стрелки, указывающей возрастание параметра вдоль ребра от 0.0 до 6.0. Вы не можете изменить направление этой стрелки. В текстовом поле в области инструкций введите нормализованный параметр по длине ребра, если направление стрелки такое же, как и на рисунке 6.12, введите 0.25, если же противоположное - введите 0.75 и нажмите **Enter**. **Abaqus/CAE** создаст базовую точку на выделенном ребре.

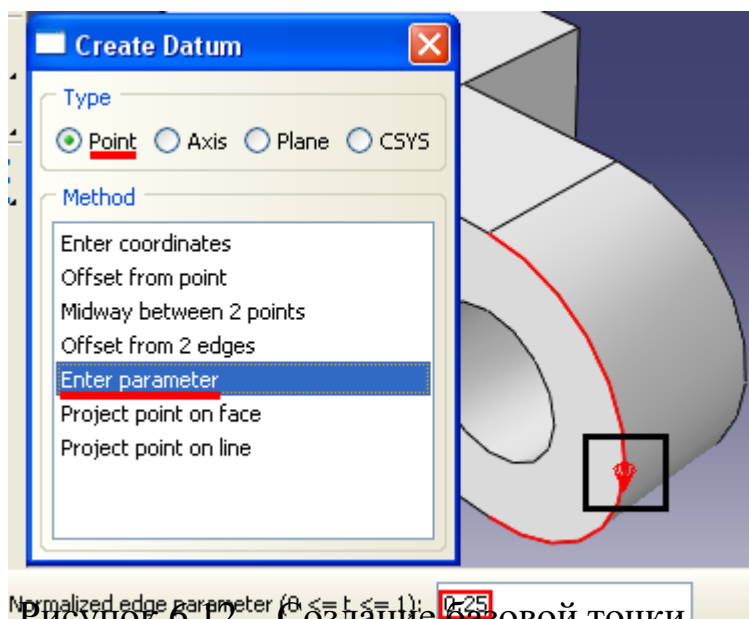


Рисунок 6.12 – Создание базовой точки

в) Теперь создадим базовую ось, которая будет определять нормаль к базовой плоскости. В диалоговом окне Create Datum выберите тип Axis. Щелкните по методу **2 points**. Abaqus/CAE подсветит точки, которые могут быть использованы для создания базовой оси. Выберите точку в центре отверстия (созданную, когда вы рисовали эскиз отверстия) и опорную точку на криволинейном ребре (Рисунок. 6.13). Abaqus/CAE изобразит опорную ось, проходящую через две точки.

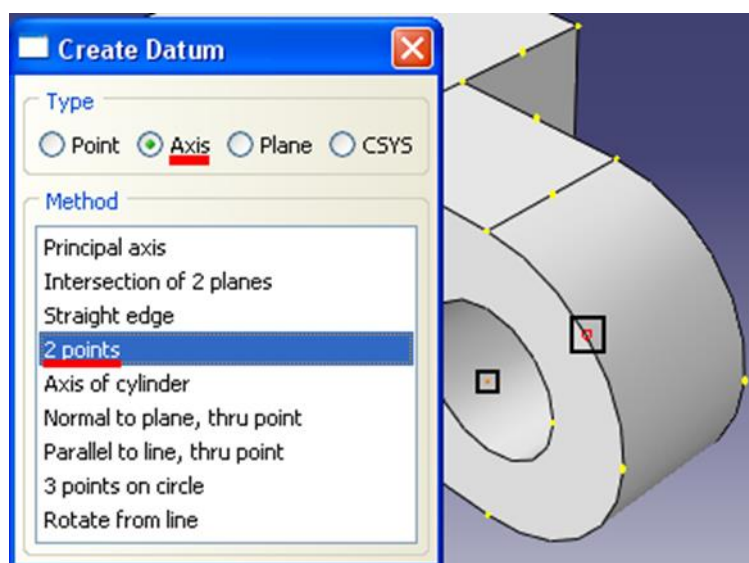


Рисунок. 6.13 – Создание базовой оси

г) Заключительным шагом является создание базовой плоскости, нормальной к опорной прямой. В диалоговом окне Create Datum выберите тип Plane. Щелкните по методу Point and normal. Выберите опорную точку на криволинейном ребре в качестве точки, через которую будет проходить опорная плоскость. Выберите опорную ось в качестве ребра, которое будет

нормально опорной плоскости (Рисунок. 6.14). **Abaqus/CAE** создаст опорную плоскость.

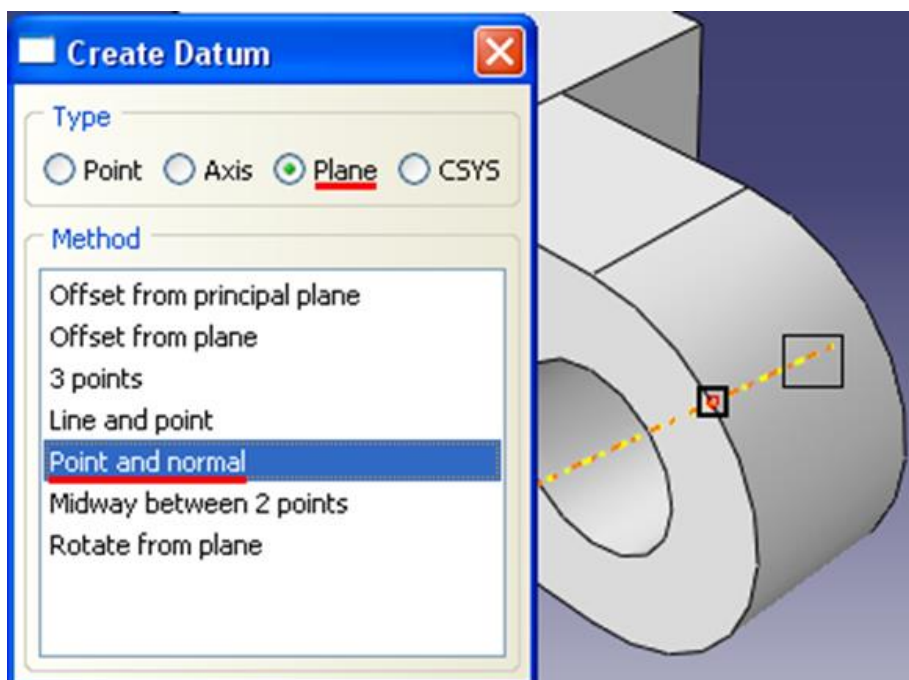


Рисунок. 6.14 – Создание базовой плоскости

После задания опорной плоскости необходимо создать базовую точку на фланце, которая будет указывать центр отверстия, как показано на рисунке Рисунок 6.15. Но для этого нам необходима ещё одна вспомогательная точка вдоль второго криволинейного ребра фланца. Алгоритм тот же, что и при задании первой вспомогательной точки, но со своим параметром вдоль ребра (0.75 или 0.25 в зависимости от направления). После её задания в диалоговом окне Create Datum выберите тип Point и щелкните по методу Midway between 2 points (Рисунок. 6.16).

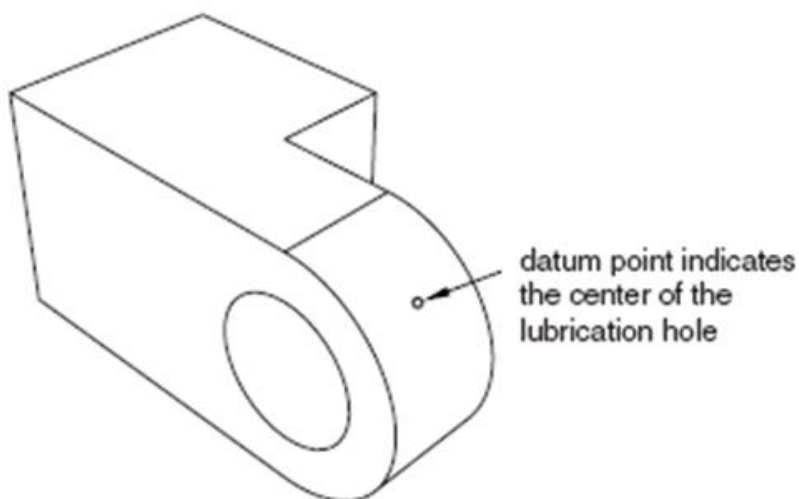


Рисунок. 6.15 – Схема расположения центра отверстия

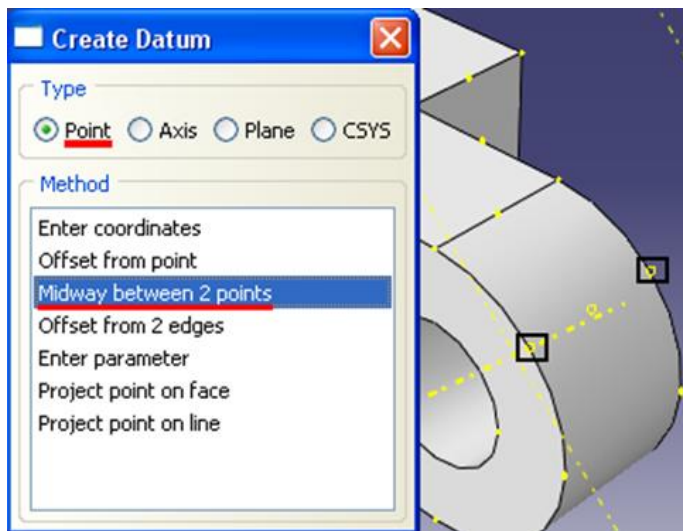


Рисунок. 6.16 - Создание центра отверстия

Теперь перейдём к непосредственно заданию эскиза нашего отверстия для смазки. В главном меню выберите **Shape=>Cut=>Extrude**. Щелкните по границе опорной плоскости, чтобы выбрать ее в качестве плоскости для создания эскиза. Выберите верхнюю заднюю грань куба в качестве ребра, которое появится вертикальным и справа от эскиза, как показано на рисунке 6.17. Запустится режим Эскиз с вершинами, опорными элементами и рёбрами детали, спроецированными на плоскость эскиза в качестве опорной геометрии

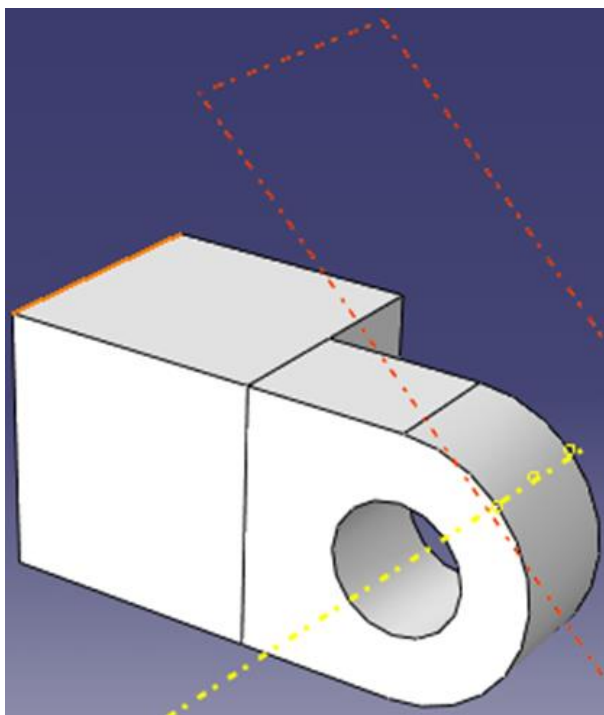


Рисунок 6.17 – Выбор опорной грани для эскиза отверстия

С помощью инструмента нарисуйте окружность с центром в центральной опорной точке и радиусом 0.003 м. (Рисунок. 6.18). Выйдите из режима Эскиз, нажав кнопку **Done**.

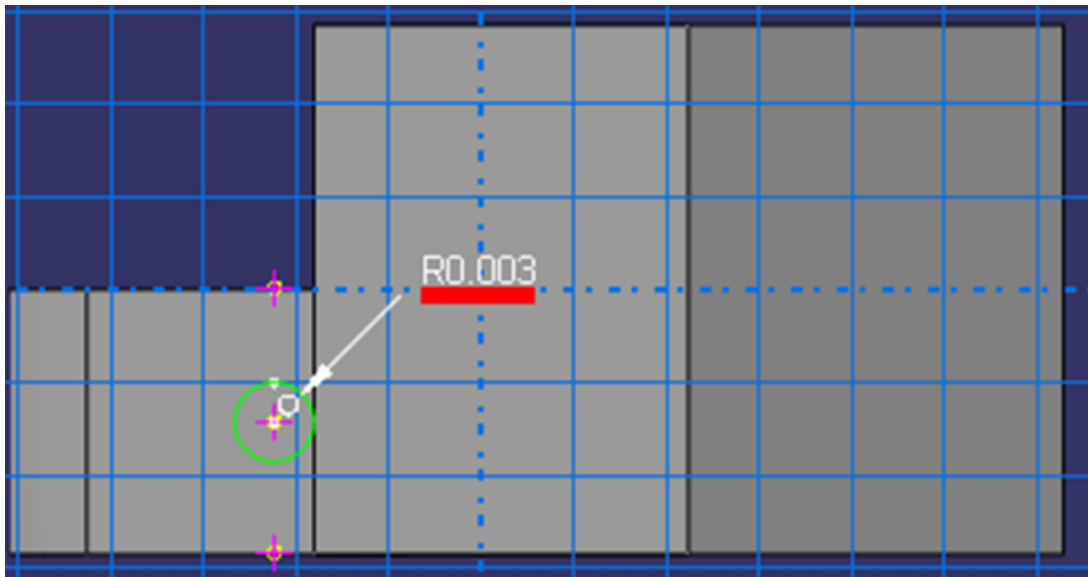


Рисунок 6.18 – Эскиз отверстия

Abaqus/CAE изобразит петлю в изометрическом виде, показав базовую деталь, созданный вами эскиз отверстия и стрелку, указывающую направления выдавливаемого выреза. Он откроет также диалоговое окно Edit Cut Extrusion. В меню Type диалогового окна Edit Cut Extrusion выберите Up to Face, измените направление выдавливания и щелкните ОК (Рисунок. 6.19). Выберите внутреннюю цилиндрическую поверхность отверстия детали, чтобы указать грань, до которой следует произвести вырез, как показано на рисунке 6.20.

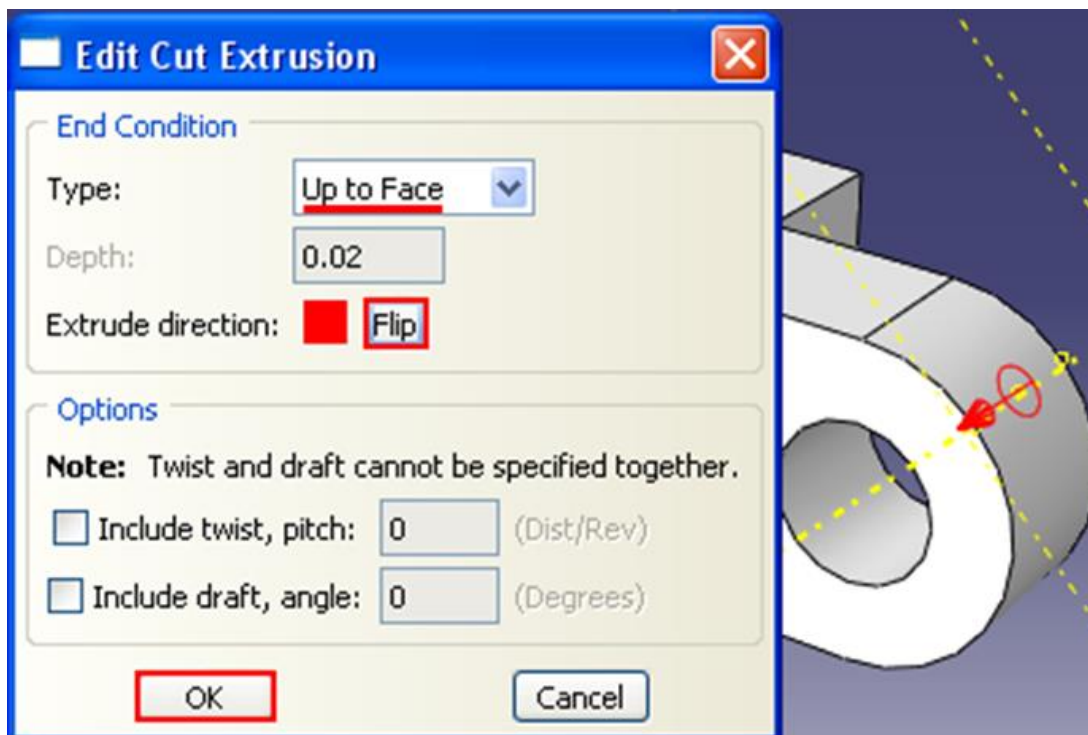


Рисунок. 6.19 – Окно Edit Cut Extrusion

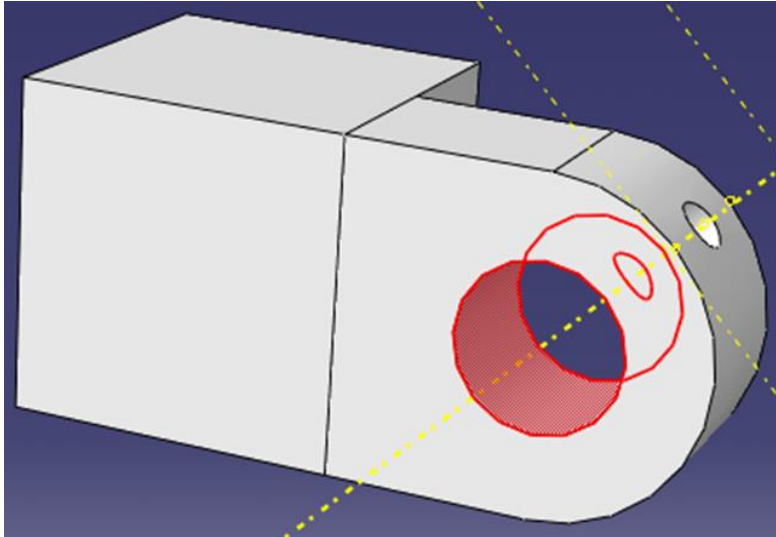


Рисунок. 6.20 – Выбор конечной грани выреза

Abaqus/CAE произведёт выдавливание эскиза от опорной плоскости до выбранной поверхности.

Для гашения опорной геометрии нужно в главном меню выбрать **View** => **Part Display Options** (Рисунок. 6.22).

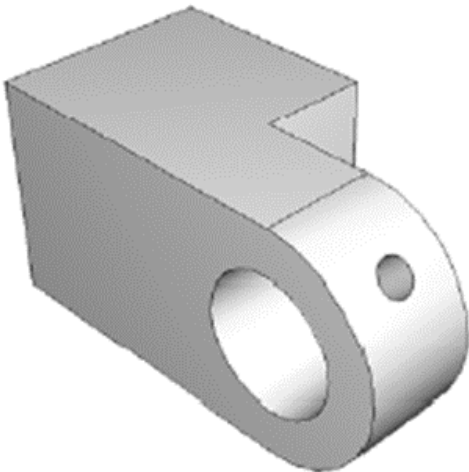


Рисунок. 6.21 – Схема петли с отверстием

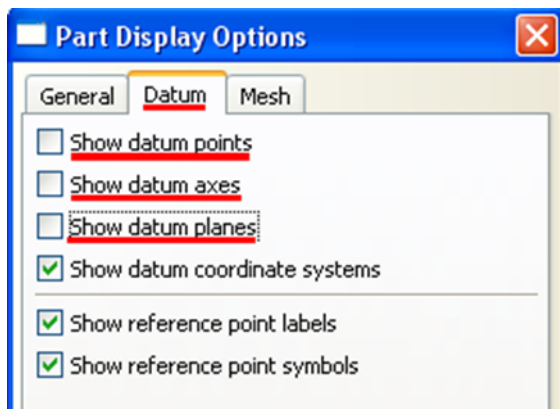


Рисунок. 6.22 - Окно Part Display Options

Теперь, когда вы создали первую часть модели, сохраните ее в базе данных модели. В главном меню выберите File=>Save. Появится диалоговое окно Save Model Database As. Введите имя базы данных новой модели в поле **File Name** и щелкните **ОК**. Нет необходимости вводить расширение; **Abaqus/CAE** автоматически добавит .cae к имени файла. **Abaqus/CAE** сохранит базу данных модели в новом файле и вернется в модуль **Part**. Имя базы данных модели появится в заголовке главного окна.

6.2 Присвоение свойств сечения детали петли

Процесс присвоения свойств сечения детали подразделяется на три задачи:

- а) Создание материала.
- б) Создание сечения, которое содержит ссылку на материал.
- в) Присвоение сечения детали или области детали.

Для начала создадим материал с именем Steel, который имеет модуль Юнга 209 GPa и коэффициент Пуассона, равный 0.6. В Дереве Модели дважды щелкните по контейнеру Materials, чтобы создать новый материал. В появившемся окне Edit Material, задайте имя Steel, в меню редактора выберите Mechanical=>Elasticity=>Elastic и введите в соответствующих полях формы Elastic: 209E9 для модуля Юнга и значение 0.3 для коэффициента Пуассона. Щелкните ОК, чтобы выйти из редактора материала (Рисунок. 6.23).

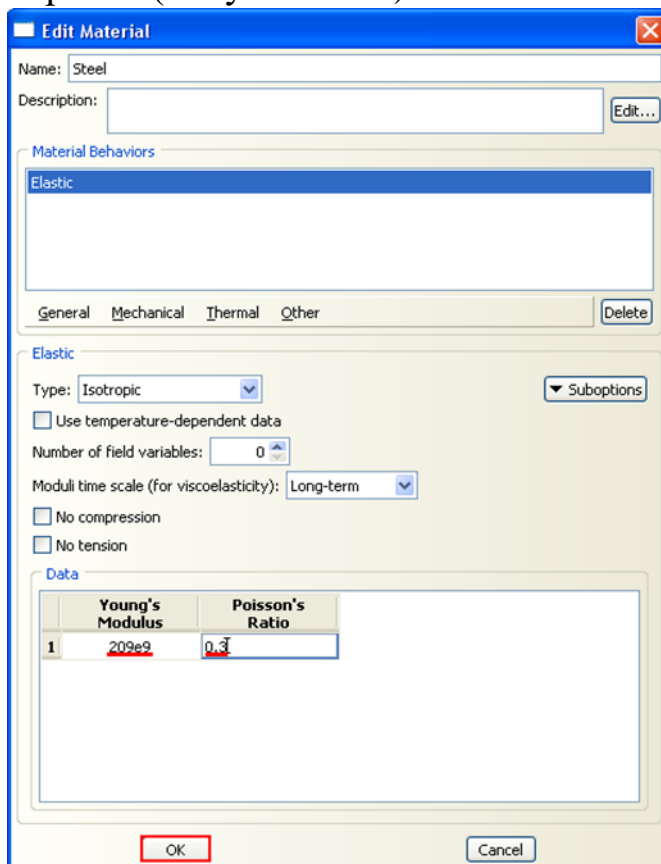


Рисунок. 6.23 – Окно Edit Material

Теперь перейдём к определению сечения. В Дереве Модели дважды щелкните по контейнеру **Sections**, чтобы создать новое сечение. В диалоговом окне **Create Section** задайте имя **SolidSection**, примите в соответствующих списках **Solid**, **Homogeneous** и щелкните **Continue**. Появится редактор сечения **Edit Section** (Рисунок 6.24). В качестве выбора материала выберите **Steel**. Примите значение по умолчанию для **Plane stress/strain thickness** и нажмите **OK**.


Присвойте созданное сечение нашей детали, воспользовавшись клавишей **Assign Section** .



Рисунок. 6.24 – Окно Edit Section

6.3 Создание и модификация второй петли.

Модель содержит вторую навесную петлю, аналогичную первой, за исключением того, в ней отсутствует отверстие для смазки. Вы создадите копию первой петли и удалите элемент, который образует это отверстие. В Дереве Модели щелкните 3-й кнопкой мыши по **Hinge-hole** в контейнере **Parts** и в появившемся меню выберите **Copy**. В текстовом поле диалогового окна наберите **Hunge-solid** и щелкните **OK**. **Abaqus/CAE** создаст копию навесной петли и даст ей имя **Hinge-solid**. Эта копия включает сечение из исходной детали. Теперь модифицируем **Hinge-solid**, удалив из неё элементы, которые образуют отверстие для смазки. Для этого В Дереве Модели дважды щелкните по **Hunge-solid**, под контейнером **Parts**, чтобы сделать его текущим. Раскройте контейнер **Feature** под **Hinge-solid**. Щелкните 3-й кнопкой мыши по **Datum pt-1** в списке элементов детали (Рисунок. 6.25). **Abaqus/CAE** подсветит опорную точку.

В появившемся меню выберите **Delete**. **Abaqus/CAE** подсвечивает все элементы, которые будут удалены. Среди кнопок в области инструкций щелкните **Yes**.

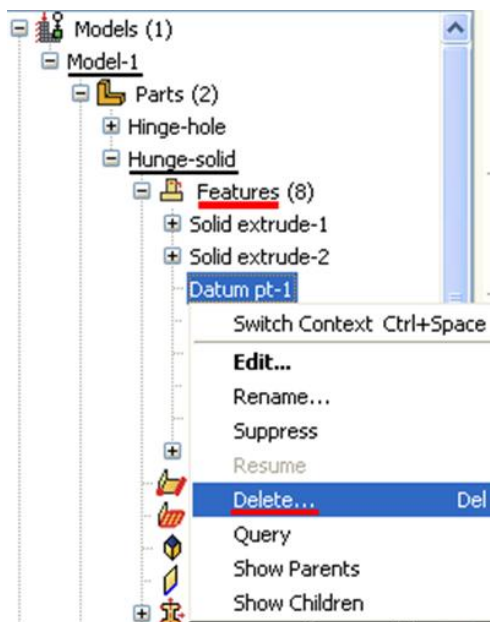


Рисунок. 6.25 – Удаление Datum pt-1

6.4 Создание штифта.

Окончательная сборка состоит из двух петель, которые свободно вращаются вокруг штифта. Вы будете моделировать штифт как трёхмерную аналитическую поверхность вращения. Сначала вы создадите штифт и присвоите ему опорную точку «типа жёсткого тела»; затем создадите ограничения на штифт, задав их на эту опорную точку.

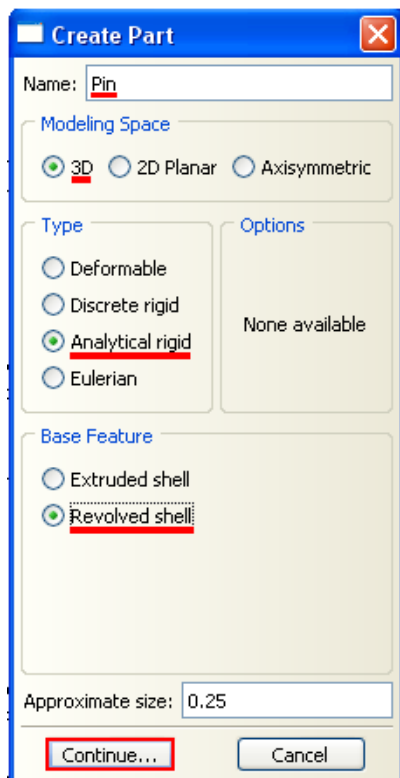


Рисунок. 6.26 – Создание геометрии штифта

В Дереве Модели дважды щелкните по контейнеру Parts, чтобы создать новую деталь. Дайте ему имя Pin. Выберите, как и ранее, трёхмерное тело, но измените тип на Analytical rigid и базовое свойство формы на Revolved shell (Рисунок. 6.26).

Запустится Эскиз и покажет ось вращения в виде зелёной пунктирной линии.

Из палитры инструментов Эскиза выберите **Create Lines**. Нарисуйте вертикальную линию справа от оси. Установите размер для горизонтального расстояния от оси до линии и измените расстояние на значение 0.01. Установите размер для вертикальной линии и измените длину на значение 0.06 (Рисунок. 6.27). Щелкните средней кнопкой мыши, чтобы выйти из Эскиза. Результирующая залитая тенью деталь штифта показана на рисунке 6.28.



Рисунок. 6.27 – Эскиз штифта

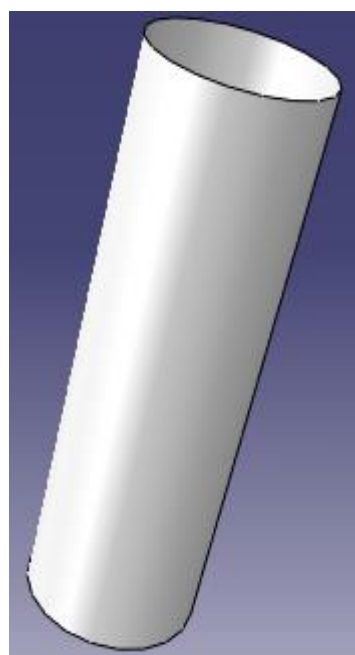


Рисунок. 6.28 – Геометрия штифта

Теперь нам необходимо присвоить штифту опорную точку «типа жёсткого тела». Поскольку вы не присваиваете ему массу или вращательный момент инерции, то опорная жёсткая точка может быть размещена в любой точке графического окна. Для создания ограничения на опорную жёсткую точку или определения вращения вы используете модуль **Load**. Ограничение движения или жесткости, приложенное к опорной точке, применяется ко всей поверхности. Вы можете либо выбрать опорную точку на детали в графическом окне, или можете ввести ее координаты. В главном меню выберите Tools→Reference Point. Выберите одну из вершин на периферии штифта. **Abaqus/CAE** отметит вершину **RP**, указывая тем самым, что она является опорной точкой (Рисунок. 6.29).

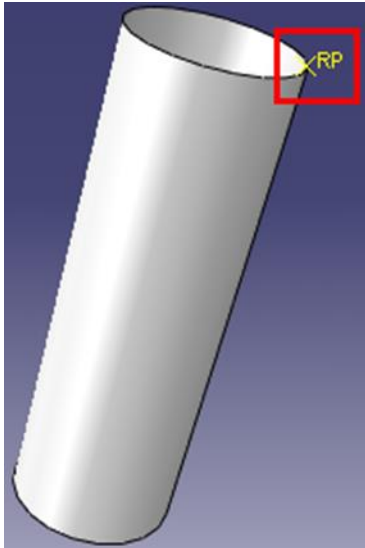


Рисунок. 6.29 – Выбор опорной точки

6.5 Сборка модели.

Следующей задачей является создание сборки деталей. Каждую исходную деталь нужно представить как элемент сборки. После этого необходимо произвести позиционирование элементов в глобальной системе координат. Вы не можете непосредственно редактировать геометрию элемента сборки. Это можно сделать через изменение исходной детали. И если изменить её геометрию, то **Abaqus/CAE** автоматически обновит все элементы, чтобы отразить эти изменения. Сборка может содержать несколько элементов одной детали, например заклёпку, которая используется многократно в сборке листового материала.

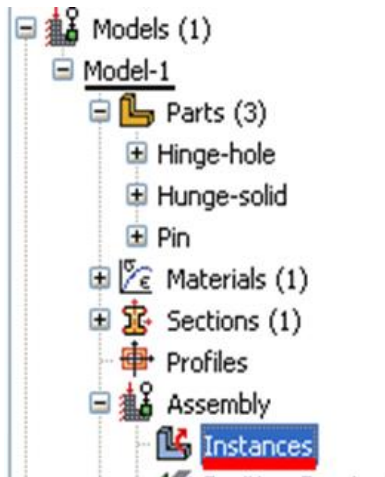


Рисунок. 6.30 – Добавление деталей в сборку

Для начала создадим следующие элементы сборки:

- а) Элемент части петли с отверстием для смазки — *Hinge-hole*.
- б) Элемент части петли без отверстия для смазки — *Hinge-solid*.
- в) Элемент штифта — *Pin*

В Дереве Модели раскройте контейнер Assembly (Рисунок 6.30). Затем дважды щелкните по Instances в появившемся списке, чтобы создать новый экземпляр детали. Появится диалоговое окно Create Instance (Рисунок 6.31), содержащее список всех деталей в текущей модели — в данном примере две части петли и штифт. В нём выберите



Рисунок 6.31 – Окно Create Instance

Выберите Hinge-hole и щелкните Apply. **Abaqus/CAE** создаст зависимый экземпляр части петли и покажет рисунок, указывающий начало и ориентацию глобальной системы координат и присвоит имя экземпляру *Hinge-hole-1*, чтобы указать, что это первый экземпляр детали с именем *Hinge-hole*.

Теперь вы создадите экземпляр сплошной части петли. Чтобы его отделить части петли с отверстием для смазки, вы попросите **Abaqus/CAE** сместить новый элемент вдоль оси X. Для этого в диалоговом окне **Create Instance** включите опцию **Auto-offset from**, выберите **Hunge-solid** и щелкните **ОК** (Рисунок. 6.32).

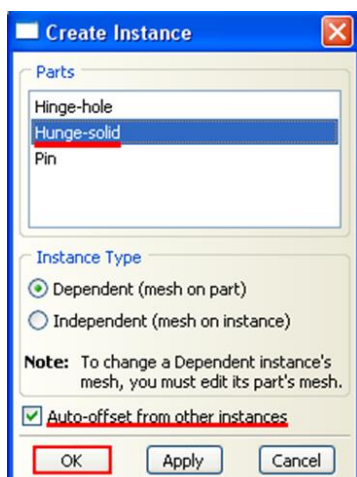


Рисунок. 6.32 – Добавление второй детали в сборку

Abaqus/CAE закроет диалоговое окно, создаст новый зависимый экземпляр и использует смещение вдоль оси X, чтобы отделить две петли, как показано на рисунке 6.36.

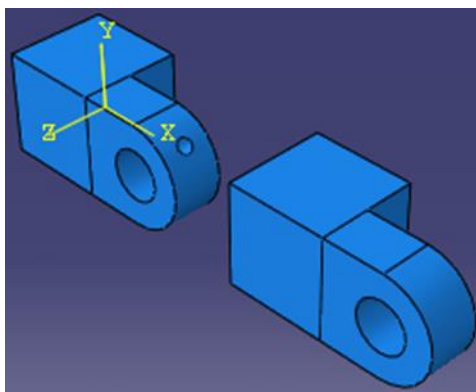


Рисунок. 6.33 – Начальная сборка из двух петель

Теперь перейдём к позиционированию элемента сплошной части петли. В дополнение к процедурам простого перемещения и вращения модуль **Assembly** предоставляет набор инструментов, позволяющих позиционировать выбранный экземпляр детали, определяя взаимосвязи между выделенными гранями и рёбрами.

В главном меню выберите **Constraint**. Здесь представлены следующие опции модуля **Assembly**:

Parallel face (параллельная грань): Перемещаемый экземпляр движется до тех пор, пока выделенные грани не станут параллельными.

Face to Face (грань к грани): Перемещаемый экземпляр движется до тех пор, пока две выделенные грани не станут параллельными и между ними не будет установлен определённый зазор.


Parallel Edge (параллельные рёбра): Перемещаемый экземпляр движется до тех пор, пока два выделенных ребра не станут параллельными

Edge to Edge (ребро к ребру): Перемещаемый экземпляр движется до тех пор, пока два выделенных ребра не станут параллельными и расположатся на заданном расстоянии друг от друга.

Coaxial (коаксиальные): Перемещаемый экземпляр движется до тех пор, пока две выделенные грани не станут коаксиальными.

Coincident Point (совмещение): Перемещаемый экземпляр движется до тех пор, пока две выделенные точки не совместятся.

Parallel CSYS: Перемещаемый экземпляр движется до тех пор, пока две выделенные опорные системы координат не станут параллельными.

В данном примере вы будете перемещать сплошную часть петли, а петля с отверстием для смазки будет оставаться неподвижной. Вначале повернём сплошную часть петли относительно оси Y на угол равный 180 градусам. Для этого включите опцию **Rotate** .

Выберете сплошную часть петли в качестве объекта вращения и на нажмите **Done** (Рисунок. 6.34).

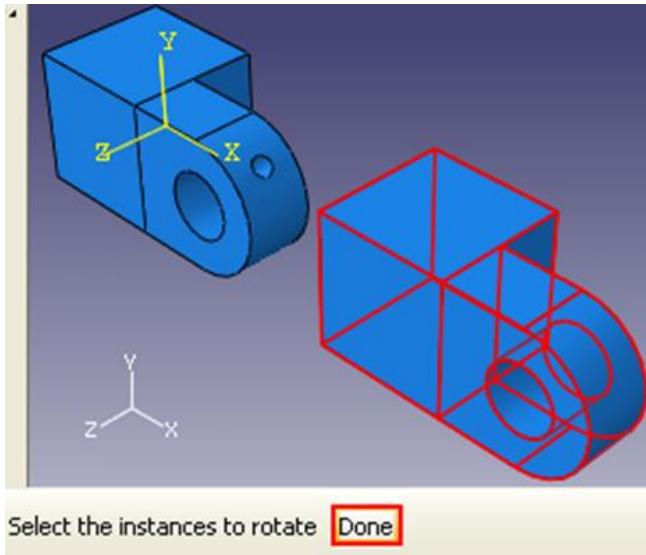


Рисунок. 6.34 – Пример выбора детали для вращения

Определим точку, относительно которой будет повернута наша деталь, вводим координаты (0, 0, 0) (Рисунок. 6.35). Нажимаем клавишу **Enter**.



Рисунок. 6.35 – Ввод координат точки вращения

Теперь нам предлагают выбрать ось вращения, вводим координаты (0, 1, 0) (Рисунок. 6.36) и нажимаем **Enter**.



Рисунок. 6.36 – Выбор оси вращения

Далее следует ввести угол поворота. Ставим значение 180 (Рисунок. 6.37) и нажимаем **Enter**.

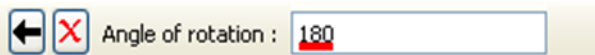


Рисунок. 6.37 – Ввод угла поворота

Нажимаем **ОК**. **Abaqus/CAE** повернул нашу деталь. Нажмите **Auto-Fit View**  для того, чтобы увидеть обе детали.

Теперь из основного меню выберите **Constraint => Coincident Point**. Теперь выберите точку на сплошной части петли так, как показано на рисунке 6.38



Рисунок. 6.38 – Схема выбора точки первой точки совмещения
Щелкните по точке на фланце с отверстием (Рисунок. 6.39).



Рисунок. 6.39 - Схема выбора точки второй точки совмещения **Abaqus/CAE** расположит две части петли так, как показано на рисунке 6.40

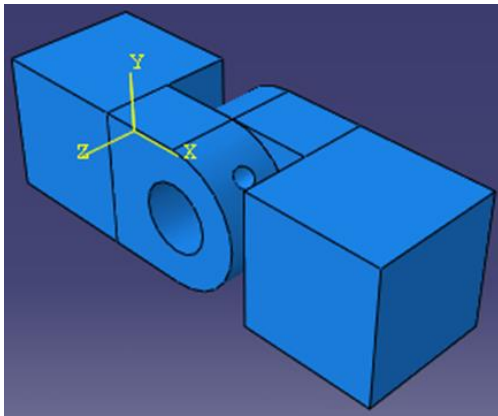


Рисунок. 6.40 – Схема сборки совмещённых петель

Теперь вы создадите экземпляр штифта и расположите его симметрично в отверстиях фланцев, используя ограничения на векторы перемещения. В *Дереве Модели* дважды щелкните по **Instances** в контейнере **Assembly**. В диалоговом окне **Create Instance** выключите опцию **Auto-offset from other instances** и создайте экземпляр штифта (Рисунок. 6.41).

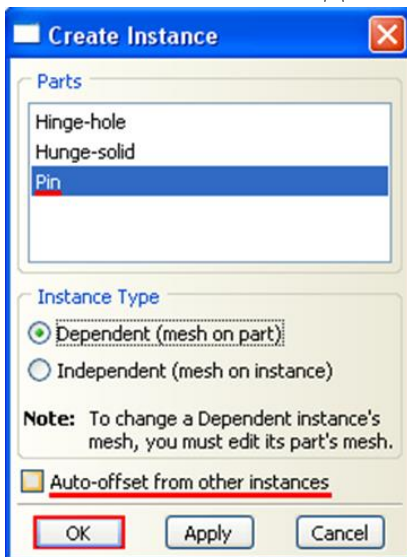


Рисунок. 6.41 – Добавления штифта в сборку

Задайте ограничение так, чтобы штифт располагался вдоль той же оси, что и отверстия во фланцах. Используйте меню Constraint => Coaxial. Выберите в качестве тела перемещения штифт. Теперь щелкните по цилиндрической поверхности любого из фланцев (Рисунок. 6.42). И нажмите **ОК**.

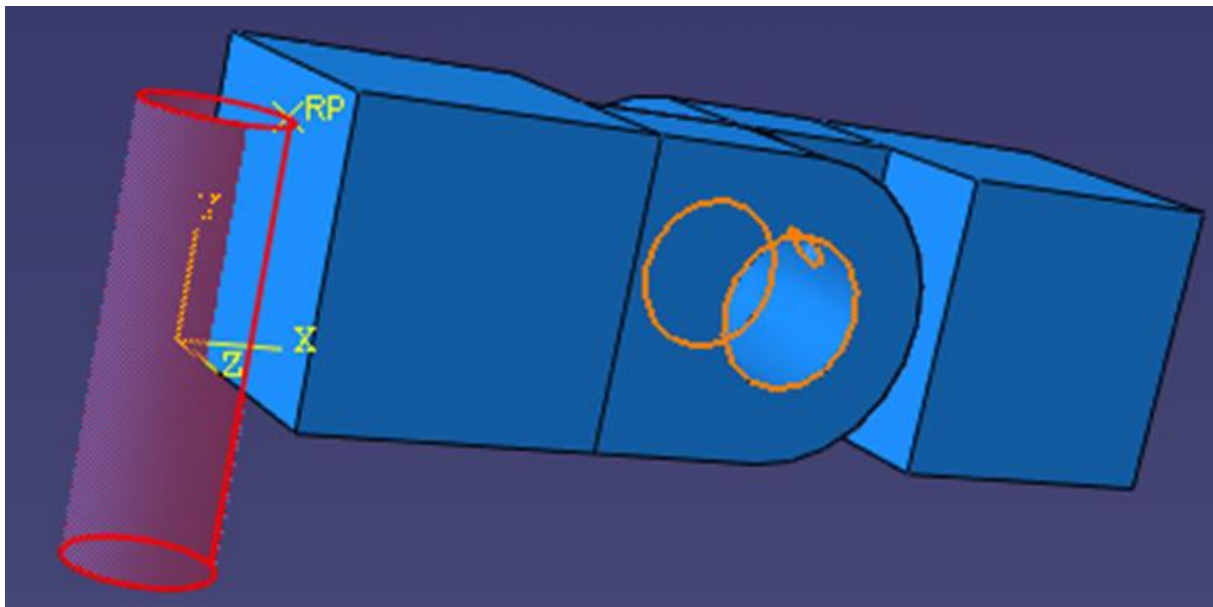


Рисунок. 6.42 – Выбор штифта для перемещения **Abaqus/CAE** расположит штифт, как показано на рисунке 6.46.

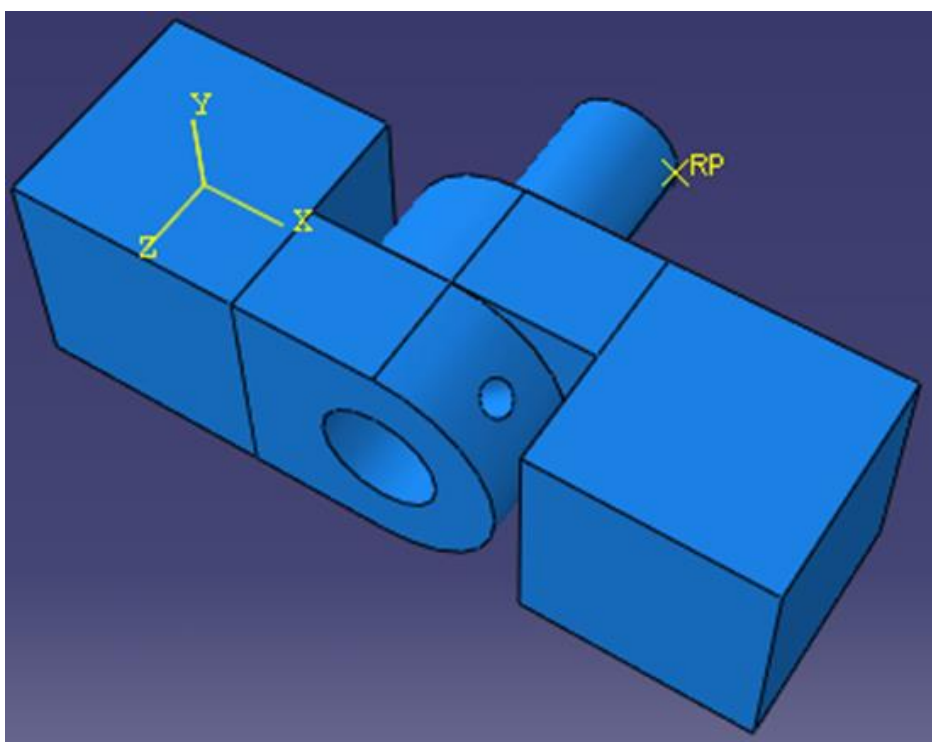




Рисунок. 6.43 – Расположение штифта в сборке (Этап 1)

Теперь используя опцию Translate Instance , переместим наш штифт по оси Z. Нажмите  и выберите штифт (Рисунок. 6.44)

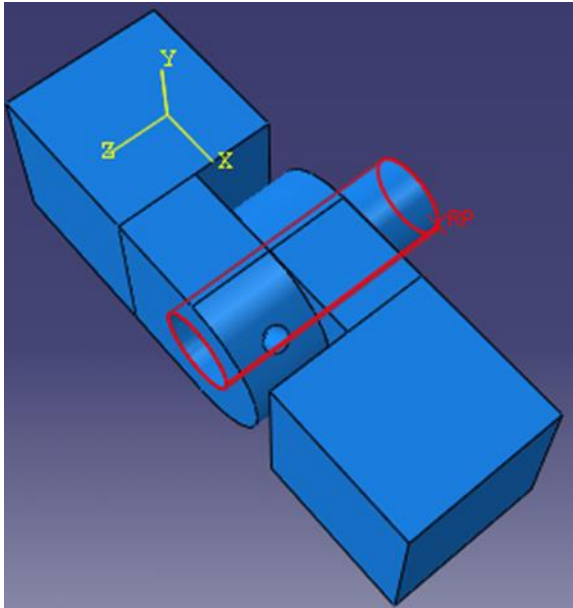


Рисунок. 6.44 - Расположение штифта в сборке (Этап 2)

Нажимаем **Done**. Далее нужно выбрать стартовую точку. Вводим координаты (0.06, 0.02, 0.04) (Рисунок. 6.45) и нажимаем **Enter**.



Рисунок. 6.45 – Ввод координат стартовой точки

Теперь задаём координаты конечной точки (0.06, 0.02, 0.06) (Рисунок. 6.46) и нажимаем **Enter**.



Рисунок. 6.46 – Ввод координат конечной точки

Abaqus/CAE переместит штифт на расстояние 0.02 вдоль оси *Z* и покажет изображение его нового положения (Рисунок. 6.47).

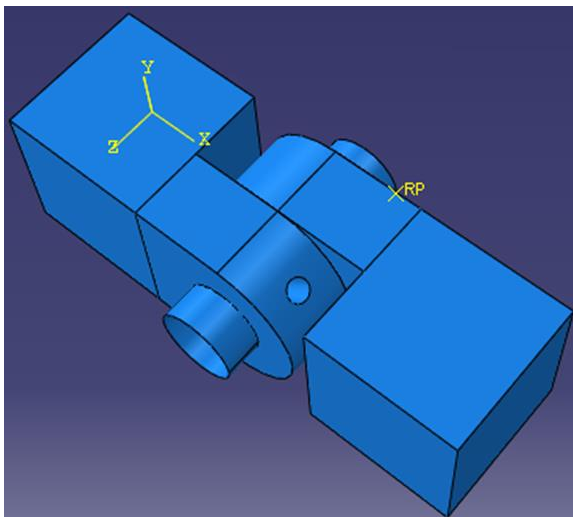


Рисунок. 6.47 - Расположение штифта в сборке (Этап 3)

6.6 Определение шагов анализа.

Теперь необходимо задать шаги анализа. В нашей задаче будет присутствовать 3 шага: один начальный и два общих. На начальном шаге вы зададите граничные условия на области модели и определите контактные взаимодействия между ними. На первом общем шаге анализа будут учитываться условия контакт. А на втором шаге вы измените два граничных условия, приложенных к модели и зададите нагрузку в виде давления к одной из частей петли. **Abaqus/CAE** создает начальный шаг по умолчанию, но вы должны создать ещё два шага.

Чтобы создать новый шаг, нужно в *Дереве Модели* дважды щёлкнуть по контейнеру Steps. В окне Create Step задайте имя нового шага анализа – *Contact*. Примите установленный по умолчанию тип **Static, General** и щелкните **Continue** (Рисунок. 6.48). В поле Description наберите Establish contact (Рисунок. 6.49). Щелкните по закладке *Incrementation* и удалите значение 1, которое появилось в текстовом поле Initial. Введите значение 0.1 для определения размера начального приращения (Рисунок. 6.50). Щелкните ОК, чтобы создать шаг и выйти из редактора. В контейнере Steps Деревя Модели появится шаг Contact.

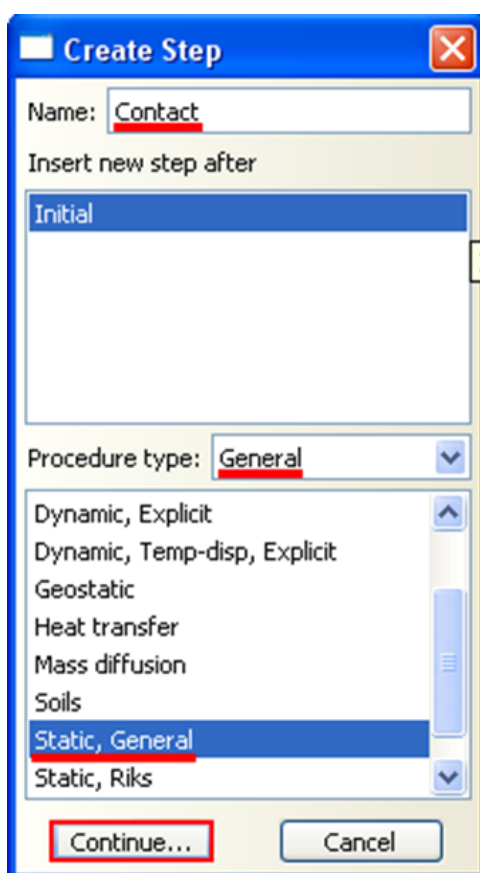


Рисунок. 6.48 – Окно Create Step

Используйте тот же приём, чтобы создать второй общий Static, General шаг с именем Load. В поле описания введите Apply Load и значение 0.1 для начального приращения.

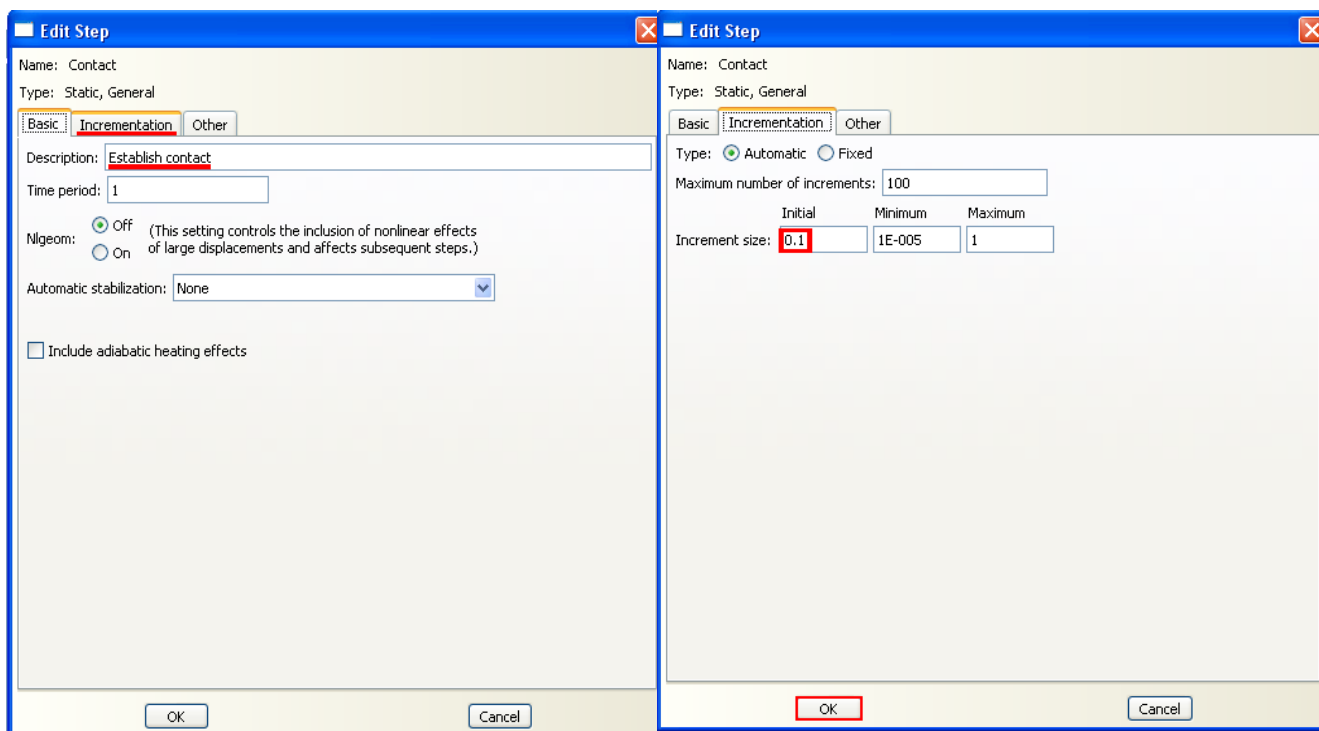


Рисунок. 6.49 – Задание имени шага анализа

Рисунок. 6.50 – Определение значения начального приращения

Сформируем запрос на вывод данных. Для этого нужно воспользоваться контейнером **Field Output Requests** в *Дереве Модели*. Значение выводимых параметров будут записаны с заданной частотой в выходную базу данных из всей модели или из ее части. Вывод переменных поля используется для генерирования графиков деформированной формы, контурных графиков и анимаций по данным переменным с высокой частотой из небольшой части модели, например смещение в единичном узле, нужно использовать **History Output Requests** (хронологическую последовательность данных). Эти данные используются для построения X-Y графиков и отчётов по результатам анализа. Когда вы создаёте запрос **History Output**, вы должны выбрать отдельные компоненты переменных, которые должны быть записаны в выходную базу данных.

По умолчанию выходные переменные для шагов Contact и Load включают следующее:

- S (компоненты напряжений)
- PE (компоненты пластической деформации)
- PEEQ (эквивалентные пластические деформации)
- PEMAG (величину пластической деформации)
- LE (компоненты логарифмической деформации)
- U (смещения и вращения)
- RF (силы и моменты реакций)

CF (сосредоточенные силы и моменты)

CSTRESS (контактные напряжения)

CDISP (контактные перемещения)

По умолчанию **Abaqus/CAE** записывает переменные из процедуры **Static, General** в выходную базу данных после каждого шага приращения. Ниже вы измените частоты вывода данных в процессе шага **Contact** так, что данные будут записаны в базы данных только один раз — на последнем приращении.

В Дереве Модели щелкните 3-й кнопкой мыши по контейнеру **Field Output Requests** и в появившемся меню выберите **Manager**. В менеджере **Field Output Requests Manager** выберите запрос **F-Output-1** на шаге **Contact** и щелкните **Edit** (Рисунок. 6.51).

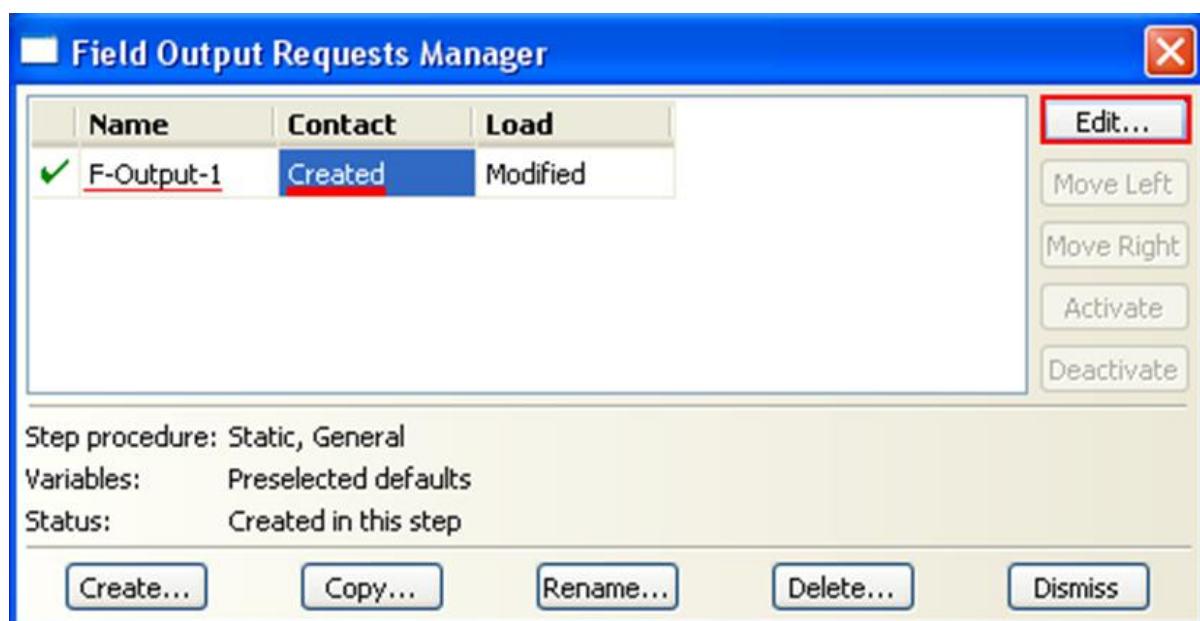


Рисунок. 6.51 – Окно Output Requests Manager

Появится редактор **Edit Field Output Requests** для шага **Contact**. В качестве частоты (**Frequency**) выберите **Last increment**, чтобы сгенерировать вывод только в процессе последнего приращения. Щелкните **ОК**, чтобы модифицировать запрос на вывод данных (Рисунок. 6.52).

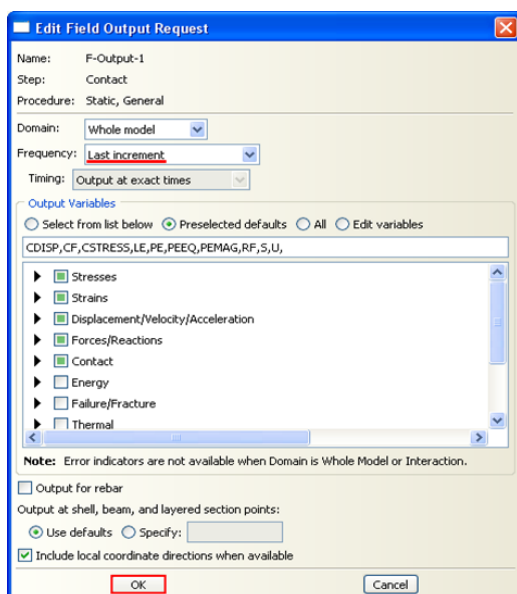


Рисунок. 6.52 - Редактор Edit **Field** Output Requests для шага Contact

Теперь в **Field** Output Requests Manager выберите запрос *F-Output-1* в шаге Load. Среди кнопок в правой части менеджера щелкните по Edit. Появится редактор Edit **Field** Output Requests для шага Load (Рисунок. 6.53). Установите частоту вывод равной 1, чтобы сгенерировать вывод для каждого приращения шага. Выберите нужные вам переменные. Щелкните ОК, чтобы модифицировать запрос на вывод данных. В **Field** Output Requests Manager статус запроса для шага Load изменится на *Modified*.

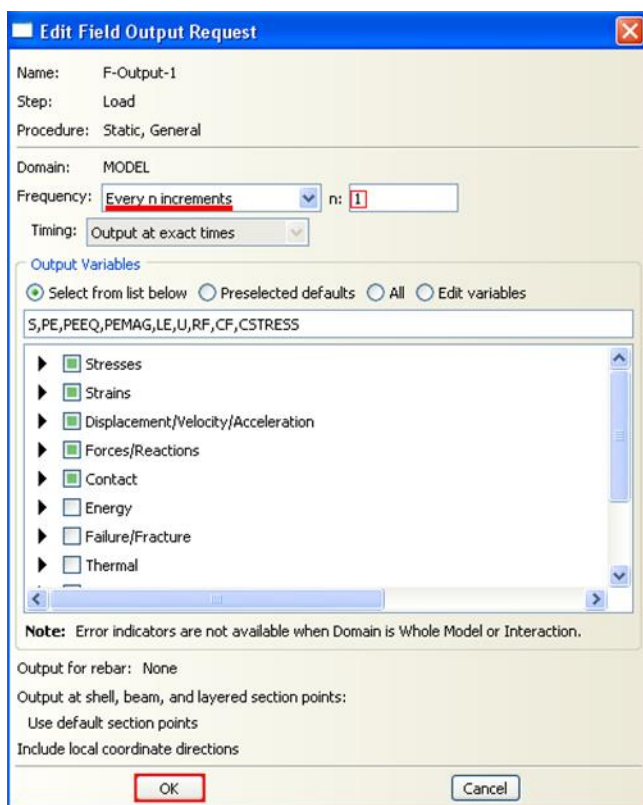


Рисунок. 6.53 - Редактор Edit **Field** Output Requests для шага Load

В нижней части **Field Output Requests Manager** щелкните кнопкой **Dismiss**, чтобы закрыть диалоговое окно.

Теперь определим конкретные наборы элементов или узлов, которые содержат только выбранные части вашей модели. Создав такой набор, вы можете его использовать для выполнения следующих задач:

1. Присвоить свойства сечения в модуле **Property**.
2. Создать контактные пары с набором контактных узлов и поверхностей в модуле **Interaction**.
3. Определить нагрузки и граничные условия в модуле **Load**.
4. Создать запрос на вывод данных либо в выходную базу данных или в файл состояний из заданных областей модели в модуле **Step**. Вывод в файл состояний также отражается в модуле **Job** в виде постоянно обновляемых X-Y графиков.

В данном примере вы определите **Set** (набор узлов), состоящий из единственного узла. Затем вы сможете организовать мониторинг результатов для одной степени свободы в этом узле, когда вы позже инициализируете задание для анализа. Чтобы создать **Set** и мониторинг конкретной степени свободы в Дереве Модели раскройте контейнер **Assembly** и дважды щелкните по элементу **Sets**. Появится диалоговое окно **Create Set**. Дайте набору имя **Monitor** и щелкните **Continue** (Рисунок. 6.54).

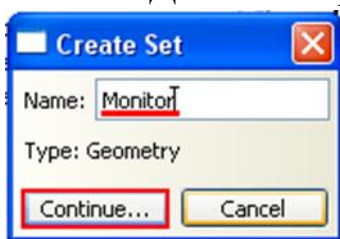


Рисунок 6.54 - Диалоговое окно **Create Set**.

Выберите вершину сплошной части петли, показанную на рисунке 6.55. Щелкните **Done**, чтобы указать, что вы закончили выбор геометрии для набора. **Abaqus/CAE** создаст **Set** с именем **Monitor**, который содержит выбранный узел.

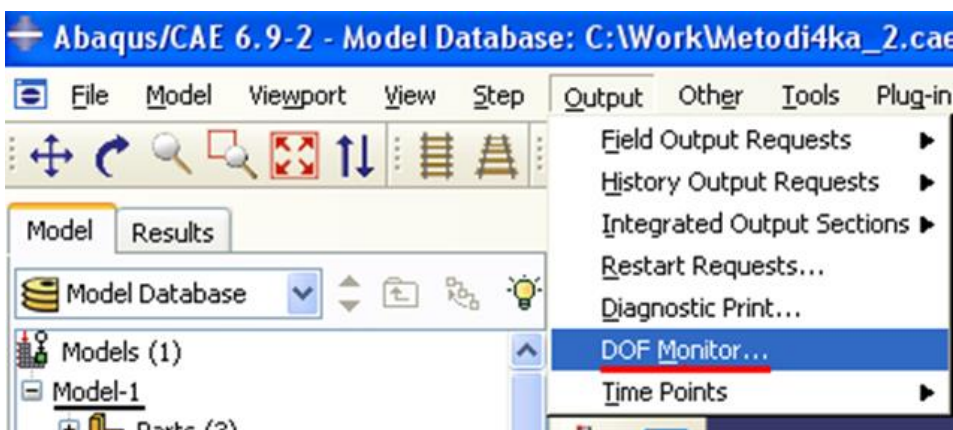


Рисунок. 6.55 – Выбор вершины сплошной части петли

Далее в главном меню модуля Step выберите Output=>DOF Monitor (Рисунок. 6.56).

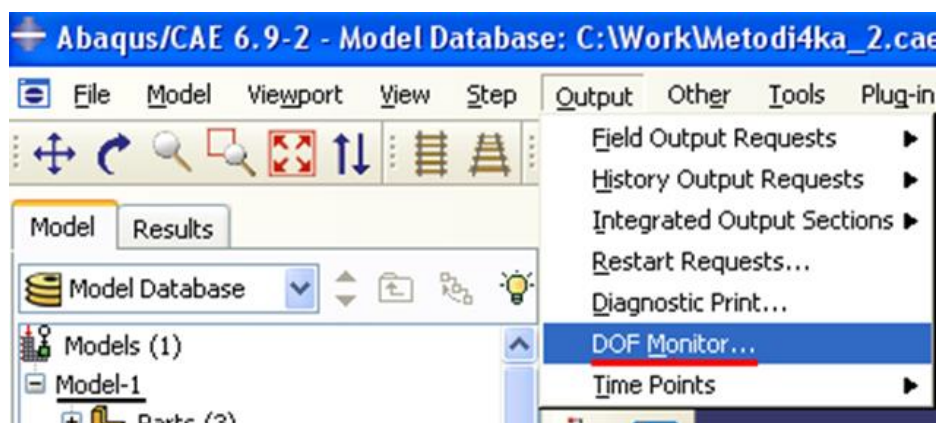


Рисунок 6.56 – Выбор DOF Monitor

Появится диалоговое окно DOF Monitor. Включите опцию Monitor a degree of freedom throughout the analysis. Щелкните Edit (Рисунок. 6.57).



Рисунок 6.57 - Диалоговое окно DOF Monitor (Этап 1)

Затем щелкните Points (левый нижний угол) в области инструкций и выберите набор узлов *Monitor* в диалоговом окне Region Selection (Рисунок. 6.58).

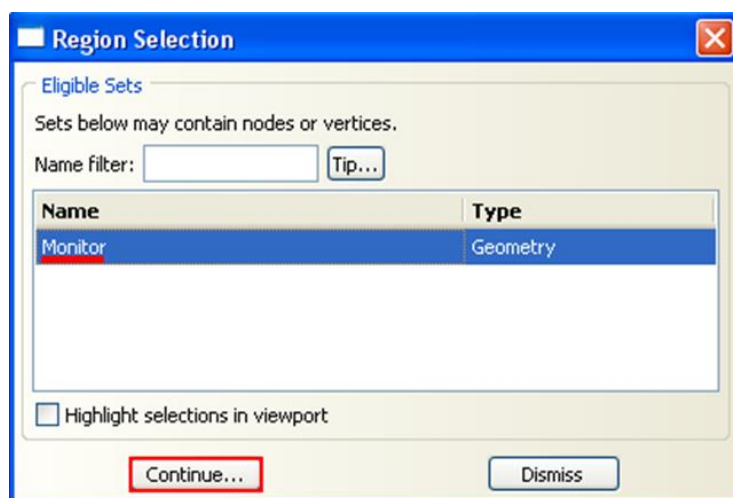


Рисунок 6.58 - Диалоговое окне Region Selection

Наберите 1 в текстовом поле Degree of Freedom и щелкните ОК (Рисунок 6.59).

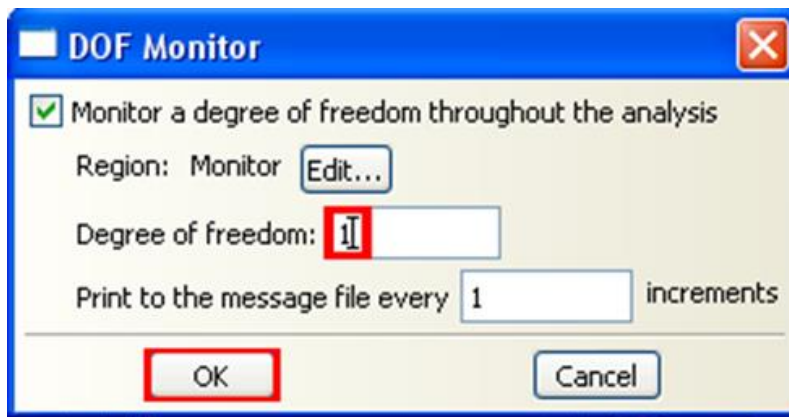


Рисунок 6.59 - Диалоговое окно DOF Monitor (Этап 2)

6.7 Создание поверхностей для использования в контактных взаимодействиях.

Определим контакт между областями модели. Имеется два подхода, которые можно использовать для определения контактных взаимодействий. Первый является ручным, который требует, чтобы вы указали, какие поверхности будут формировать контактные взаимодействия и определить отдельные конкретные контактные пары. Вторым способом является автоматическое определение всех потенциальных контактных пар **Abaqus/CAE**. Последний подход желателен для сложных моделей, содержащих много контактных взаимодействий. Заметим, что опция автоматического определения контактов доступна только для трёхмерных моделей.

На начальном шаге нужно создать контактные поверхности. Нет необходимости всегда заранее создавать их; если модель проста или поверхности легко выбирать, вы можете указывать основную (master) и подчинённую (slave) поверхности непосредственно в графическом окне при создании взаимодействий. Однако, в данном уроке легче определить поверхности отдельно и затем сослаться на их имена при создании взаимодействий. Определим следующие поверхности:

а) Поверхность с именем *Pin*, которая включает внешнюю сторону штифта.

б) Две поверхности с именами *Flange-h* и *Flange-s* из граней фланцев, которые контактируют друг с другом.

в) Две поверхности с именами *Inside-h* и *Inside-s* из внутренних поверхностей фланцев, которые находятся в контакте со штифтом.

Для начала определим поверхность штифта. В *Дереве Модели* раскройте контейнер *Assembly* и дважды щелкните по элементу **Surfaces**. Появится диалоговое окно *Create Surface* (Рисунок 6.60). В этом диалоговом окне дайте поверхности имя **Pin** и щелкните *Continue*. В графическом окне

выберите штифт. Щелкните средней кнопкой мыши, чтобы указать, что вы закончили выбор.

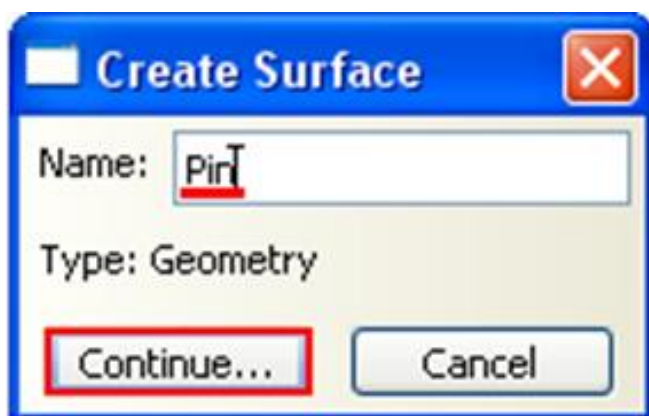


Рисунок 6.60 – Окно создания поверхности

Каждая сторона полого цилиндра, представляющего штифт, имеет разный цвет, ассоциированный с ней. На рисунке 6.61 внешняя сторона штифта окрашена фиолетовым цветом, а внутренняя сторона – коричневым. В вашей модели цвета могут быть обратными, в зависимости от того, как вы создавали исходный эскиз штифта. Нужно выбрать внешнюю сторону штифта, которая контактирует с двумя петлями. Среди кнопок в области инструкций щелкните по цвету Brown или Purple, ассоциированному с внешней поверхностью.

Abaqus/CAE создаст нужную поверхность с именем Pin и покажет ее под элементом **Surfaces** в *Дереве Модели*.

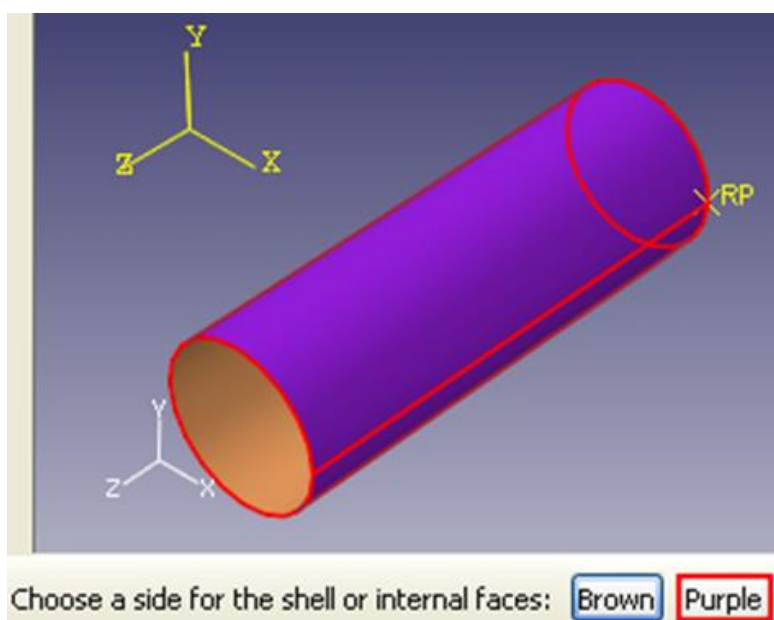


Рисунок 6.61 – Выбор поверхности штифта

Определим поверхности на частях петли. Для более удобного выбора определяемых поверхностей можно сделать невидимыми некоторые из деталей сборки при помощи опции главного меню View => Assembly Display Options. В появившемся диалоговом окне Assembly Display Options, щелкните по закладке Instance (Рисунок. 6.62). Экземпляры детали, которые вы создали, перечислены в списке с отметками в столбце **Visible**. По умолчанию видимы все экземпляры деталей. Щелкните в столбце Visible рядом с *Pin-1* и *Hinge-solid-1*, и щелкните Apply. Abaqus/CAE покажет в графическом окне только часть петли с отверстием для смазки.

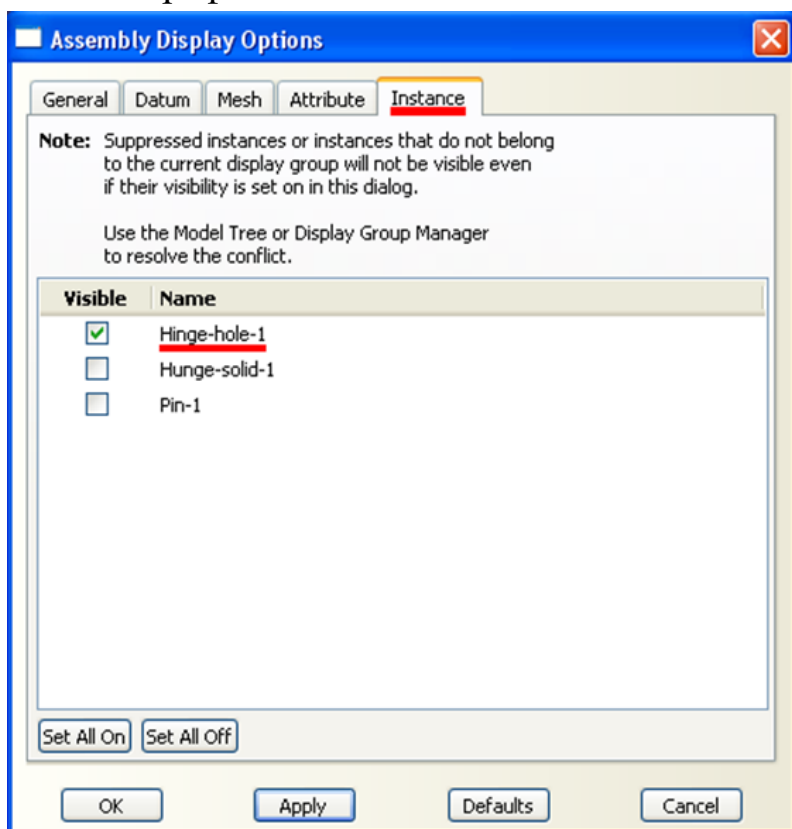


Рисунок 6.62 – Закладка Instance в окне Assembly Display Options

В *Дереве Модели* дважды щелкните по Surfaces под контейнером Assembly. Появится диалоговое окно Create Surface. В этом диалоговом окне дайте имя *Flange-h* и щелкните Continue. На экземпляре с отверстием для смазки выберите грань фланца, которая контактирует с другим фланцем, как показано на рисунке 6.66. (Может быть, вам потребуется повернуть изображение, чтобы лучше увидеть эту грань). Когда выберите нужную грань, щелкните средней кнопкой мыши, чтобы подтвердить свой выбор.

Abaqus/CAE создаст нужную поверхность с именем *Flange-h* и покажет её в *Дереве Модели* под контейнером **Surfaces**.

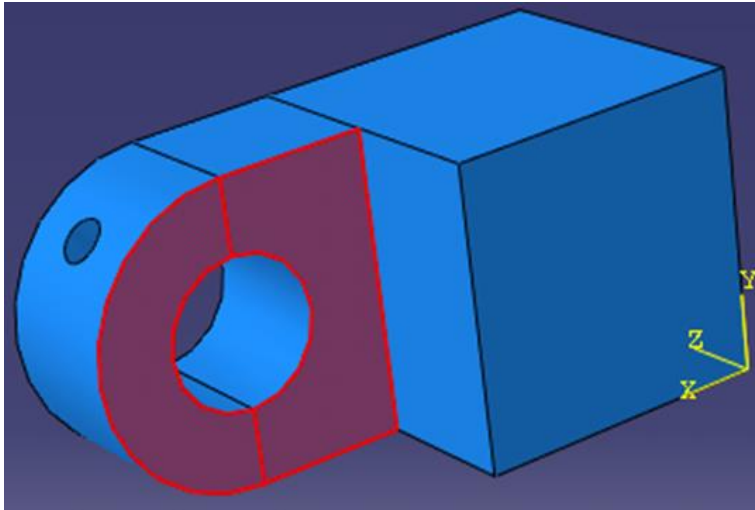


Рисунок. 6.63 – Выбор грани фланца

Теперь создадим поверхность *Inside-h*, которая включает внутреннюю цилиндрическую поверхность части петли с отверстием для смазки, как показано на рисунке 7.67. (Вам, возможно, потребуется увеличить изображение, чтобы выбрать эту поверхность).

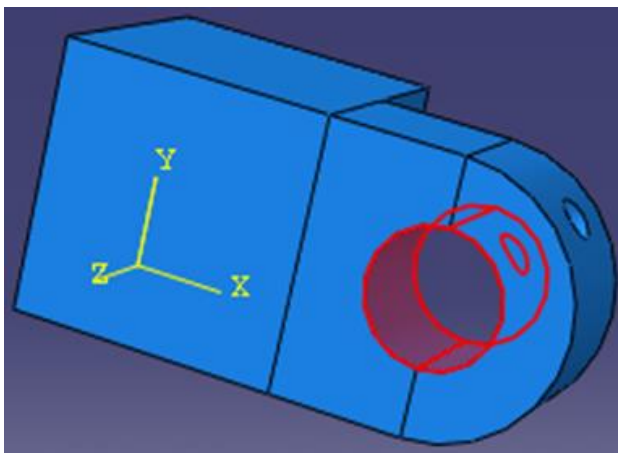


Рисунок. 6.64 – Выбор внутренней части петли с отверстием

Измените установки видимости так, чтобы была видима только *Hinge-solid-1*. По аналогии создайте поверхность с именем *Flange-s*, которая содержит соответствующую грань сплошной части петли (Рисунок 6.65).

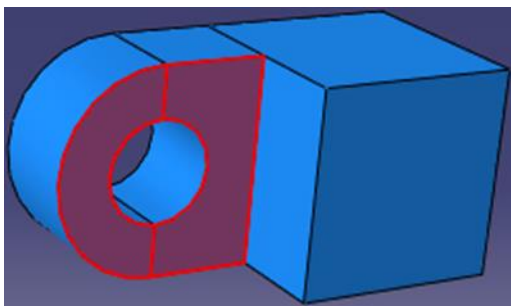


Рисунок. 6.65 - Выбор второй грани фланца

В заключение создайте поверхность с именем *Inside-s*, которая включает внутреннюю цилиндрическую поверхность сплошной части петли (Рисунок 6.66).

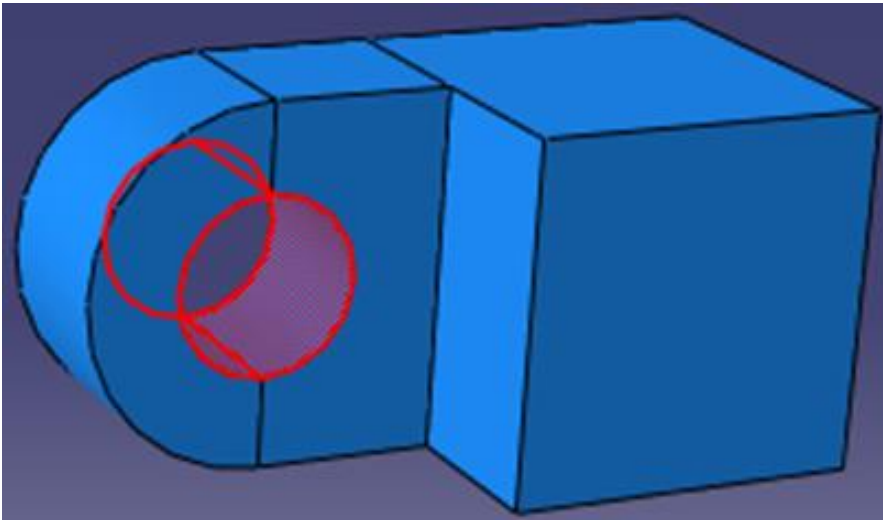


Рисунок 6.66 - Выбор внутренней части сплошной петли

После определения поверхностей определим контактные пары:

Контакт между экземпляром детали Hinge-hole-1 и штифтом. Назовём его *HingePin-hole*.

Контакт между экземпляром детали *Hinge-solid-1* и штифтом *HingePin-solid*.

Контакт между двумя фланцами *Flange*.

Каждое из трех взаимодействий требует оказания свойства контакта. В них собрана информация, которая полезна вам для определения конкретных типов взаимодействий. Для создания свойств контакта в Дереве Модели дважды щелкните по контейнеру Interaction Properties, чтобы создать контактное свойство. Появится диалоговое окно Create Interaction Property. Дайте имя свойству *NoFric*. В списке Type примите выбор по умолчанию Contact и щелкните Continue (Рисунок 6.67).

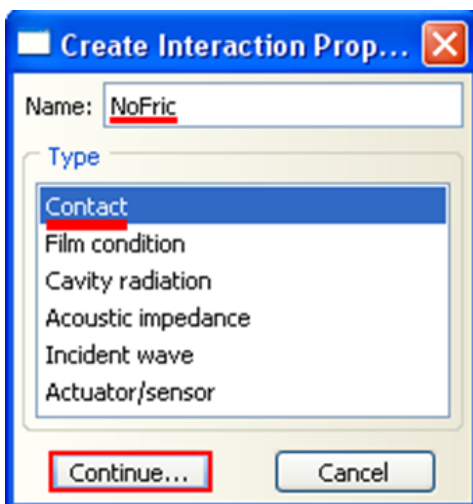


Рисунок 6.67 - Создание свойств контакта

Появится диалоговое окно Edit Contact Property (Рисунок. 6.68). Из меню диалогового окна выберите Mechanical => Tangential Behavior и примите для трения формулировку Frictionless (без трения). Щелкните **ОК**, чтобы сохранить установки и закрыть диалоговое окно Edit Contact Property.

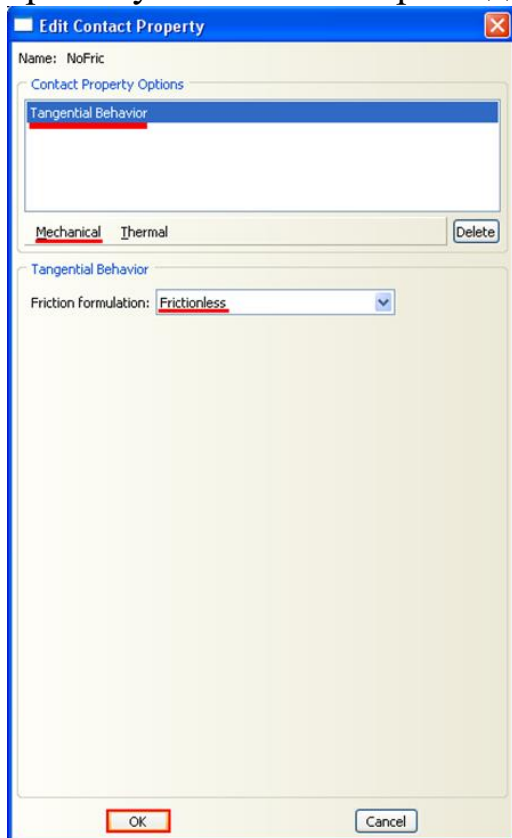


Рисунок 6.68 - Окно Edit Contact Property

Теперь приступим непосредственно к заданию контактных взаимодействий. Каждое взаимодействие будет ссылаться на свойство, которое вы только что создали. Как было отмечено ранее, существуют два способа определения взаимодействия: ручной, либо автоматический. Для начала воспользуемся ручным способом.

В *Дереве Модели* щелкните 3-й кнопкой мыши по контейнеру **Interaction** и в появившемся меню выберите Manager. Появится диалоговое окно Interaction Manager. Теперь в левом нижнем углу этого окна щелкните Create (Рисунок. 6.69).

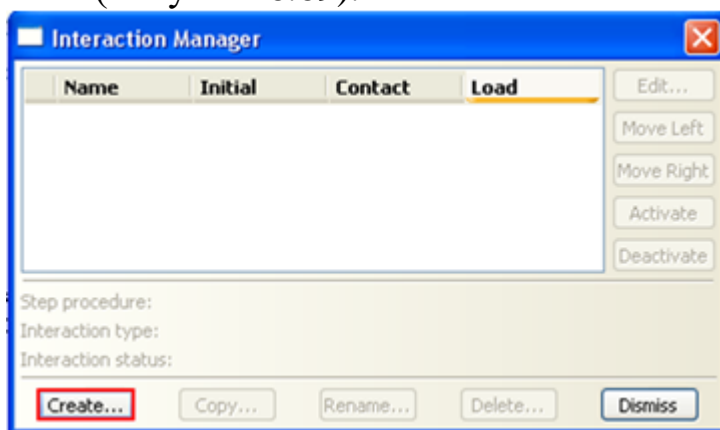


Рисунок 6.69 - Окно Interaction Manager.

Появится диалоговое окно Create Interaction. В этом диалоговом окне дайте взаимодействию имя **HingePin-hole**. В списке шагов выберите Initial. В списке Types for Selected Step примите выбор по умолчанию Surface-to-surface contact (Standard) и щелкните Continue (Рисунок. 6.70).

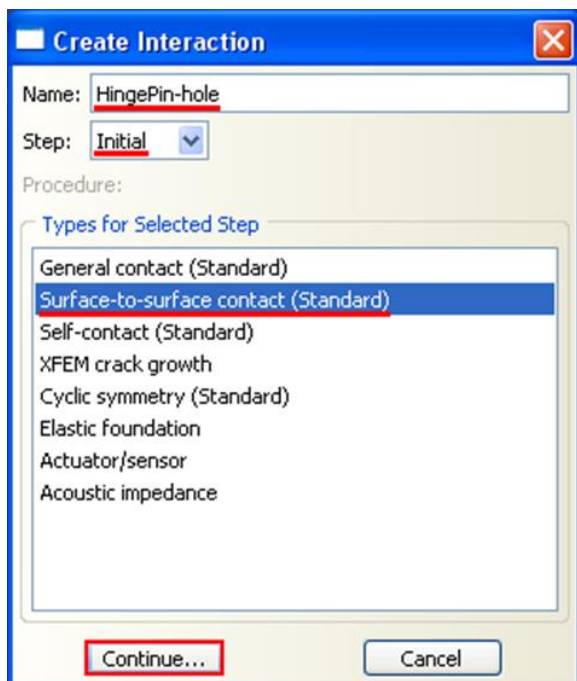


Рисунок 6.70 - Окно Create Interaction

Появится диалоговое окно Region Selection, содержащее список поверхностей, которые вы определили ранее.

Замечание: если диалоговое окно не появляется автоматически, щелкните по кнопке **Surfaces** в самой правой стороне области инструкций.

В диалоговом окне Region Selection выберите **Pin** в качестве ведущей (master) поверхности, и щелкните Continue (Рисунок. 6.71).

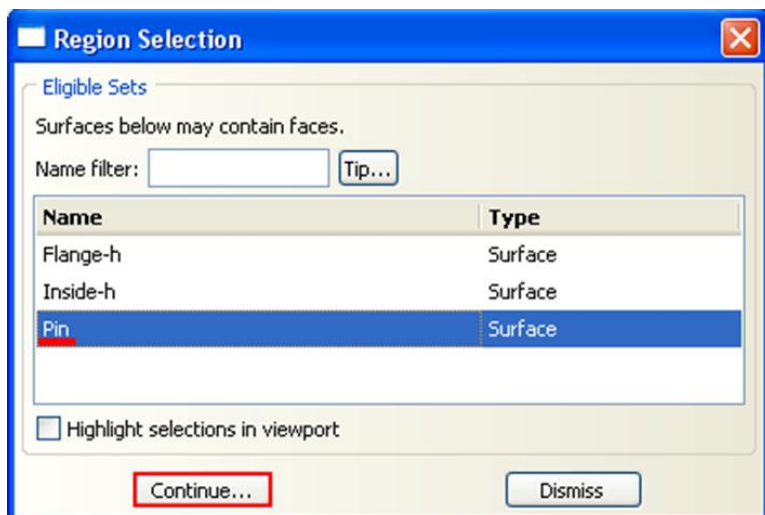


Рисунок 6.71 – Выбор Pin в окне Create Interaction

Теперь среди кнопок в области инструкций выберите Surface в качестве подчинённого типа (Рисунок. 6.72).

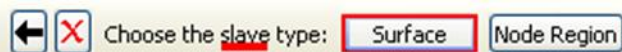


Рисунок 6.72 - Выбор Surface в качестве подчинённого типа
В диалоговом окне Region Selection выберите **Inside-h** в качестве подчинённой (slave) поверхности, и щелкните Continue (Рисунок 6.73).

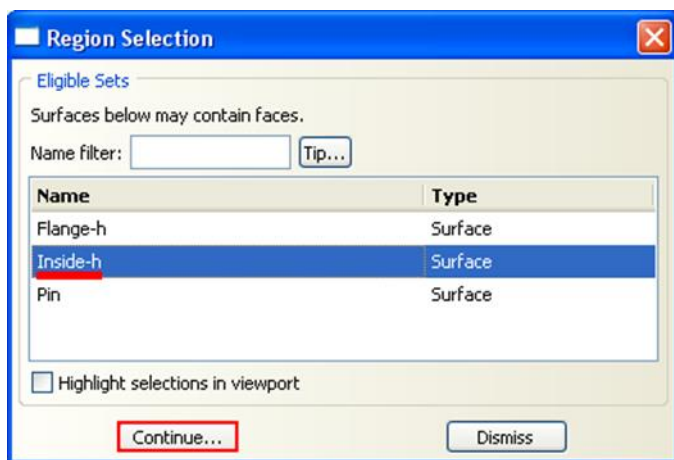


Рисунок 6.73 – Выбор Inside-h в качестве подчинённой поверхности
Появится диалоговое окно Edit Interaction. В нём для Sliding formulation примите выбор по умолчанию Finite sliding, для Slave Adjustment примите выбор по умолчанию No Adjustment. В качестве свойства выберите NoFric. Щелкните ОК, чтобы сохранить взаимодействие и закрыть диалоговое окно (Рисунок 6.74).

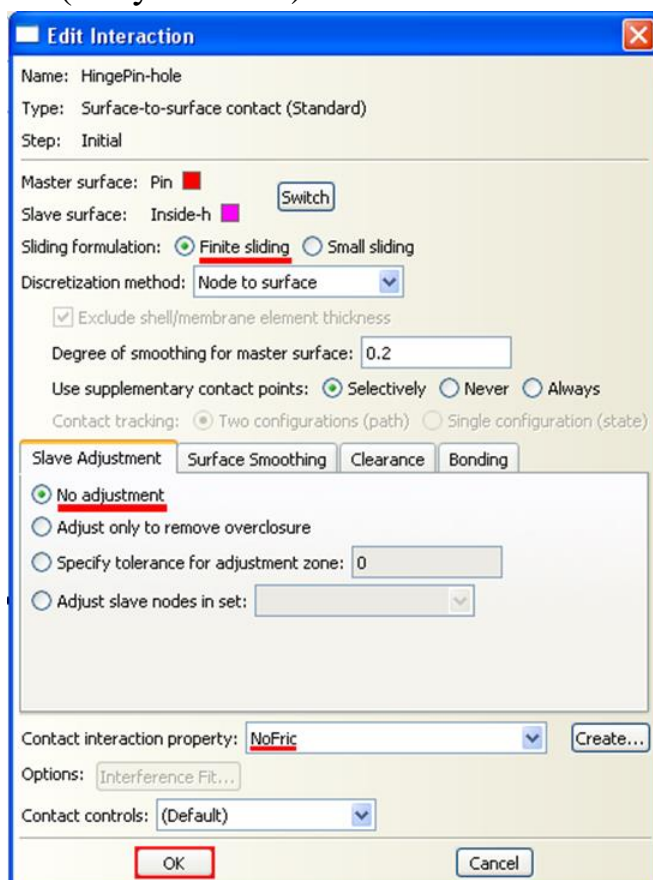


Рисунок 6.74 - Окно Edit Interaction

Созданное вами взаимодействие появится в Interaction Manager.

1. Используйте те же приёмы из предыдущих шагов, чтобы создать аналогичное взаимодействие с именем *HingePin-solid*. Используйте Pin в качестве основной поверхности, Inside-s в качестве зависимой поверхности. *NoFric* в качестве свойства взаимодействия.

2. Создайте аналогичное взаимодействие с именем Flange. Используйте *Flange-h* в качестве основной поверхности, *Flange-s* в качестве зависимой поверхности и *NoFric* в качестве свойства взаимодействия.

Теперь воспользуемся автоматическим способом задания контактных взаимодействий (если вы захотели испробовать и автоматический способ, то удалите или подавите взаимодействия, созданные ручным способом).

Для этого в главном меню выберите Interaction => Find contact pairs. В диалоговом окне Find Contact Pairs щелкните по Find Contact Pairs (Рисунок 6.75). Определятся пять потенциальных контактных пар.

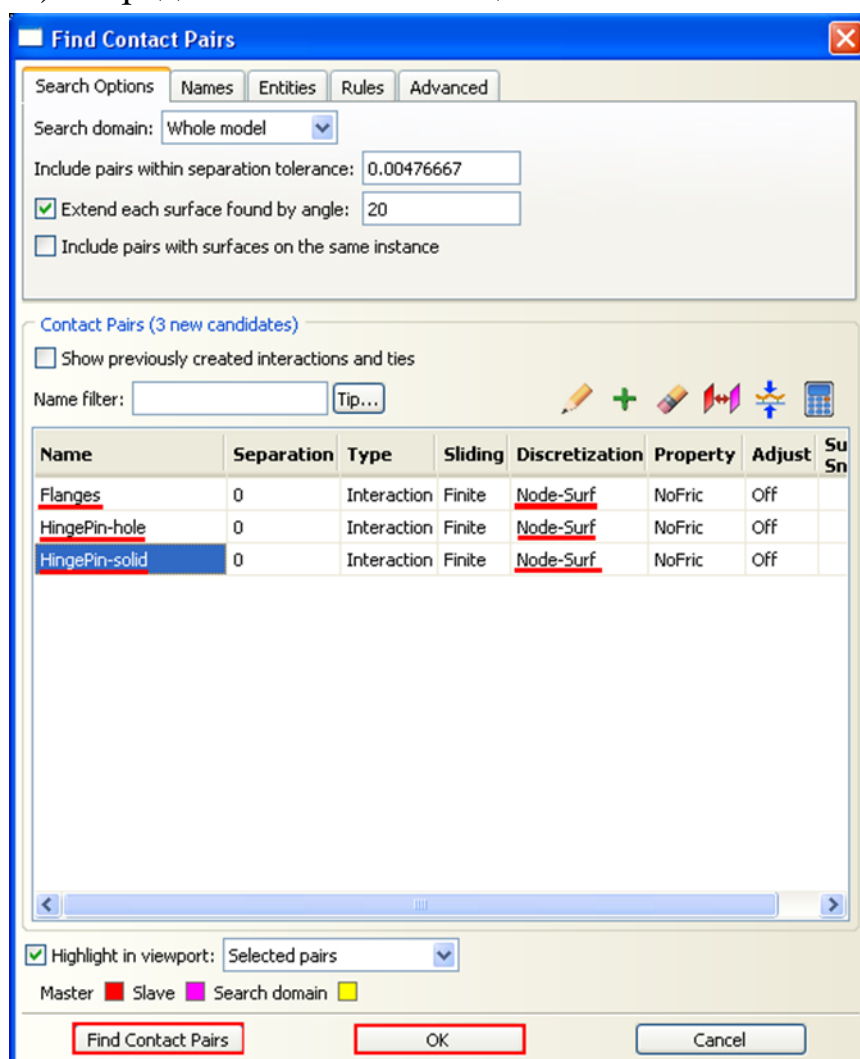


Рисунок 6.75 - Окно Find Contact Pairs

В области Contact Pairs диалогового окна:

Щелкните по имени каждой контактной пары, чтобы подсветить ее в графическом окне. Это позволит ознакомиться с контактными взаимодействиями, которые выбраны.

Обратите внимание, что контактные пары определены между скруглёнными краями каждого фланца и плоскими противоположными гранями (они идентифицируются в диалоговом окне как имеющие ненулевое разделение). Эти контактные пары не обязательны. Поэтому удалите их. Чтобы удалить контактную пару, выделите ее и щелкните 3-й кнопкой мыши, из появившегося меню выберите Delete.

Выберите контактную пару между петлёй с отверстием и штифтом. Переименуйте взаимодействие в *HingePin-hole*.

Выберите контактную пару между сплошной петлёй и штифтом. Переименуйте взаимодействие в *HingePin-solid*. Переименуйте взаимодействия между фланцами в *Flanges*.

Примите все остальные установки по умолчанию, за исключением контактной дискретизации. Выберите столбец с меткой Discretization и щелкните 3-й кнопкой мыши. В появившемся меню выберите Edit cells. В появившемся диалоговом окне выберите Node-to-surface и щелкните ОК.

Щелкните ОК, чтобы сохранить взаимодействия и закрыть диалоговое окно.

6.8 Приложение граничных условий и нагрузок к сборке.

После задания контактных взаимодействий перейдём к граничным условиям и нагрузкам, действующим на нашу систему. В рамках этой работы зададим следующие граничные условия:

1) Граничное условие с именем *Fixed*, которое ограничивает все степени свободы на конце части петли с отверстием для смазки, как показано на рисунке 6.76.

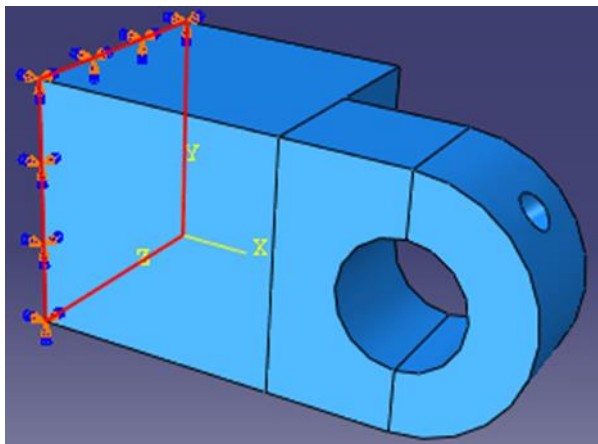


Рисунок. 6.76 – Граничные условия, ограничивающие все степени свободы на петле с отверстием для смазки

2) Граничное условие с именем *NoSlip*, которое ограничивает все степени свободы, в процессе первого шага анализа. На втором шаге анализа (шаге, в котором прикладывается нагрузка) мы изменим это граничное условие таким образом, чтобы штифту было позволено перемещаться в направлении X (U1) и вращаться вокруг оси Y (UR2). Рисунок 6.77 иллюстрирует это граничное условие, примененное в опорной точке.

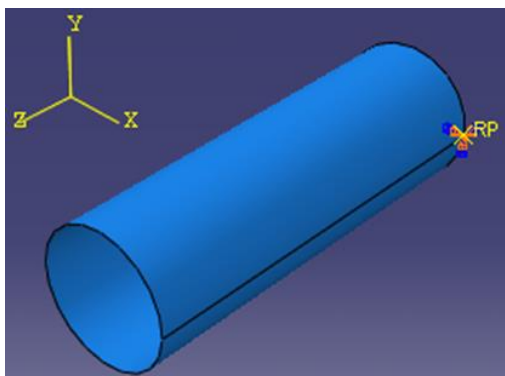


Рисунок. 6.77 – Граничные условия для штифта на первом этапе анализа

3) Граничное условие с именем **Constraint**, которое ограничивает все перемещения в точке сплошной петли в процессе первого шага анализа (Рисунок. 6.78). В дальнейшем, мы изменить это граничное условие и на шаге Load снимем ограничение на перемещение в направлении оси X (U1).

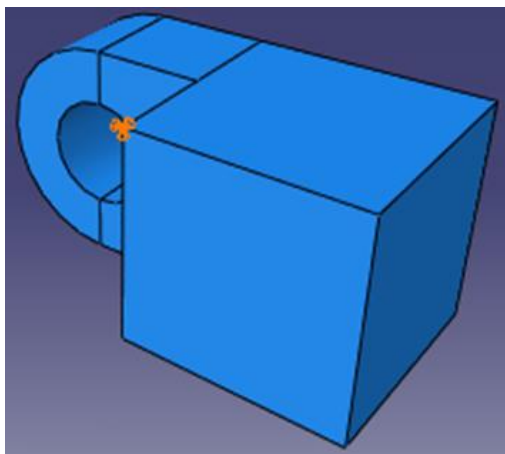


Рисунок. 6.78 - Граничное условие, ограничивающие все перемещения в точке сплошной петли в процессе первого шага анализа

В качестве нагрузки выступает давление, которое прикладывается к концу сплошной части петли. Рисунок 6.79 иллюстрирует нагрузку, приложенную к сплошной петле.

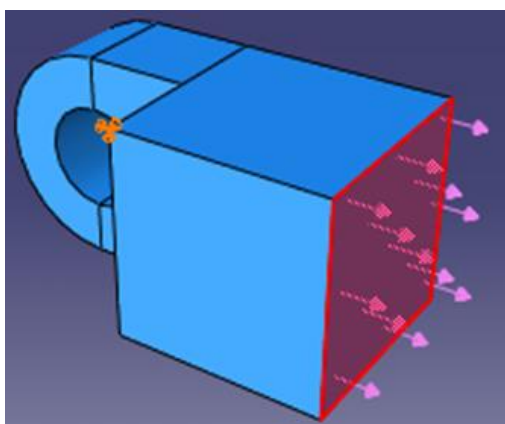


Рисунок. 6.79 – Нагрузка на сплошную часть петли

Приступим к созданию граничного условия для части петли с отверстием для смазки. Для этого в *Дереве Модели* щелкните 3-й кнопкой мыши по контейнеру BCs и в появившемся меню выберите Manager. Появится диалоговое окно Boundary Condition Manager. Нажмите Create. Появится диалоговое окно Create Boundary Condition (Рисунок. 6.80). В нём:

1. Дадим граничному условию имя **Fixed**.
2. В качестве начального шага примем **Initial** из соответствующего списка.
3. В качестве типа граничного условия выберите Displacement/Rotation и щелкните Continue.

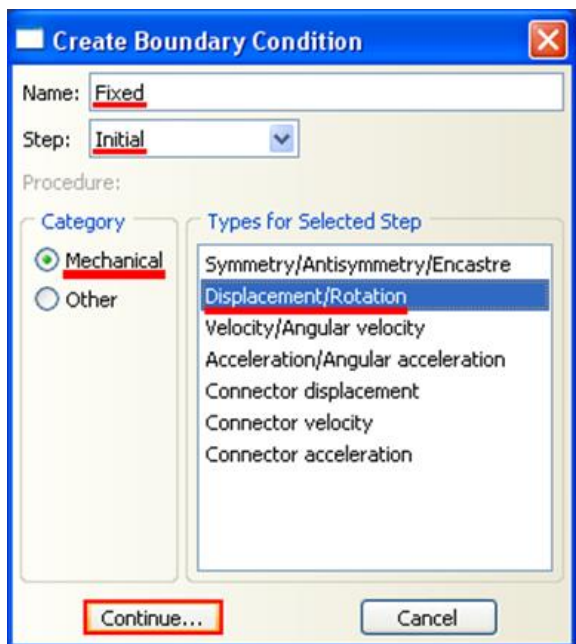


Рисунок. 6.80 - Окно Create Boundary Condition

Теперь нужно выбрать плоскость, к которой будут применены эти граничные условия. Выберите её так, как показано на рисунке 6.76 и нажмите **Done**. Появится диалоговое окно Edit Boundary Condition. В этом диалоговом окне включите U1, U2 и U3, чтобы ограничить перемещения конца петли в направлениях 1, 2 и 3 (Рисунок. 6.81). Вам нет необходимости ограничивать оставшиеся степени свободы петли, так как при построении сетки для петли будут использоваться твёрдые элементы (которые имеют только трансляционные степени свободы). Щелкните ОК, чтобы закрыть диалоговое окно.

Граничное условие, которое вы создали, появится в Boundary Condition Manager, а на узлах появятся стрелки, указывающее на ограничение степеней свободы. Boundary Condition Manager покажет, что граничное условие останется активным на всех шагах анализа.

Совет: Вы можете подавить стрелки граничного условия точно также, как вы подавляете видимость экземпляров детали. Щелкните по закладке BC в диалоговом окне Assembly Display Options, чтобы увидеть опции граничных условий.

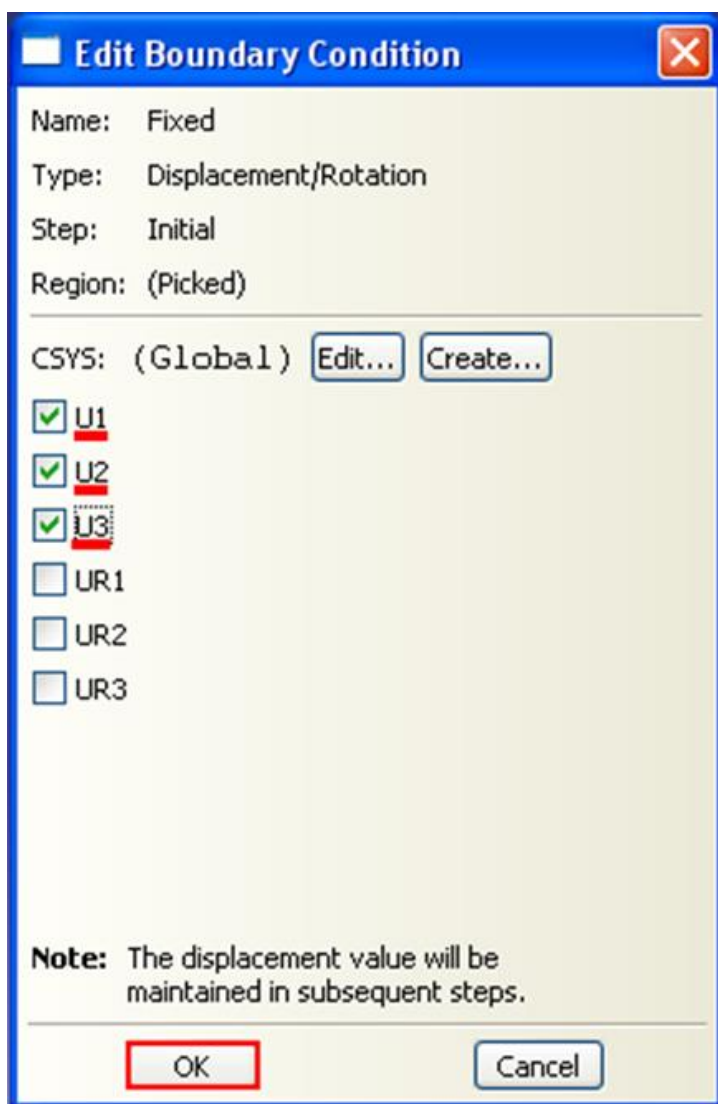


Рисунок. 6.81 – Выбор граничных условий конца петли

Теперь перейдём к заданию граничного условия к штифту. В Boundary Condition Manager щелкните Create. Появится диалоговое окно Create Boundary Condition. В нём:

1. Дайте граничному условию имя *NoSlip*.
2. Примите в качестве шага Initial в текстовом поле Step.
3. В качестве Category примите выбор по умолчанию Mechanical.
4. В качестве типа граничного условия выберите Displacement/Rotation и щелкните Continue.

В графическом окне выберите опорную точку жёсткого тела на штифте в качестве области, к которой будет приложено граничное условие (Рисунок. 6.77). Щелкните средней кнопкой мыши, чтобы указать, что вы закончили выделение областей.

Появится диалоговое окно Edit Boundary Condition. В нём включите все кнопки, чтобы ограничить все степени свободы штифта и щелкните ОК (Рисунок. 6.82). Новое граничное условие появится в Boundary Condition Manager.

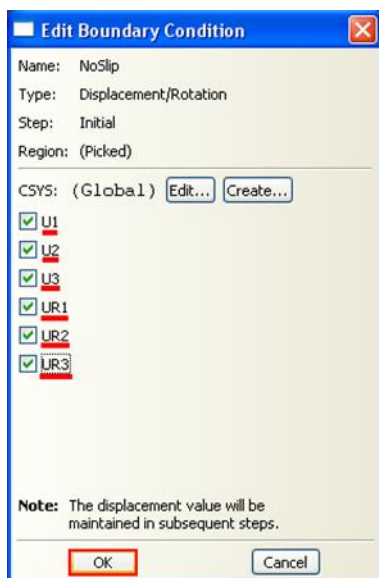


Рисунок. 6.82 – Выбор граничных условий штифта

Используя, Boundary Condition Manager (менеджер граничных условий) модифицируем условие NoSlip, так чтобы перемещение в направлении X и вращение вокруг оси Y были освобождены в течение шага Load.

В данный момент **Boundary Condition Manager** отображает имена двух граничных условий, которые вы создали, а также их статус на каждом шаге: оба граничных условия имеют статус **Created** на начальном шаге и статус **Propagated** на последующих шагах. Чтобы модифицировать граничное условие в **Boundary Condition Manager** щелкните по ячейке, помеченной как Propagated, что находится в строке с именем *NoSlip* и в колонке с именем *Load* (Рисунок. 6.83). Ячейка станет подсвеченной.

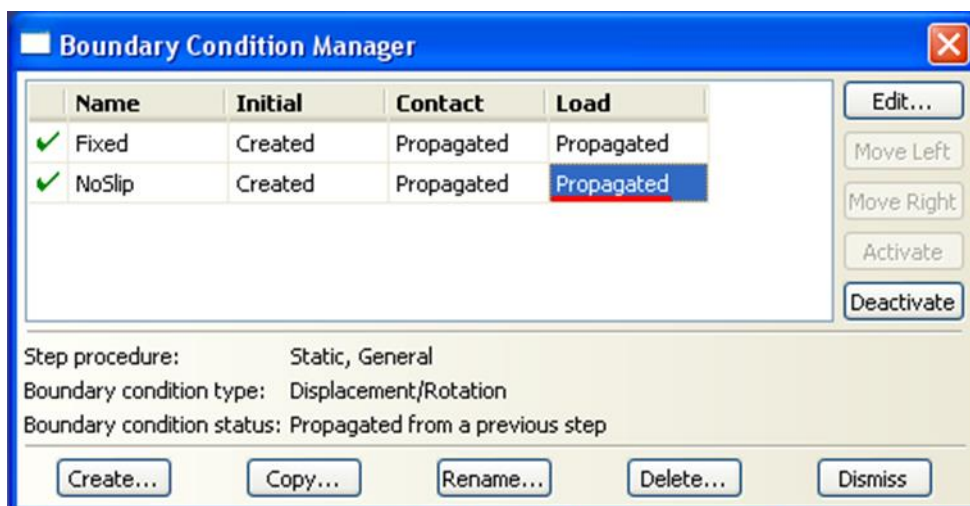


Рисунок. 6.83 – Окно Boundary Condition Manager

В правой стороне менеджера щелкните по Edit, чтобы указать, что вы хотите отредактировать граничное условие *NoSlip* на шаге *Load*. Появится диалоговое окно Edit Boundary Condition. В редакторе выключите кнопки с метками U1 и UR2, так что штифту будет позволено перемещаться в

направлении X и вращаться вокруг оси Y (Рисунок. 6.84). Щелкните ОК, чтобы закрыть диалоговое окно.

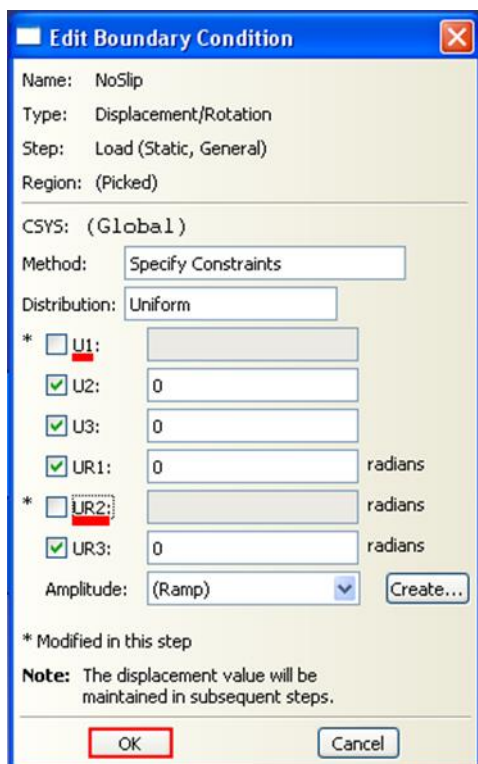


Рисунок. 6.84 – Изменение граничного условия NoSlip

В Boundary Condition Manager статус граничного условия *NoSlip* на шаге **Load** изменится на **Modified**.

Зададим ограничение сплошной части петли. На шаге Contact ограничим движение во всех направлениях единственного узла сплошной части петли. Эти ограничения вместе с контактом штифта достаточны, чтобы предотвратить движение модели как жёсткого тела. На следующем шаге анализа, в котором к модели прикладывается нагрузка, снимем ограничение на перемещение в направлении X.

Чтобы задать ограничение на сплошную часть петли на шаге **Initial** создайте граничное условие на перемещение и назовите **Constrain**. Примените это граничное условие к вершине, выбранной на сплошной части петли, как показано на рисунке 6.78. Ограничьте перемещения вершины в направлениях X, Y и Z (Рисунок. 6.85).

Теперь на шаге **Load** модифицируйте граничное условие таким образом, чтобы петля была бы не ограничена в направлении X. Щелкните **Dismiss**, чтобы закрыть Boundary Condition Manager (Рисунок. 6.86).

Далее приложим давление к грани на конце сплошной части петли в направлении X. Для этого в *Дереве Модели* дважды щелкните по контейнеру **Loads**, чтобы создать новую нагрузку. Появится диалоговое окно **Create Load**. В нём:

1. Дайте нагрузке имя **Pressure**.
2. Примите **Load** в качестве шага в текстовом поле **Step**.

3. В списке Category примите выбор по умолчанию Mechanical.
4. Из списка типов Types for Selected Step выберите Pressure и щелкните Continue (Рисунок. 6.87).

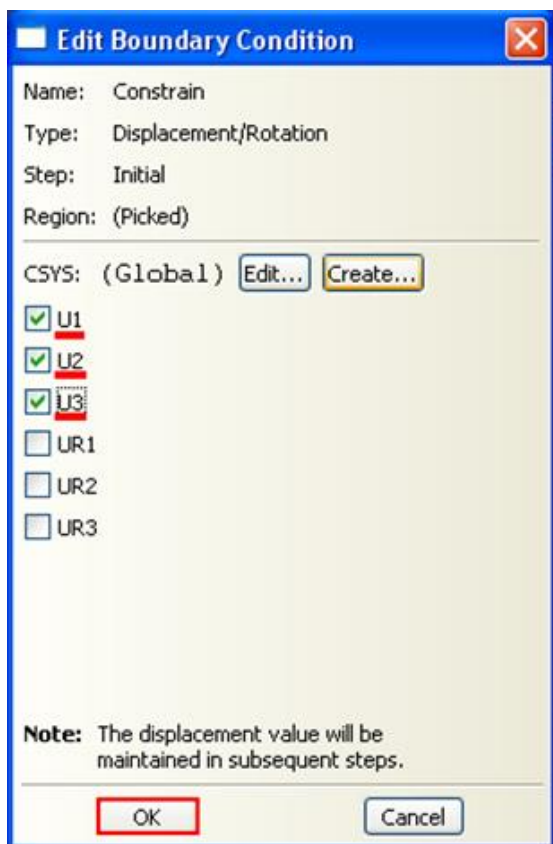


Рисунок. 6.85 - Изменение граничного условия Constrain

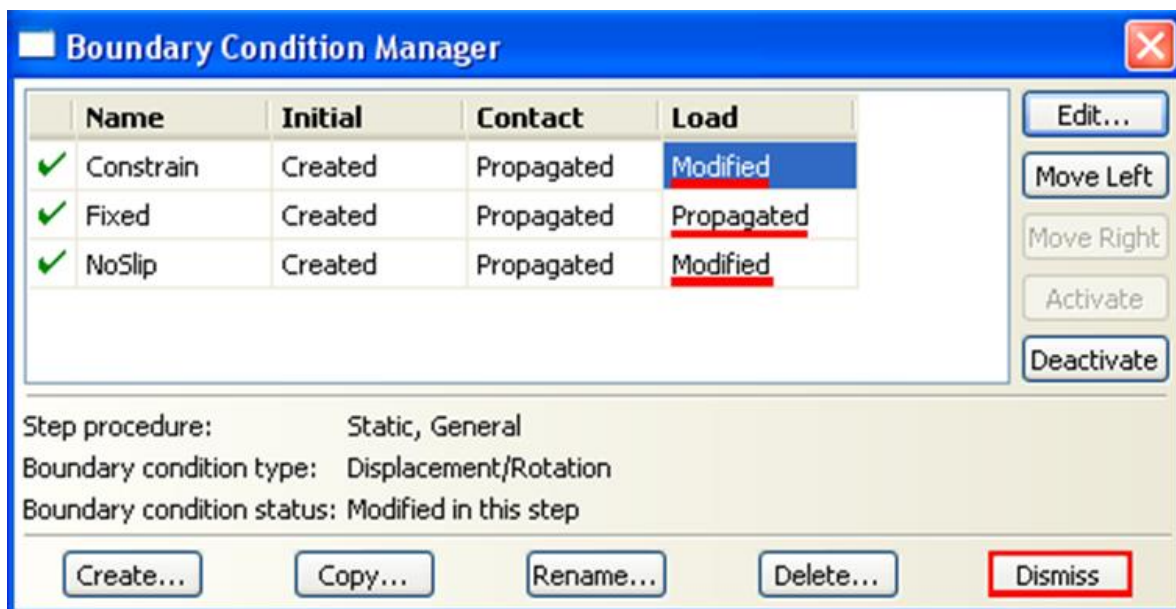


Рисунок. 6.86 – Заккрытие окна Boundary Condition Manager

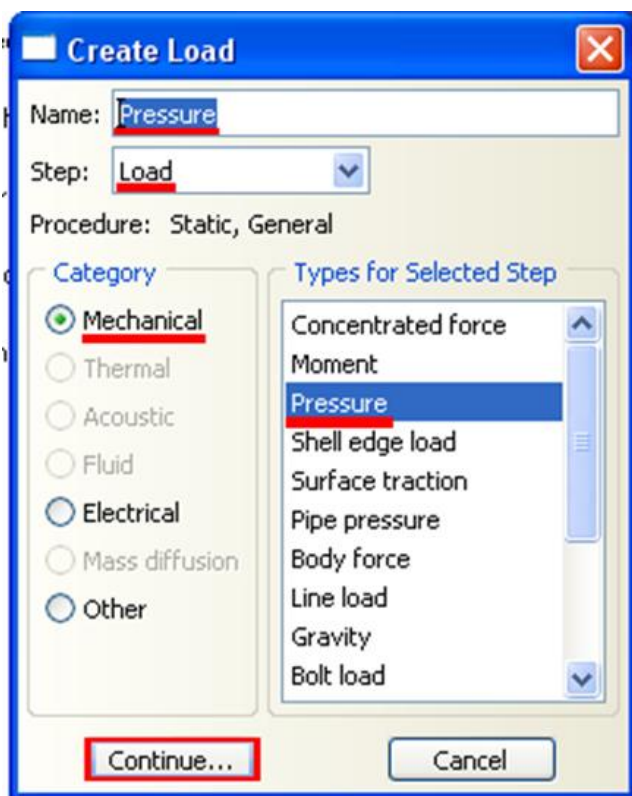


Рисунок. 6.87 – Создание нагрузки

В графическом окне выберите грань на конце сплошной части петли в качестве поверхности, к которой прикладывается нагрузка, как показано на рисунке 6.88.

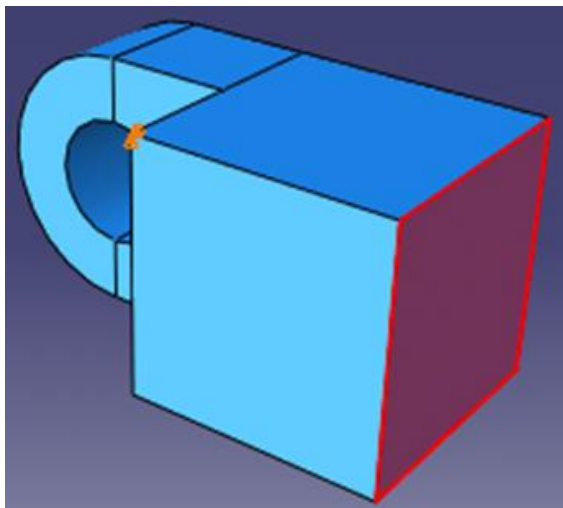


Рисунок. 6.88 – Выбор поверхности нагружения

Щелкните средней кнопкой мыши, чтобы указать, что вы закончили выбор областей. Появится диалоговое окно Edit Load. В нём введите величину $-1E6$ для нагрузки и щелкните ОК (Рисунок. 6.89). На грани появятся стрелки, показывающие приложенную нагрузку.

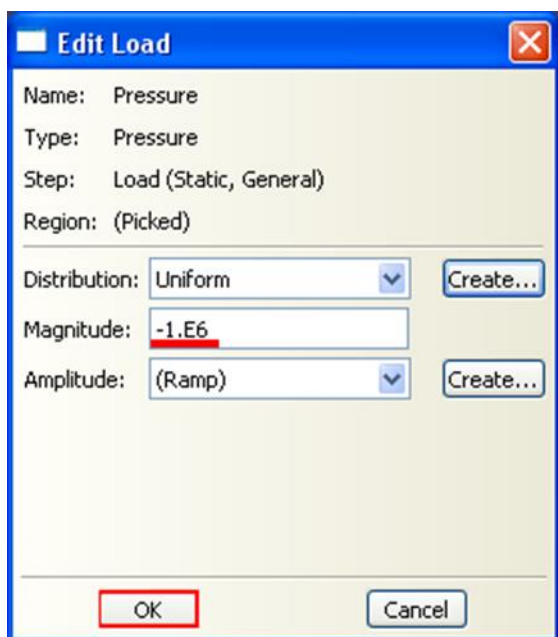


Рисунок. 6.89 – Задание давления нагружения

6.9 Построение сетки для сборки.

Когда вы входите в модуль Mesh, Abaqus/CAE показывает цветом области модели в соответствии с методами, которые он использует для построения сетки:

Зелёный цвет: показывает область, для которой может быть построена сетка с использованием структурированных методов.

Жёлтый цвет: указывает область, для которой может быть построена сетка с использованием методов развёртки.

Оранжевый цвет: указывает область, для которой не может быть построена сетка с используемой по умолчанию формой (гексагональной) элементов, и она должна быть разбита на части. (В качестве альтернативы вы можете строить сетку для любой модели присваиванием ей тетрагональных элементов с использованием методов свободного построения сетки).

Начнём с разбиения элемента Hinge-hole. В *Дереве Модели* раскройте элемент Hinge-hole в контейнере Parts и дважды щелкните в появившемся списке по элементу Mesh. Abaqus/CAE покажет на экране часть петли с отверстием для смазки (Рисунок. 6.90). Часть петли окрашена зелёным цветом, для неё можно построить сетку с использованием структурированных методов. Фланец с отверстием для смазки окрашен оранжевым цветом, чтобы показывает невозможность построения сетки в этой области с использованием гексагональной формы элементов без внесения каких-либо изменений модели. Для того чтобы Abaqus/CAE построил сетку на фланце с отверстием для смазки, он должен быть разбит на подобласти, показанные на рисунке 6.91.

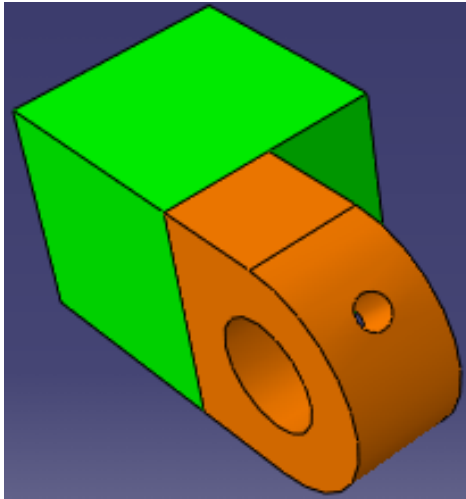


Рисунок. 6.90 – Элемент петли с разными областями построения сетки

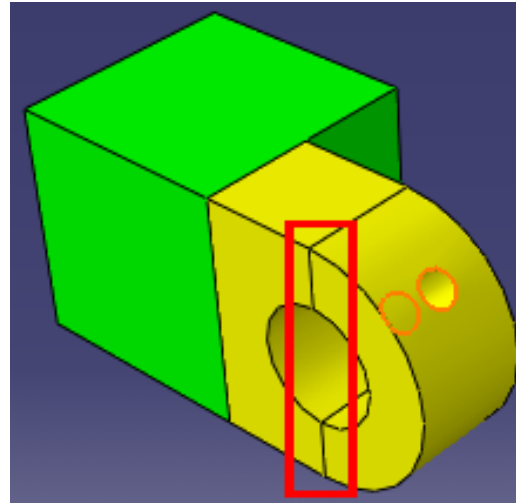



Рисунок. 6.91 – Элемент петли, разбитый на подобласти

Для этого нужно в панели инструментов щёлкнуть по **Partition Cell** . Выберите фланец и нажмите **Done**. Теперь вам предлагают выбрать способ задания нашей вспомогательной плоскости. Выбираем **3 Points** (Рисунок 6.92).

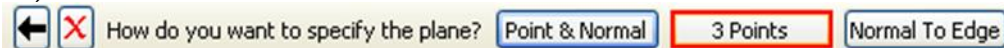


Рисунок. 6.92 – Задание вспомогательной плоскости с помощью трёх точек

Выбираем 3 точки, через которые будет проходить наша плоскость, и нажимаем **Create Partition** (Рисунок 6.93). **Abaqus/CAE** создаст нужное разбиение. Области фланца окрасятся жёлтым цветом, указывая на возможность создания гексагональной сетки

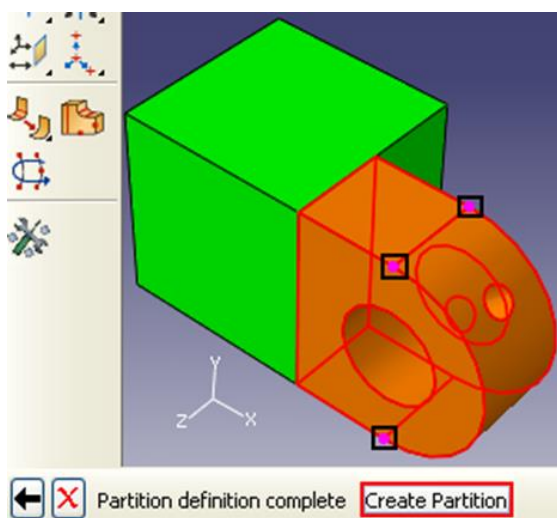


Рисунок 6.93 – Выбор точек вспомогательной плоскости

Далее выберем форму конечного элемента и метод построения сетки. Для этого в главном меню выберите Mesh => Controls. Выделите все области нашей петли и щелкните Done. Откроется диалоговое окно Mesh Controls (Рисунок. 6.94). В нём примите выбор по умолчанию Hex для формы элемента **Element Shape**. В качестве метода построения сетки выберите Sweep, а алгоритма построения - Medial axis. Щелкните ОК, чтобы присвоить управляющие параметры и закрыть диалоговое окно. Вся часть петли станет жёлтой, указывая на то, что для неё будет построена сетка по методу Sweep. Щелкните Done в области инструкций.

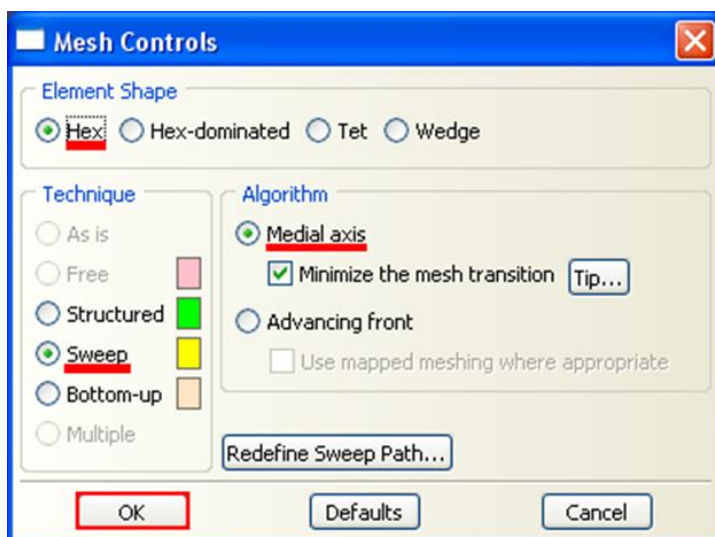


Рисунок 6.94 – Окно Mesh Controls

Произведём разметку детали. Можно выбрать способ разметки, основанный на количестве элементов, которые будут сгенерированы вдоль ребра, или на среднем размере элементов, или увеличить плотность распределения по направлению к одному из рёбер.

Сделайте текущей в графическом окне часть петли с отверстием. В главном меню выберите Seed => Part. В появившемся диалоговом окне Global Seed (Рисунок 6.95) введите приближенный глобальный размер элементов 0.008 и щелкните ОК.

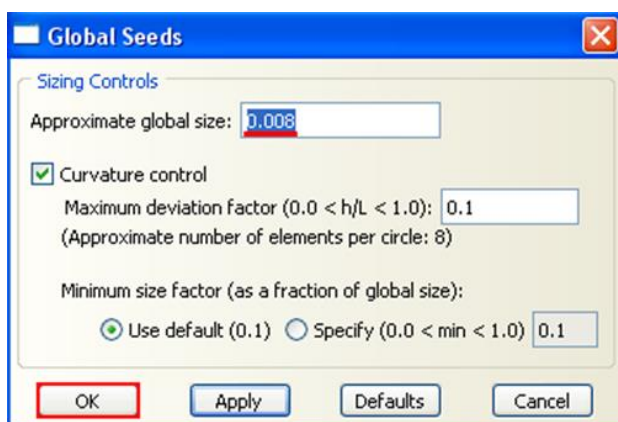


Рисунок 6.95 – Ввод приближенного глобального размера элементов

Теперь сгенерируем сетку на петле с отверстием для смазки. В главном меню выберите Mesh => Part. Щелкните Yes в области инструкций, чтобы создать сетку (Рисунок. 6.96).



Рисунок 6.96 – Создание сетки

Abaqus/CAE построит сетку для детали (Рисунок 6.97).

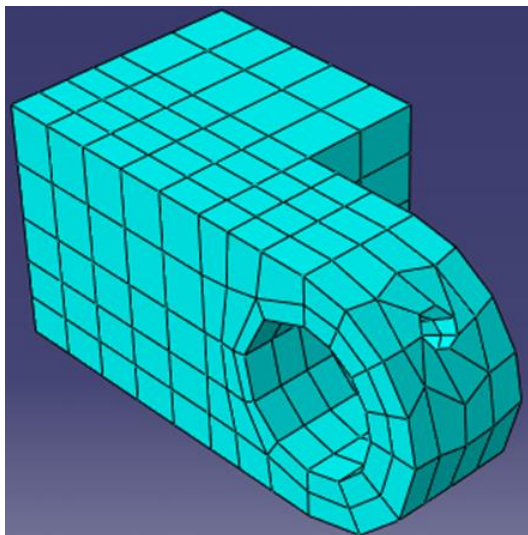


Рисунок 6.97 - Конечно-элементная сетка части петли с отверстием

Чтобы построить конечно-элементную модель сплошной части петли, необходимо повторить все вышеописанные шаги.

Штифт представляет собой твердотельную аналитическую поверхность, поэтому здесь конечно-элементную сетку строить не нужно. **Abaqus/CAE** изобразит его оранжевым цветом.

После завершения всех операций, отобразите сборку модели в графическом окне, чтобы увидеть окончательную конечно-элементную сетку, как показано на рисунке 6.98.

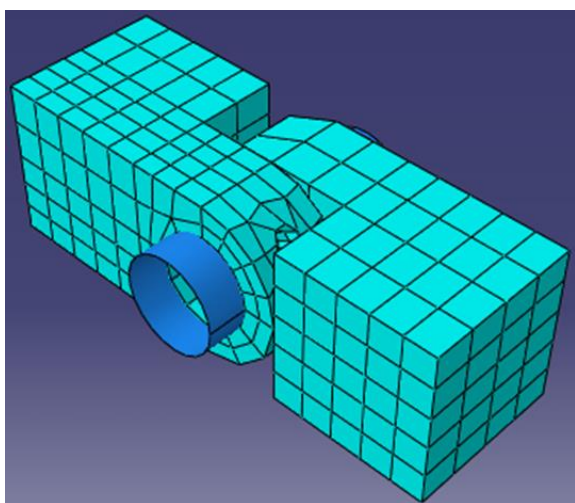


Рисунок. 6.98 – Конечно-элементная сетка петли

6.10 Создание и инициализация задания.

Теперь, когда вы задали тип анализа, вы создадите задание, ассоциированное с моделью. Чтобы создать задание для анализа в *Дереве Модели* дважды щелкните по контейнеру Jobs. Появится диалоговое окно Create Job. Дайте ему имя *PullHinge*, и щелкните Continue (Рисунок. 6.99).

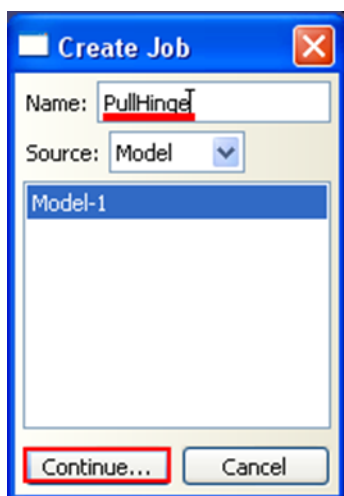


Рисунок 6.99 - Окно Create Job

Появится редактор задания. В поле Description наберите описание **Hinge tutorial**.

Пощёлкайте по закладкам, чтобы увидеть содержимое редактора задания. Щелкните ОК, чтобы принять все установки по умолчанию (Рисунок. 6.100).

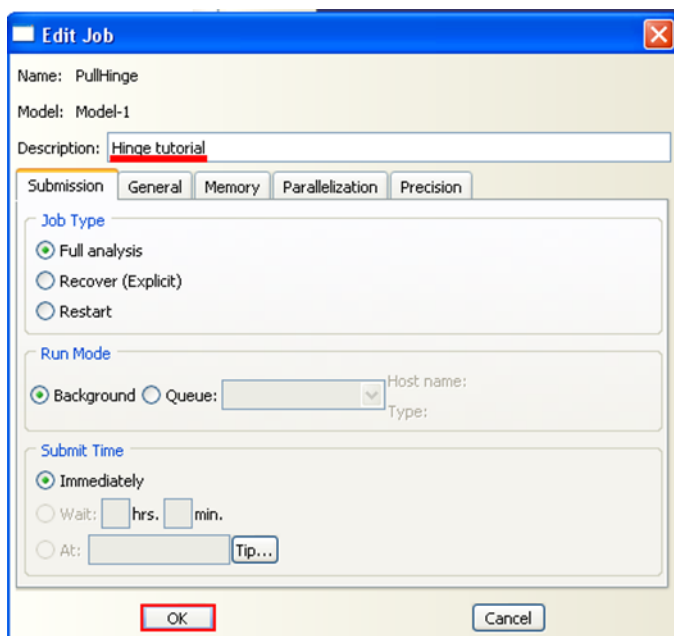



Рисунок 6.100 – Окно Edit Job

При помощи клавиши **Job Manager**  откройте окно **Job Manager**. И в появившемся меню выберите Submit (Рисунок 6.101), чтобы запустить задание на анализ.

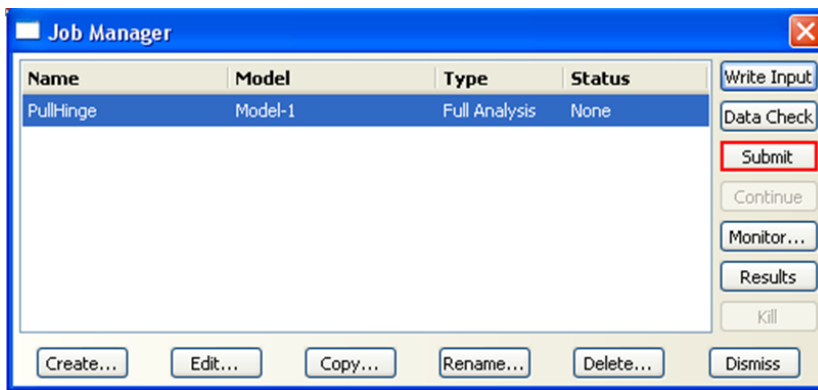


Рисунок 6.101 – Запуск задания на анализ

Чтобы организовать мониторинг задания нужно щёлкнуть по вкладке **Monitor** в **Job Manager**. Появится диалоговое окно с именем вашего задания в области заголовка и график состояния анализа. Сообщения появляются в нижней панели диалогового окна по мере выполнения задания. Щелкните по закладкам **Errors** и **Warnings**, чтобы проверить возможные проблемы в анализе.

Когда задание успешно завершится, вы сможете просмотреть результаты анализа с помощью модуля **Visualization**. В **Job Manager** щелкните по вкладке **Results** и **Abaqus/CAE** вызовет модуль **Visualization**, откроет выходную базу данных, созданную заданием и выведет на экран недеформированную форму модели.

6.11. Визуализация результатов задания.

Работа в модуле **Visualization** достаточно подробно разобрана в предыдущих главах. Поэтому здесь будут приведены результаты расчёта и показан вид деформированной части конструкции без подробного описания всех операций:

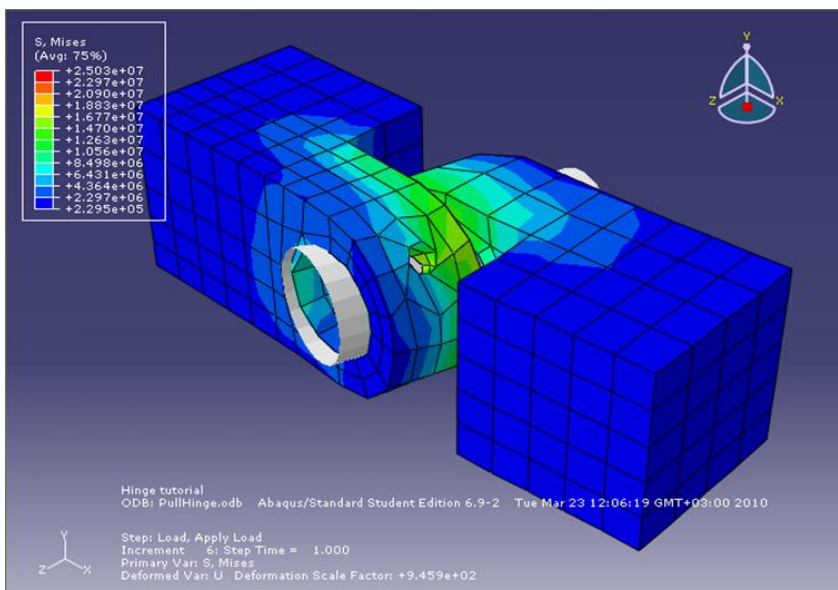


Рисунок 6.102 - Распределение напряжений по Мизесу

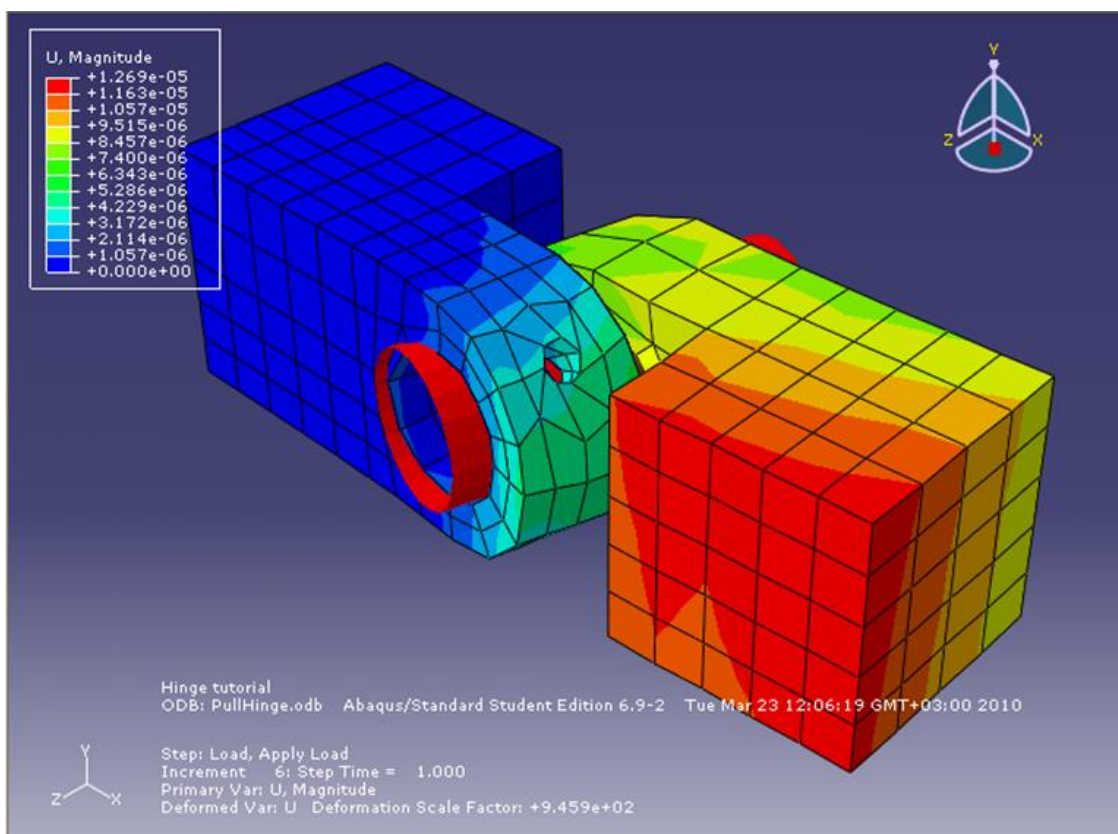


Рисунок 6.103 - Поле перемещений

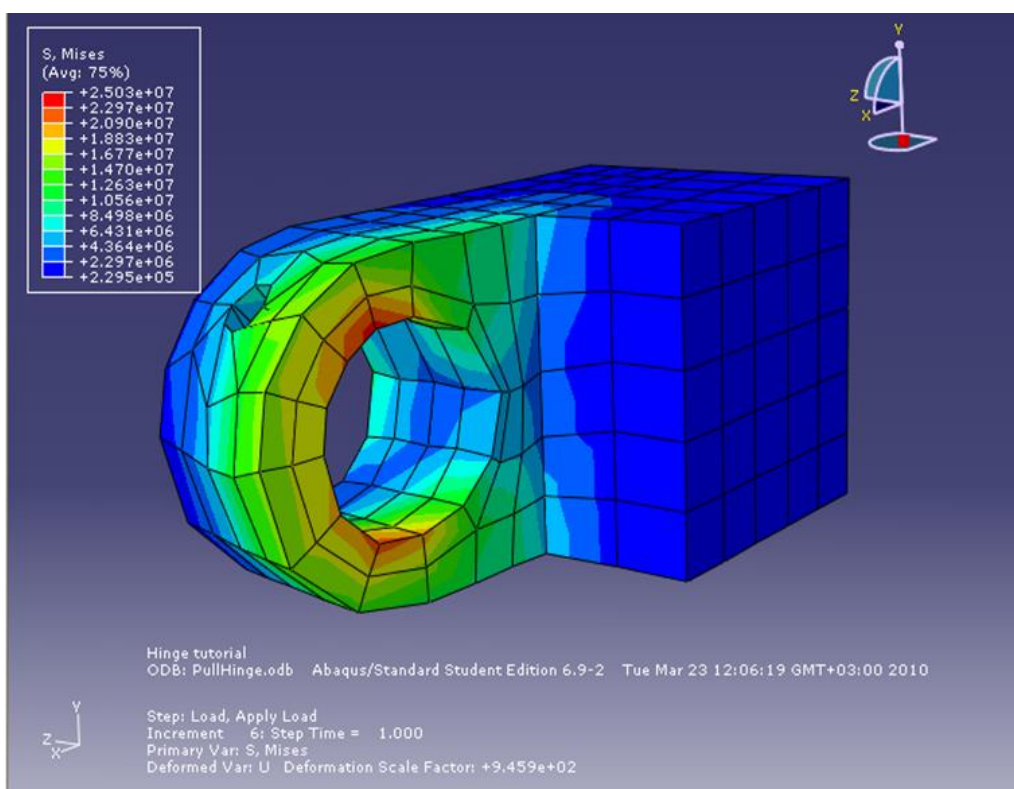


Рисунок 6.104 - Распределение напряжений по Мизесу в части петли с отверстием для смазки.

6.12 Модернизация модели

Разобранная модель не является окончательной. **Abaqus.CAE** предоставляет большие возможности по варьированию таких параметров системы, как:

- Нагрузка
- Параметры материала
- Граничные условия
- Геометрия и размер сетки
- Свойства контакта и т.д.

Варьируя этими параметрами, можно проследить чувствительность модели к их изменению.

ГЛАВА 7. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО И НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР

В данной главе произведём описание основных возможностей **Abaqus** по моделированию задач теплопроводности, на примере построения модели для двумерной конвективной теплопередачи. Геометрия модели представлена на рисунке 7.1.

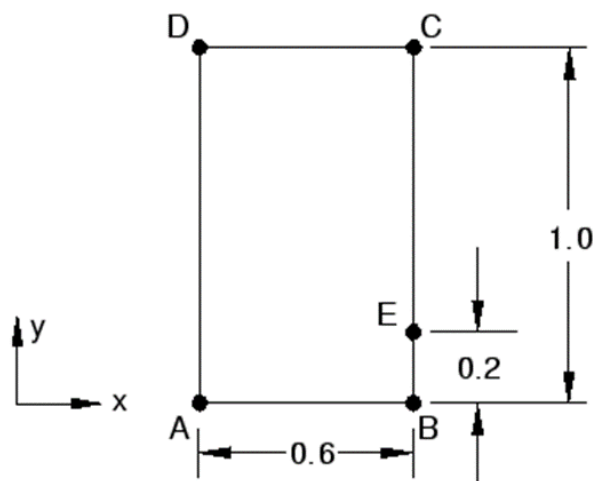


Рисунок 7.1 - Геометрия пластины

Граничные условия:

1. На нижней грани пластины (AB) задано значение температуры $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. На правой (BC) и верхней (CD) грани пластины задан конвективный теплообмен ($T_0=0\text{ }^{\circ}\text{C}$) с коэффициентом теплоотдачи $750\text{ W/m}^2\text{/}^{\circ}\text{C}$
3. Грань AD теплоизолирована

Свойства материала:


Теплопроводность	Удельная теплоёмкость	Плотность
52 W/m/°C	434 J/kg/°C	7832 kg/m ³

Для дальнейшей проверки достоверности результатов расчёта, проведём сравнение численного и аналитического решений в точке E (аналитическое решение $T=18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$).

7.1 Стационарный режим теплопроводности

7.1.1 Построение геометрической модели.

Создадим рабочую плоскость.

1. Откроем в дереве модели модуль **PART**. Для создания детали нажмите кнопку **Create Part** , или дважды щёлкните на значке **Parts** в дереве модели.

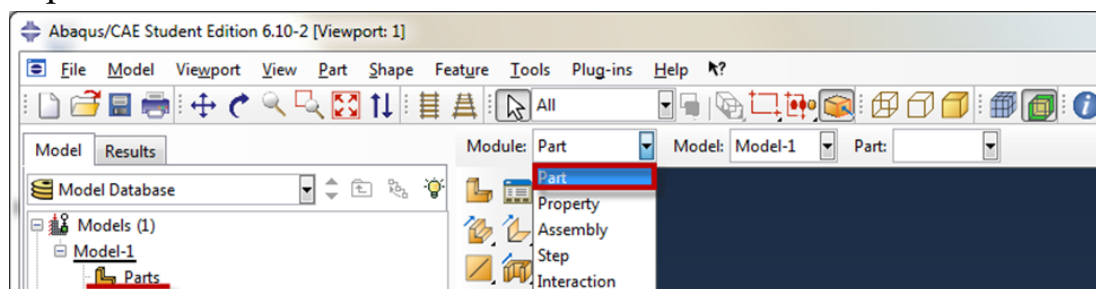


Рисунок 7.2 - Создание геометрической модели

2. В появившемся окне **Create Part** (Рисунок 6.107) дайте детали имя *Plate* и примите следующие установки: **2D** (двухмерного), **Deformable** (деформируемого) тела и **Shell** (оболочка) в качестве базового свойства. В текстовом поле **Approximate size** наберите 11. Щёлкните **Continue**, чтобы закрыть диалоговое окно.

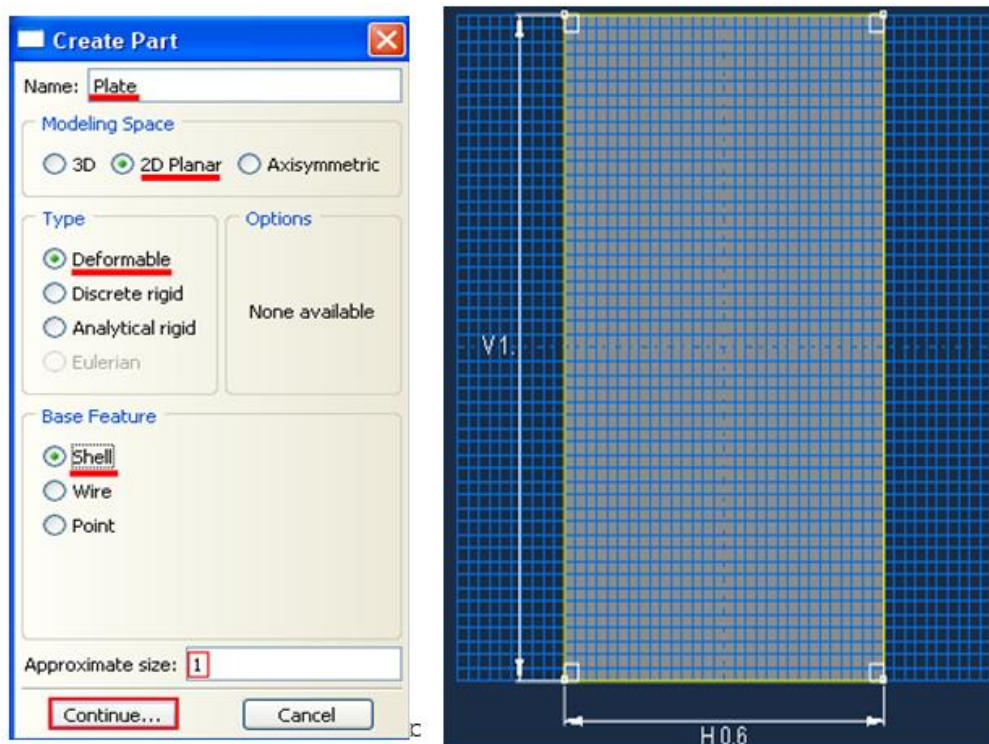




Рисунок 7.3 - Создание геометрической модели

3. В появившемся рабочем поле, воспользовавшись кнопкой , создаём прямоугольник с координатами (0, 0) и (0.6, 1). После задания координат каждой точки, подтверждаем свой выбор клавишей **Enter** (или средней кнопкой мыши). В случае ошибки можно произвести отмену действия при помощи кнопки **Cancel**  (Рисунок 7.3). Выходим из режима *Эскиз*, нажав кнопку **Done**.

7.1.2 Присвоение свойств материала и сечения к геометрии пластины.

Для расчёта стационарного поля температур достаточно задания только коэффициента теплопроводности ($k=52 \text{ W/m}^\circ\text{C}$). При нестационарном тепловом расчёте необходимо определение теплоёмкости ($c = 434 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$) и плотности (7832 kg/m^3) материала.

1. Создадим материал с именем *Metal*. В *Дереве Модели* дважды щелкнув по контейнеру *Materials*, чтобы создать новый материал. В появившемся окне **Edit Material**, зададим имя *Metal*, в меню редактора выберем **Mechanical=>Thermal=>Conductivity** и введём значение коэффициента теплопроводности $k=52 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Для задания значения удельной теплоёмкости металла выберем **Mechanical => Thermal => Specific Heat** и введём $c = 434 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$. Плотность металла задаётся в окне **General=>Density** = 7832 kg/m^3 . (Рисунок 7.4)

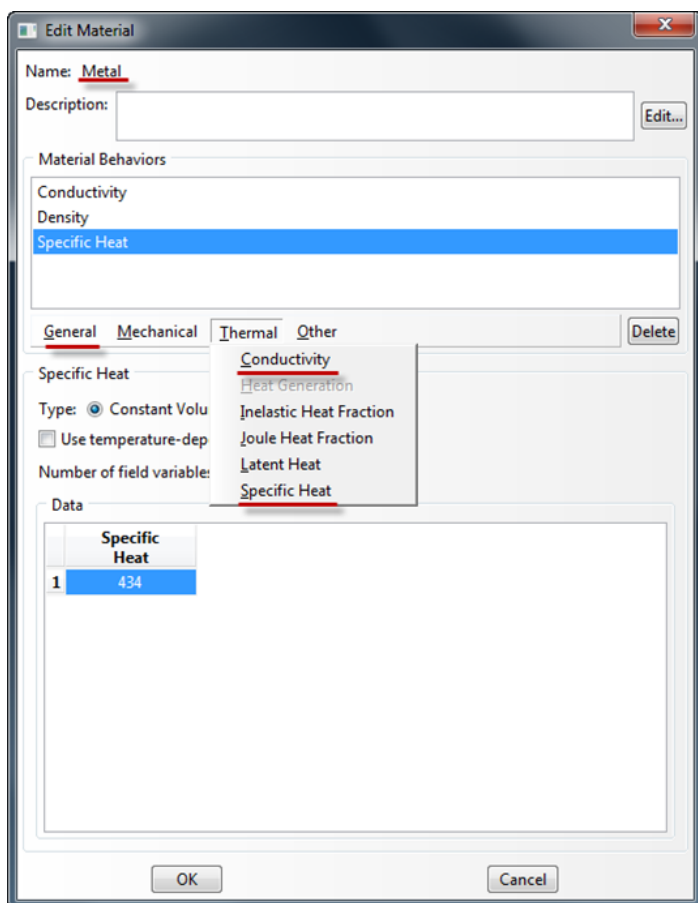




Рисунок 7.4 - Добавление свойств материала

2. Теперь перейдём к определению сечения. В *Дереве Модели*, дважды щёлкнув по контейнеру **Sections**, создадим новое сечение. В диалоговом окне **Create Section** присвоим сечению имя **Plate**. Выберите в соответствующих списках **Solid, Homogeneous** и щелкните **Continue**. В появившемся окне редактора сечений **Edit Section**, в качестве материала необходима указать созданный материал **Metal**.

3. Следующим шагом присвоим построенное сечение ранее созданной пластине. Для этого используем кнопку  **Assign Section** в текущей панели инструментов (либо дважды щелкаем по элементу  **Section Assignments** в дереве модели, либо используем команды меню: **Assign => Section**). С помощью мыши выделите пластину, она будет подсвечена красным цветом. Нажмите **Done**. В появившемся окне (Рисунок 7.5), выберите созданное сечение и подтвердите выбор нажатием кнопки **OK**.

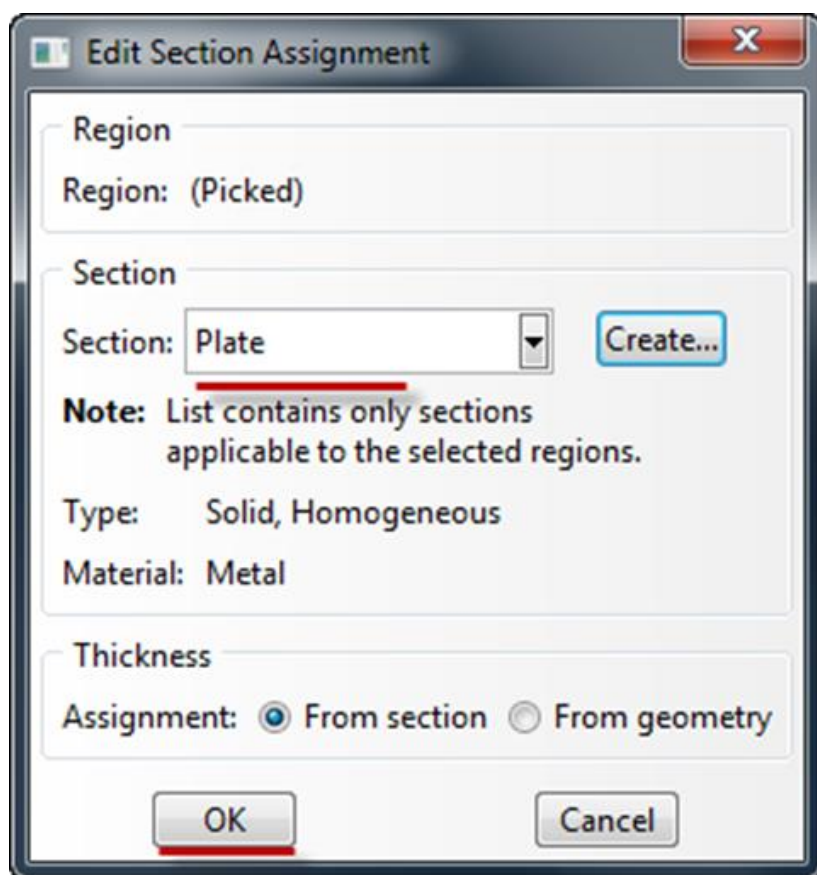




Рисунок 7.5 - Окно Edit Section Assigment

4. Перейдём к модулю **ASSEMBLY**. Поскольку в рассматриваемом случае деталь всего одна, достаточно нажать кнопку **Create Part Instance**  (либо в дереве модели дважды кликнуть по элементу  **Instances**), либо воспользоваться командами: меню **Instance => Create**). Появится окно со списком созданных деталей **Parts**. В нашем случае деталь всего одна, выберем ее – она будет выделена красным цветом. В разделе **Instance Type** укажите **Independent** и подтвердите выбор, нажав **OK**. (Рисунок 7.6)

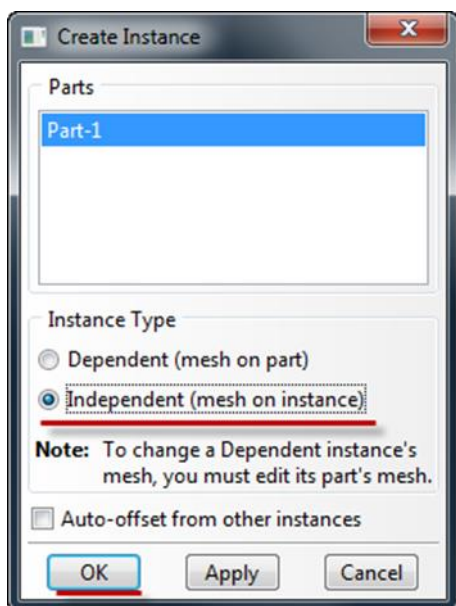


Рисунок 7.6 - Окно **Create Instance**

7.1.3 Задание шага анализа

В Дереве Модели дважды щелкните по контейнеру Step. В окне **Create Step** задайте имя нового шага анализа – Heat. Задаём тепловой расчёт **Heat transfer** и щелкните **Continue** (Рисунок 11.7). В появившемся окне **Edit Step**, оставьте все настройки решателя без изменений и нажмите **Ок**.

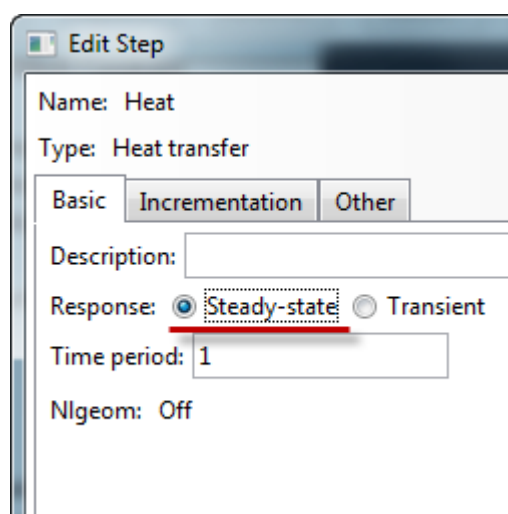
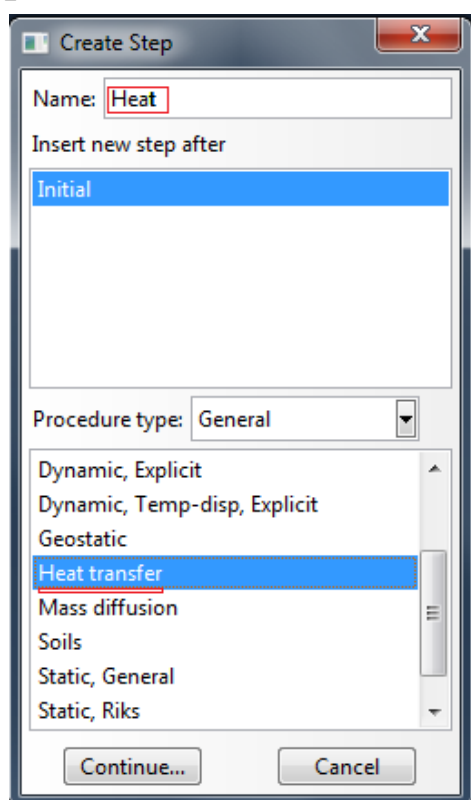


Рисунок 7.7 - Задание шага анализа Рисунок 7.8 - Окно Edit Step

В появившемся окне **Edit Step**, задаём расчёт установившегося режима теплопроводности (Рисунок 7.8).

7.1.4 Задание конвективного теплообмена и ГУ

Зададим конвективный теплообмен на правой и верхней гранях пластины. Для этого в окне **Create Interaction** (модуль Interaction) выберите **Surface film condition** и нажмите **Continue** (Рисунок 7.9). Выберите правую грань пластины. После этого, в появившемся окне **Edit Interaction**, задаём свойства конвективного теплообмена: коэффициент теплопередачи 750 и температуру окружающей среды 0 °С.

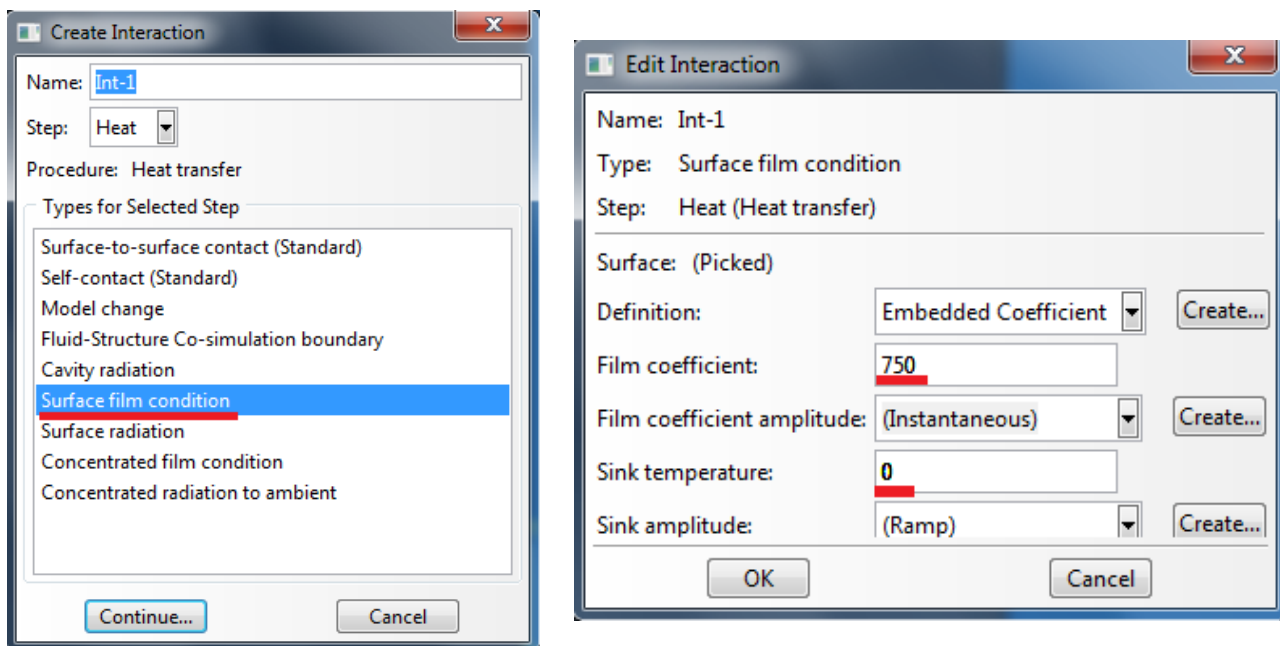


Рисунок 7.9 - Задание конвективного теплообмена

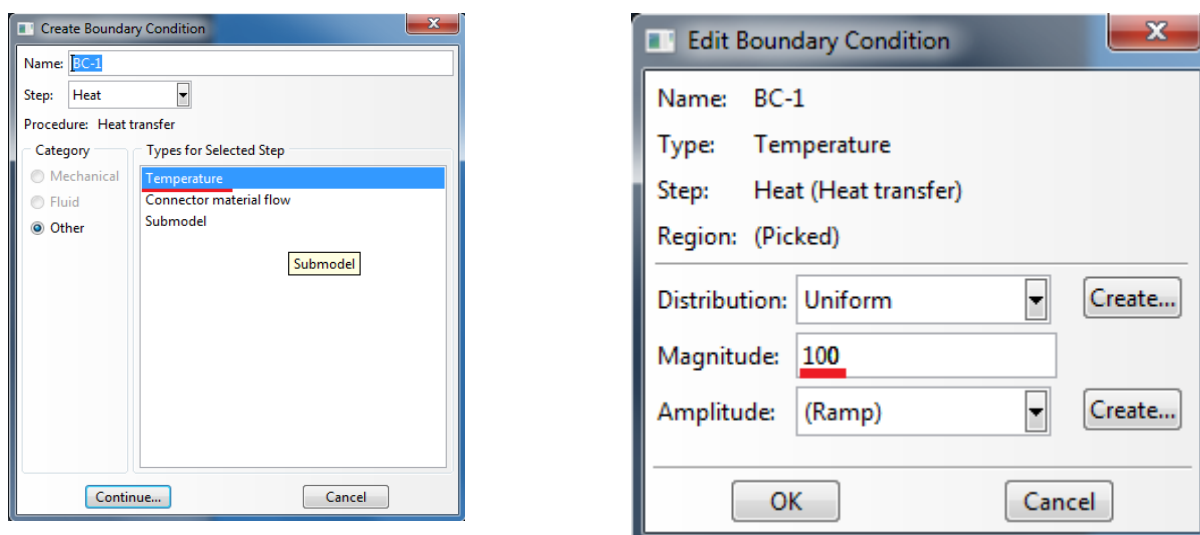


Рисунок 7.10 - Задание ГУ на нижней грани пластины

Пользуясь тем же алгоритмом, задайте условие конвективного теплообмена на верхней грани пластины.

Для задания ГУ на нижней грани пластины перейдём в модуль Load (Рисунок 7.10).

Задайте температурный тип ГУ, выберите нижнюю грань пластины и задайте температуру 100 °С.

7.1.5 Создание конечно-элементной модели.

При расчёте задач теплопроводности необходим определённый тип конечных элементов. В окне **Element Type** (Mesh => Element Type) выберите следующий тип КЭ – DC2D4 (Рисунок 7.11). И нажмите **ОК**.

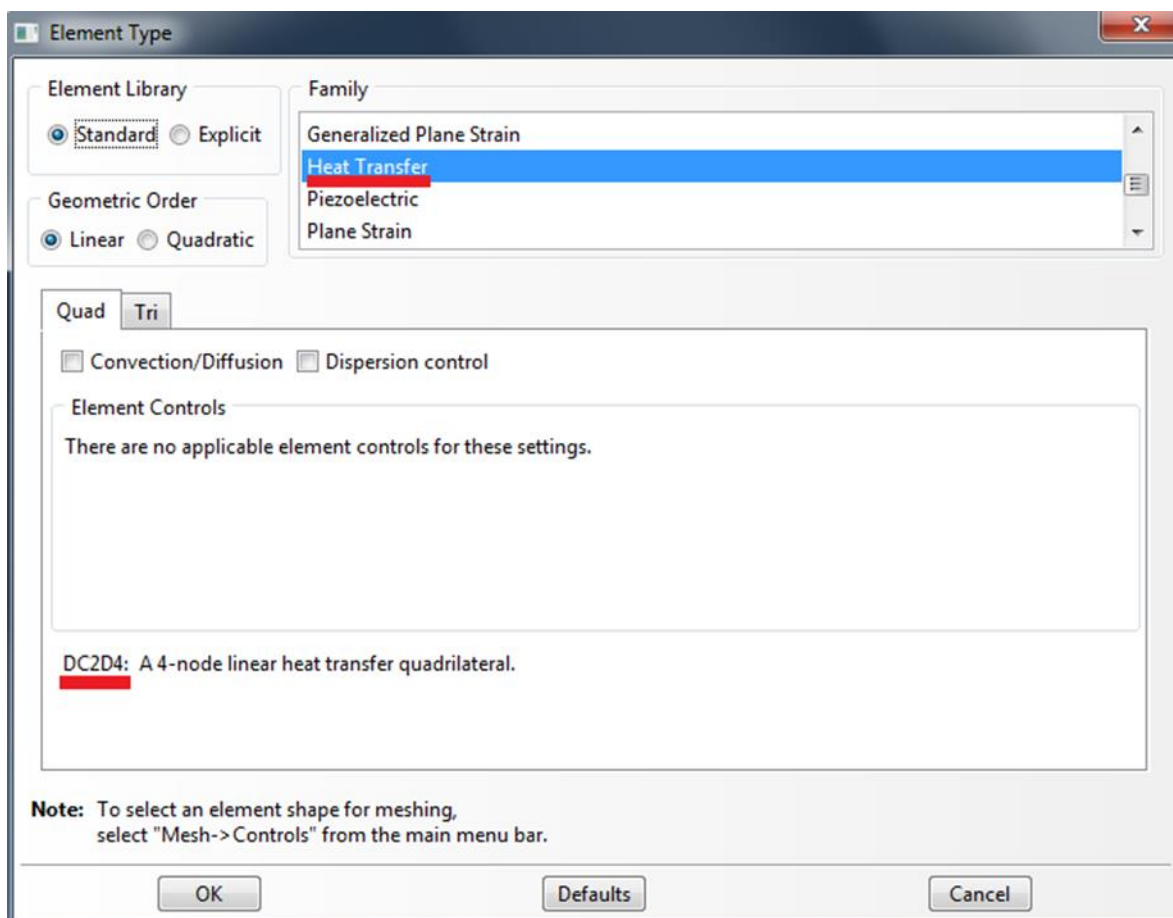




Рисунок 7.11 - Выбор типа конечных элементов

С помощью команды  **Seed Edges**, применив параметр **by number**, по меньшей стороне пластины задайте 12 элементов, а по большей 20. И произведите разбиение. (Рисунок 7.12)

Перейдите к модулю **JOB** (Рисунок 7.13). С помощью кнопки  **Create Job** (Рисунок 7.14) (либо команд меню **Job => Create**, или дважды кликнув по элементу в дереве модели) создайте задание на расчёт. В появившемся окне **Create Job**, присвойте заданию имя *Heat*.

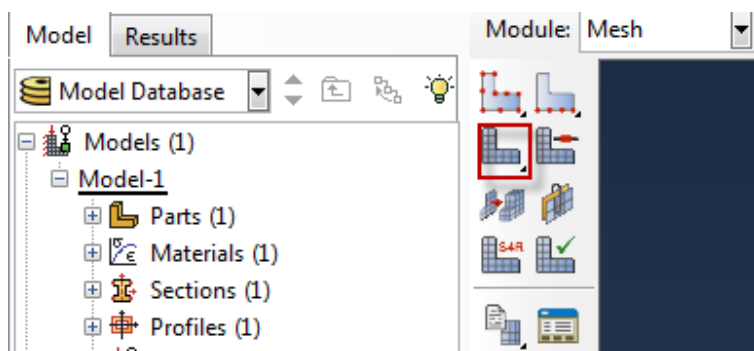


Рисунок 7.12 - Построение сетки.

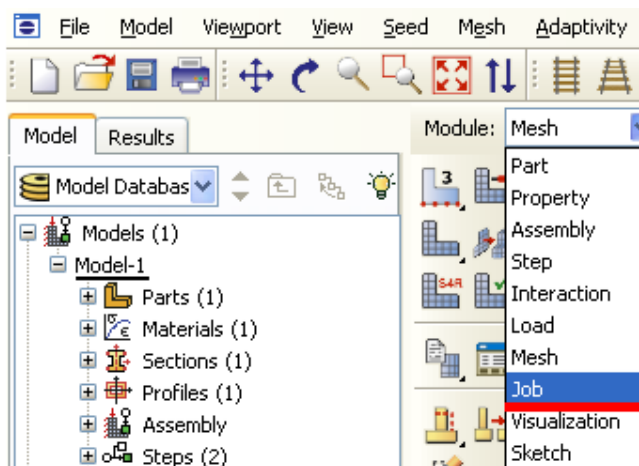


Рисунок 7.13 – Выбор модуля JOB



Рисунок 7.14 – Создание задания на расчёт

Для продолжения нажмите кнопку **Continue** и в окне **Edit Job**, задайте тип вычисления **Full Analysis**, очередность выполнения **Background** и время запуска **Immediately**. Можете также указать описание выполняемой работы. Подтвердите ввод нажатием кнопки **OK**. Задание на расчёт сформировано.

Чтоб запустить расчёт, вызовите **Job Manager** (Рисунок 7.15) (либо раскройте элемент **Jobs** дерева модели, кликните правой кнопкой по заданию Heat и выберите Submit, либо командами меню **Job => Manager**).

В появившемся окне **Job Manager** нажмите **Submit**. Надпись **Running** говорит о начале работы процесса.

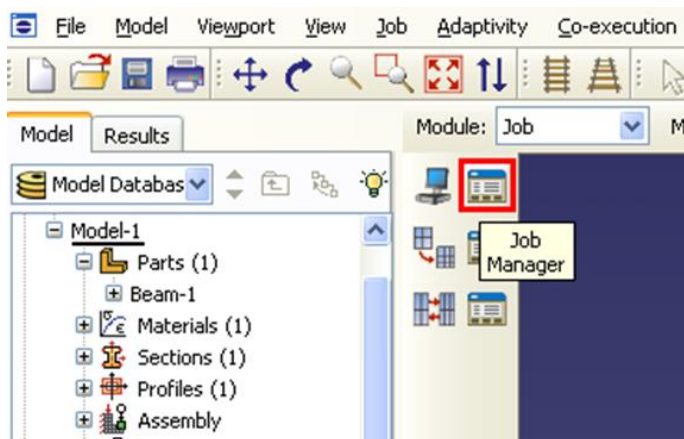


Рисунок 7.15 – Запуск Job Manager

7.1.6 Визуализация результатов расчёта.

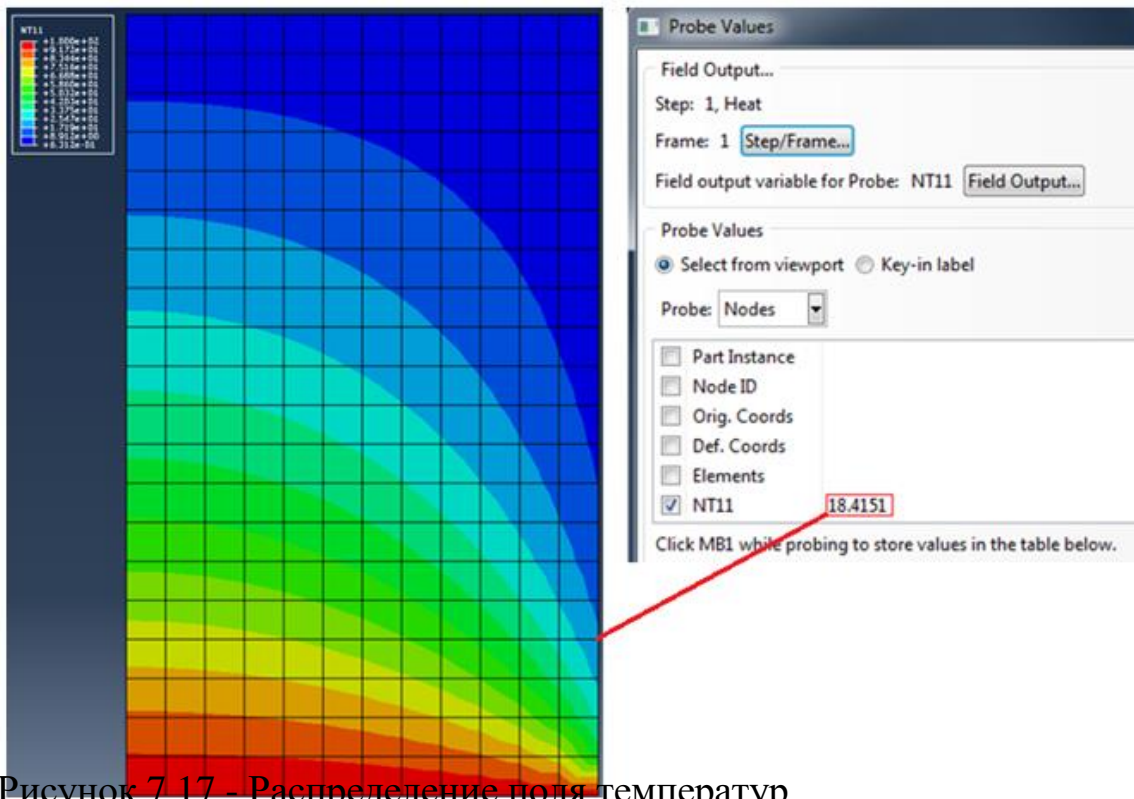


Рисунок 7.17 – Распределение поля температур
Значение температуры в точке E, полученное в результате расчёта, равно 18.451 °С. Погрешность в сравнении с аналитическим решением составляет 0.8 %.

7.2 Нестационарный режим теплопроводности

Произведём решение описанной выше задачи в нестационарной постановке. Для этого необходимо изменить тип решения в окне **Edit Step** с **Steady-state** на **Transient** (Рисунок 7.18). Устанавливаем время расчёта – 2500 сек.

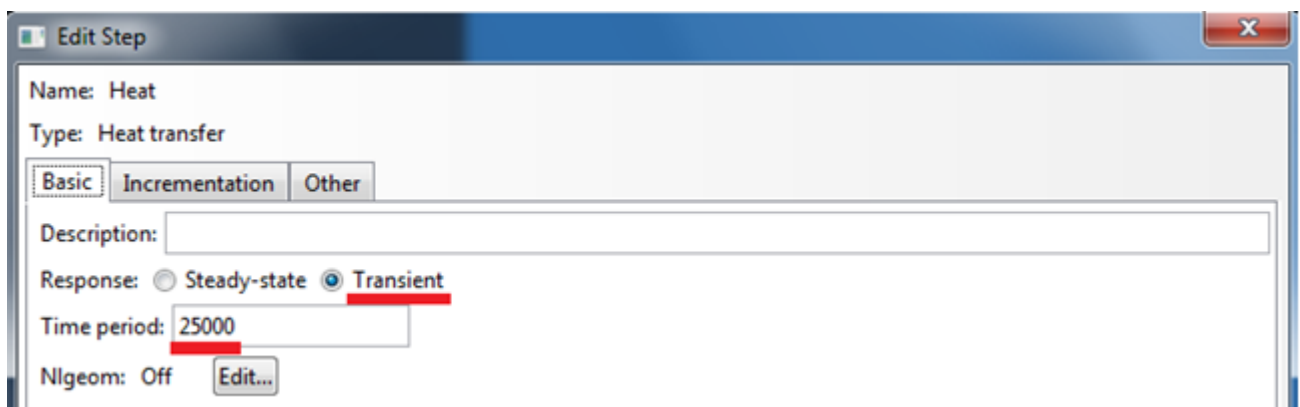


Рисунок 7.18 - Изменение расчётного режима теплопроводности

При решении нестационарных задач теплопроводности, необходимо уделять большое внимание значению минимального шага по времени. Если

здать слишком малый шаг, возможны ложные осцилляции значения температуры. Для предотвращения данной проблемы, следует пользоваться формулой для выбора минимального шага по времени:

$$\Delta t \geq \frac{\rho c}{6k} \Delta l^2$$

Здесь Δl - расстояние между узлами кэ.

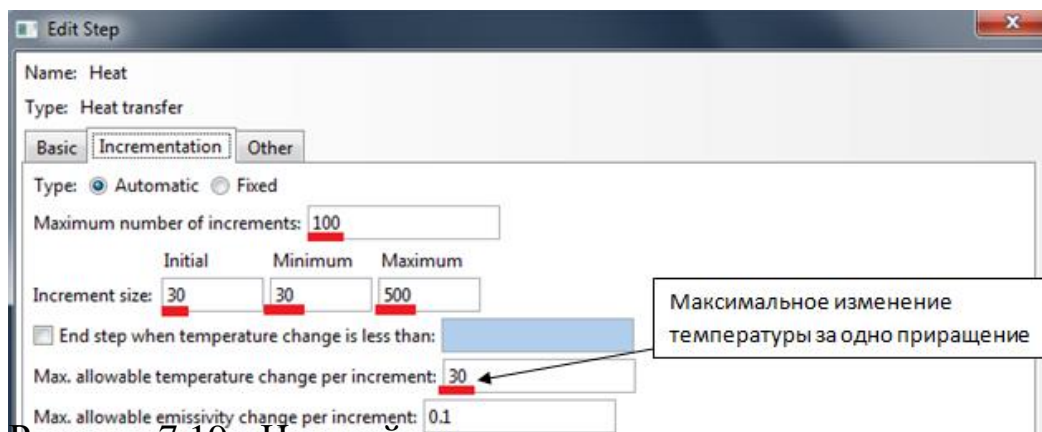
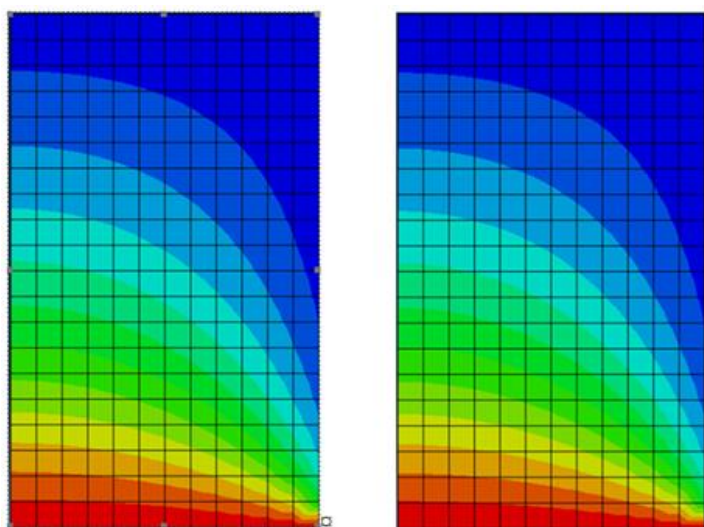


Рисунок 7.19 - Настройка параметров решателя

В данном случае, кроме изменения параметров решателя, переход к нестационарному режиму решения не требует дополнительных изменений модели. После изменения параметров решателя производим расчёт.

Получено распределение температур при стационарном и нестационарном режиме расчёта. На рисунке 7.21 изображены графики изменения температуры в точке E при стационарном и нестационарном режиме расчёта. Из анализа графиков видно, что при неизменных внешних воздействиях, задача переходит в квацистационарный режим с небольшими изменениями температуры. То есть, нестационарный режим теплопередачи (при постоянных внешних условиях) на большом интервале времени переходит в стационарный.



Стационарный режим Нестационарный режим
Рисунок 7.20 - Распределение температуры

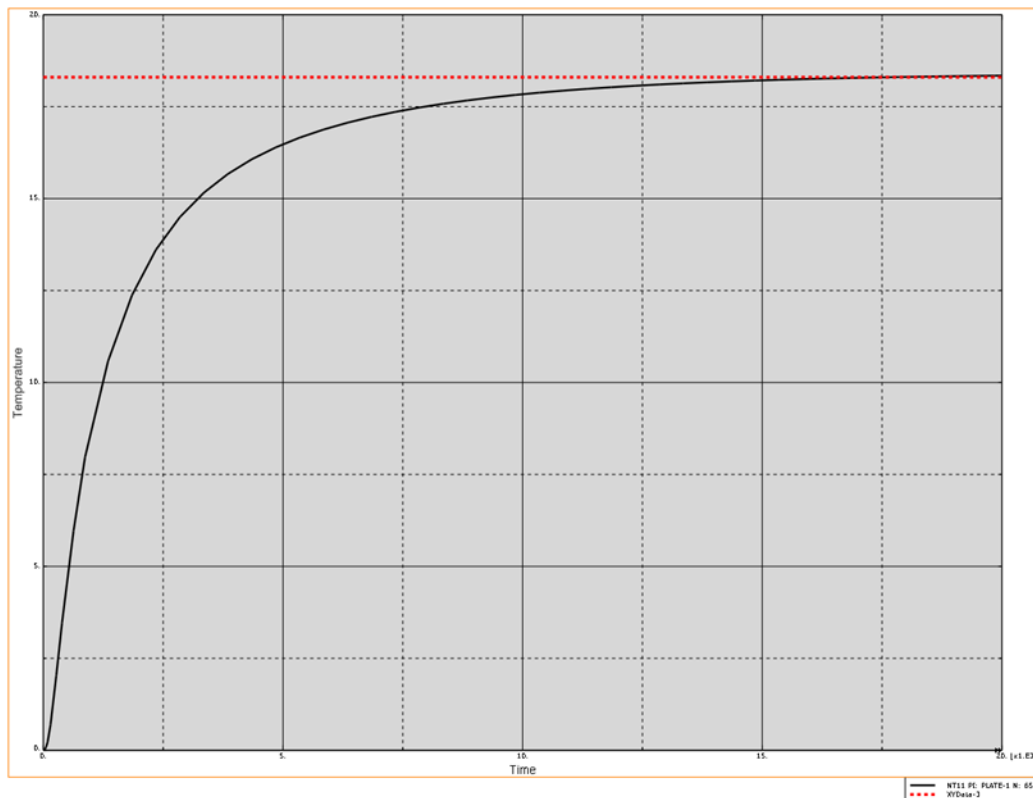


Рисунок 7.21 - Значение температуры в точке E при стационарном и нестационарном режиме

ЧАСТЬ 2. ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ ГЕОТЕХНИКИ В ABAQUS

Геотехническое моделирование выполняется при проектировании оснований, фундаментов, заглублённых и подземных сооружений, котлованов, насыпей и подпорных стен. Комплекс геотехнических работ включает в себя стадии проведения изысканий, разработки геотехнического обоснования строительства, проекта, сопровождения строительства и мониторинга.

Геотехническое моделирование выполняется с учётом таких факторов, как:

- инженерно-геологическое напластование основания и физико-механические характеристики грунтов площадки строительства;

- гидрогеологические характеристики площадки строительства;

- конструктивные решения и технологические параметры проектируемых объектов;

- окружающие здания, наземные и подземные сооружения, инженерные сети, дороги. При этом может учитываться как воздействие проектируемого здания или сооружения на существующие объекты, так и обратное влияние;

- климатические характеристики района, сейсмичность, наличие горных выработок и других факторов.

Принципы геотехнического моделирования

Геотехническое моделирование базируется на процессах моделирования грунтовых условий, а также взаимодействия фундаментов и подземных частей зданий и сооружений с грунтовым массивом. В ходе работ оцениваются напряженно-деформированные параметры грунта в основании проектируемого объекта, рассчитываются осадки фундаментов, крены стен, колонн, труб и других конструкций, которые находятся в зоне влияния возводимого сооружения. На основании этих расчётов предлагаются решения по устройству фундаментов и подземных частей проектируемых объектов, при необходимости указываются способы усиления конструкций окружающей застройки и разрабатывается перечень компенсирующих мероприятий, определяется наилучший порядок ведения строительно-монтажных работ, выделяются этапы.

Геотехническое обоснование предназначено для выбора оптимального варианта проектного решения и технологии его реализации, обеспечивающих надёжность объекта реконструкции или строительства и сохранность окружающей застройки.

Геотехника – точная наука, поэтому каждый вариант поддается достаточно строгой расчётной оценке. Эта расчётная оценка позволяет определить как деформации самого объекта строительства или реконструкции, так и вычислить размеры зоны риска для соседней застройки. Она оптимизирует возможные затраты уже на ранней предпроектной стадии и подтверждает их в процессе проектирования.

Нормативные методы и их корректность

В современных нормативных документах указано несколько расчётных методов для вычисления осадок зданий:

— метод послойного суммирования

и метод линейно-деформируемого слоя (СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями N 1, 2, 3, 4));

— модификация метода послойного суммирования (СП 50-101-2004 Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений Свод правил от 09.03.2004 N 50-101-2004);

— метод расчёта осадок свайных фундаментов

и — метод расчёта осадок плитно-свайных фундаментов (СП 50-102-2003 Проектирование и устройство свайных фундаментов Свод правил от 21.06.2003 N 50-102-2003).

Первые три метода основаны на одной и той же математике – решении задачи Буссинеска о силе, приложенной к границе упругого бесконечного полупространства.

От действия силы N в массиве грунта возникает сложное напряжённое состояние. Напряжение в точке M , расположенной в массиве грунта на глубине z и на расстоянии r от линии приложения силы по горизонтали определяется по формуле Ж. Буссинеска

$$\sigma_{zp}^M = \frac{N \cdot K_\sigma}{z^2}$$

где σ_{zp}^M – нормальное (сжимающее) напряжение по оси z, кПа;

K_σ – коэффициент рассеивания напряжений (определяется по таблице или по формуле).

Определив напряжения в массиве грунта, можно построить изолинии и эпюру напряжений σ_z (рис 8.1).

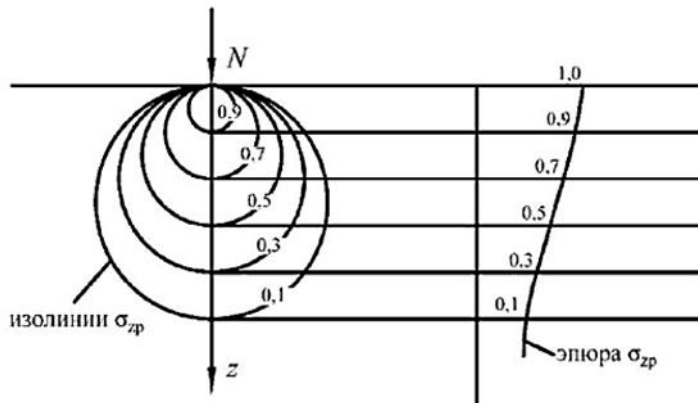


Рисунок - 8.1. Изолинии и эпюру напряжений σ_{zp} при действии одной вертикальной сосредоточенной силы.

Задача решается в линейной постановке, то есть перемещения и повороты малы, а модель материала – линейно-упругая. Так как в настоящей работе выполняется сравнение только напряжений, параметры материала заданы произвольно. На рисунке 8.2 приведены результаты численного решения.

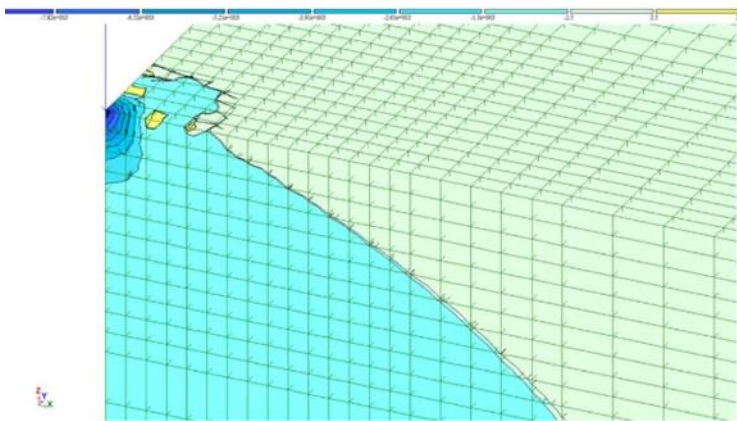


Рисунок - 8.2. Фрагмент конечно-элементной модели вблизи точки приложения сосредоточенной нагрузки. Изополя вертикальных напряжений по оси z.

Однако распределение напряжений в грунте – не линейно, и возникающие деформации в грунте под действием фундамента

сооружения, медленно затухают по глубине. Поэтому все существующие методы ограничивают расчётную глубину сжимаемой толщи.

Например, в методе послойного суммирования сжимаемая толщина ограничивается глубиной, на которой дополнительные напряжения от фундамента не превышают 20% от напряжений, вызванных собственным весом вышележащих слоёв грунта. В методе линейно-деформируемого слоя глубина сжимаемой толщи слабо зависит от напряжений, а определяется, в основном, шириной фундамента. В СП 50-101-2004 ввели новую модификацию метода послойного суммирования, устранив метод линейно-деформируемого слоя и изменив критерий ограничения сжимаемой толщи для широких фундаментов (50% вместо 20% напряжений от собственного веса).

Методы расчёта осадок свайных фундаментов СП 50-102-2003 основаны на применении полуэмпирической формулы, по которой рассчитывается осадка одной сваи, а затем по таблицам выполняется переход к осадкам группы свай. Как известно, одна свая работает, в основном, по боковой поверхности. Для осадки свайного куста или свайного поля общепринятым является подход «условного фундамента», объединяющего все сваи по их нижнему концу. Между одной сваей и условным фундаментом в рамках всего свайного поля есть качественная, а не только количественная разница. Главная же особенность такого подхода к расчёту осадок заключается в том, что на переходе от осадки одной сваи к осадке группы можно, кажется, насчитать любую величину осадки.

Необходимо заметить, что величины осадок, определённые по этим методам, значительно отличаются друг от друга.

Сопоставление расчётов осадок с натурными наблюдениями.

Причина низкой точности инженерных методов заключается в разнице учёта характеристик материала (модуль упругости и коэффициент Пуассона) и характеристик грунта (модуль деформации).

Таким образом, причина низкой точности простейших методов расчёта осадок заключается в том, что работу грунта нельзя описать одним параметром.

Нелинейная модель работы грунта

Модель Кулона-Мора - упруго-пластическая модель с предельной поверхностью. И по сравнению с методом послойного суммирования точность расчёта осадок не увеличивается.

Действительно, давление на основание мы всегда ограничиваем и оно всегда далеко от предельного (с выпором грунта из-под подошвы). А это значит, что нелинейность будет весьма слабой и незначительной.

Модель Мора-Кулона (модель идеальной пластичности) представляет собой определяющую модель с фиксированной поверхностью текучести, на которой не отражено пластическое деформирование (поведение исключительно упругое), а деформации считаются обратимыми (рис. 3).

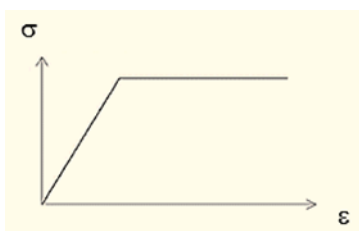


Рисунок – 8.3. Общее представление идеально-пластической модели

Данную модель рекомендуется применять при первоначальном анализе рассматриваемой задачи для быстрого и простого расчёта. Если нет возможности получить все необходимые данные по преобладающим типам грунта для использования более усовершенствованных моделей, то следует остановиться на использовании модели Мора-Кулона. Очевидно, что в редких случаях имеются результаты сразу и трёхосных и одометрических испытаний.

Модель материала описывается системой математических выражающих зависимости между напряжениями и деформациями. Основным принцип упруго пластичности заключается в разделении деформаций и их скоростей на упругие и пластические составляющие:

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}^c + \underline{\varepsilon}^p$$

Где $\underline{\varepsilon}^c$ - – упругие деформации, $\underline{\varepsilon}^p$ – пластические деформации, %.

Модель Мора – Кулона основывается на законе Гука и условии прочности Кулона. Модель Мора – Кулона, определяется пятью входными параметрами:

- модулем общей деформации E , кН/м²;
- коэффициентом Пуассона ν ;
- сцеплением c , кН/м²;
- углом трения φ ;
- углом дилатансии ψ , определяемым исходя из значений угла внутреннего трения и вида грунта.

Эти характеристики определяют по результатам испытаний образцов грунта в компрессионных приборах (одометрах), исключающих возможность бокового расширения образца при его нагружении вертикальной нагрузкой, согласно ГОСТ 12248-2010. Однако использование данной модели для решения задач устройства котлована не совсем корректно, так как модуль общей деформации E не соответствует реальной работе грунта на стадии разгрузки.

Примерами наиболее эффективных моделей является Hardening Soil Model или упрочняющаяся вязко-упруго-пластическая модель программы FEM models. Из рис. 8.4 следует, что величина средней ошибки составляет всего 10%. Так же исключилось ограничения сжимаемой толщи, которое неизбежно при применении более простых подходов.

Здесь нелинейная модель сама ограничивает деформируемую зону в основании. То есть - упруго-вязко-пластическая модель сама ограничивает деформированную зону в основании.

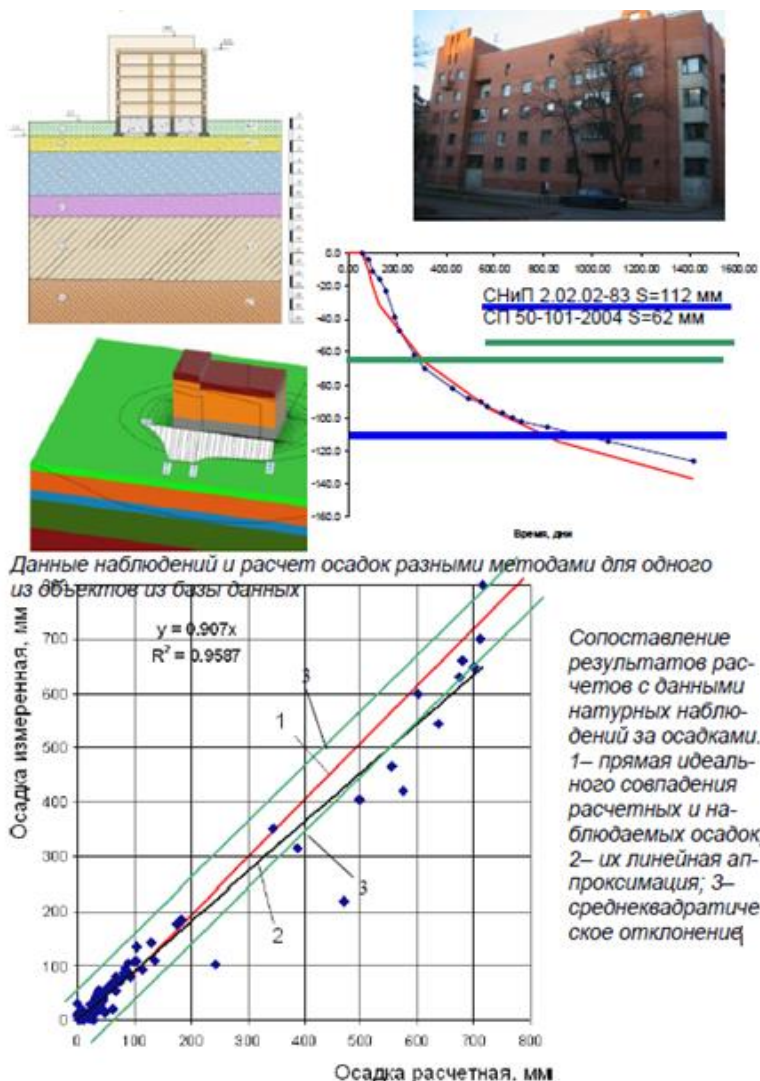


Рисунок – 8.4. Сопоставление результатов расчётов с данными натурных наблюдений за осадками

Для получения точных, обоснованных, менее затратных результатов, должна работать слаженная команда: геолог, геотехник-расчётчик, геотехник-проектировщик. Геолог определяет необходимые характеристики, которые нужны расчётчику, который знает, как работает грунт под нагрузкой с учётом результатов лабораторных испытаний и в последствии применяется проектировщиком.

Использование упрощённых моделей основания (коэффициентов постели)

В практике проектирования часто применяются упрощённые модели основания. Самой простой моделью является одноконстантная модель (Винклера). В этой модели осадка точки основания пропорциональна давлению в этой точке. Коэффициент пропорциональности (коэффициент

постели) характеризует жёсткость пружинки, установленной в каждой точке основания. При расчёте плит пружинки «размазываются» равномерно по площади плиты.

Модель не описывает распределительную способность грунта. Нагрузка, приложенная в каком-либо месте, вызывает осадки в пределах целой воронки оседания.

Для исправления недостатков простейшей модели Винклера было разработано множество ее модификаций – с двумя или тремя коэффициентами постели. В отечественной практике наиболее распространена модель Пастернака с двумя коэффициентами постели (за рубежом эта модель, напротив, почти неизвестна).

При правильном подборе параметров модель Пастернака способна изобразить воронку оседания грунта вокруг нагруженной площади.

Есть ещё один подход к упрощению работы основания – использование одного, но переменного коэффициента постели. Жёсткость основания определяется делением давления по площади на осадку. В результате мы получим поле переменных по площади коэффициентов постели. Решение выполняется итерационным способом: сначала задаёмся нагрузкой на основание, затем считаем осадку, затем делим нагрузку на осадку (получаем коэффициенты постели), затем на них считаем сооружение и опять получаем нагрузку на основание.

Данное решение позволяет изобразить с некоторой погрешностью упругое основание (т.е. ту же модель, что и в инженерных методах, со всеми ее недостатками и низкой точностью прогноза осадок). Но в современных программах упругое основание гораздо проще моделировать объёмными упругими элементами

Методы с использованием коэффициентов постели, упругое основание, «модель Кулона-Мора», «модель Друкера-Прагера», или что-либо подобное, дают величину осадки, которая не должна существенно расходиться с методом послойного суммирования (точность самого метода послойного суммирования не лучше $\pm 30\%$). Закономерные отличия могут получаться только при использовании более сложных упрочняющихся моделей грунта, например, Hardening Soil Model (HSM) или упрочняющаяся упруго-вязко-пластическая модель программы FEM models.

Но сложные модели обладают и более сложным набором параметров. Только при правильном назначении этих параметров модель будет отражать работу грунта. И первое простое правило использования сложных моделей: без подробных инженерно-геологических изысканий с лабораторными испытаниями (в том числе стадиометрическими) сложные модели механики грунтов применять нельзя; второе простое правило: модель должна с удовлетворительной точностью описывать результаты лабораторных испытаний грунта. В геотехническом обосновании должны быть приведены доказательства этого: результат моделирования

компрессионных испытаний должен совпадать с компрессионной кривой; моделирование трёхосных испытаний должно давать такую же кривую, что и в лабораторных опытах; и третье «простое» правило использования сложных моделей: результаты расчётов должны быть сопоставлены с опытом натуральных наблюдений в регионе. И конечно при выборе расчётчика предпочтение лучше отдать специалистам, которые занимаются научной деятельностью в области численных расчётов.

Кратко основной эффект учёта пространственной работы основания и взаимодействия с конструкциями здания можно изложить достаточно просто. Основание всегда, так или иначе, пытается «согнуть» наше сооружение (даже когда нагрузки от него близки к равномерным). Сооружение же в силу своих возможностей пытается воспрепятствовать этому изгибу. В результате в конструкциях возникают дополнительные напряжения, которые обязательно нужно учитывать при проектировании конструкций. Особенно это становится важным для зданий и сооружений со сложными конструктивными схемами: в них перераспределение напряжений может привести к весьма непростому перераспределению усилий (рис. 8.5).

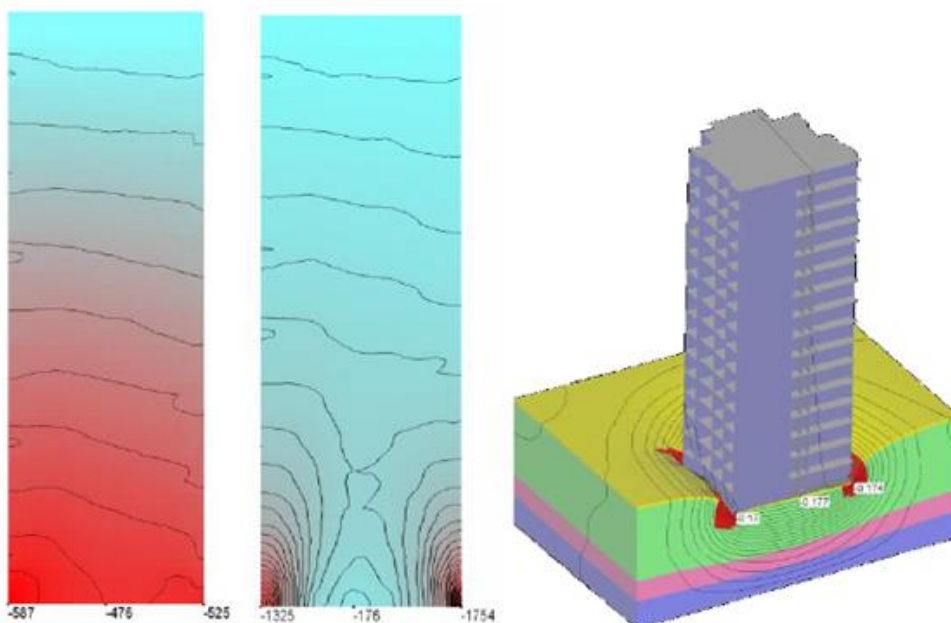


Рисунок – 8.5. Усилия (кН/м) в поперечной стене здания на естественном основании: слева – по раздельному расчёту, без учёта работы основания, (усиления просто увеличиваются книзу), справа – по совместному расчёту, в котором наблюдаются концентрации усилий в краевых участках

Грамотный учёт взаимодействия основания и надземных конструкций предусматривает использование сложных нелинейных моделей грунта.

С ростом урбанизированных территорий и активным освоением подземного пространства в последние десятилетия значительно возросло использование специального геотехнического программного обеспечения для расчёта прочности и устойчивости грунтовых оснований.

Самой простой нелинейной моделью работы грунта является общеизвестная идеально упругопластическая модель с предельной поверхностью, определяемой критерием Кулона-Мора (рис. 6). Преимущество модели заключается в простоте назначения параметров, которые можно почерпнуть в любом отчёте по инженерно-геологическим изысканиям. Модель предусматривает одинаковое поведение материала на фазе первичного нагружения и разгрузки, что совершенно нехарактерно для грунтов (у которых модуль нагружения и разгрузки отличается, как известно, в 5...10 раз).

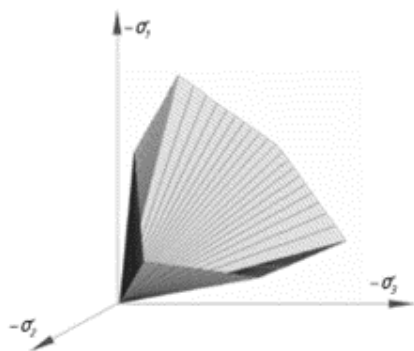


Рисунок – 8.6. Предельная поверхность, определяемая критерием Кулона-Мора

«Шатровые» модели. Модифицированная модель Cam Clay

Более полно работу грунта описывают шатровые модели. Наиболее известной моделью из этого класса является модифицированная модель Cam Clay (Роско К.Х., Борланд Д.Б 1968). Эта модель удачно описывает траектории первичного нагружения грунта, но даёт принципиально неверный результат на траекториях разгрузки. В этой модели область упругого состояния ограничивается не только поверхностью, описываемой критерием Кулона-Мора, но также дополнительной эллиптической поверхностью «шатра». Обычно модель строят в координатах

$$p = 1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \text{ и } q = 1/(\sigma_1 - \sigma_2) - \text{рис. 8.7.}$$

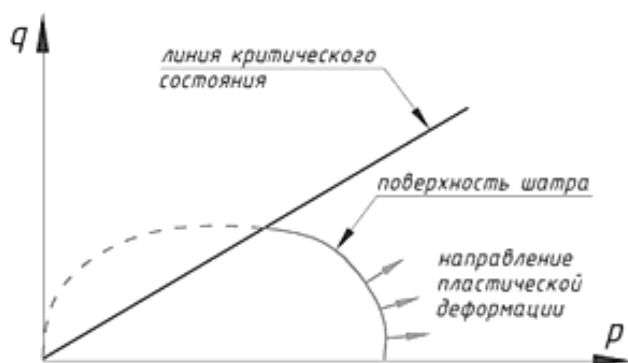


Рисунок – 8.7. Схема построения классической модели Cam-Clay

Результаты моделирования в этом случае могут быть достаточно грубыми и плохо согласующимися с реальными данными; Основным недостатком классических моделей типа Cam Clay является не вполне корректное описание сдвиговых деформаций грунта. Криволинейную зависимость между сдвиговыми деформациями и касательными напряжениями можно получить только при пересечении траектории нагружения с криволинейной поверхностью шатра. При этом зависимость между напряжениями и деформациями полностью определяется видом поверхности нагружения, т. е. шатра. Отсутствует учёт сцепления для глинистых грунтов. Сцепление при таком подходе является следствием предыдущего уплотнения.

Подводя итог критическому анализу рассмотренных нелинейных моделей, можно отметить перегруженность большинства моделей математическими зависимостями, не имеющими под собой физических обоснований.

Наиболее популярна сегодня упругопластическая модель с изотропным упрочнением Hardening Soil Model включает: в качестве поверхности разрушения – формулировку Мора-Кулона; для описания упругой области напряженно-деформированного состояния – гиперболическую формулировку Duncan Hong с изменяемыми модулями упругости для траектории первичного нагружения и траектории разгрузки – повторного нагружения; для описания пластических сдвиговых и объёмных деформаций – две функции текучести для девиаторного f_s и изотропного f_c нагружений, соответственно, рис. 8.8 б.

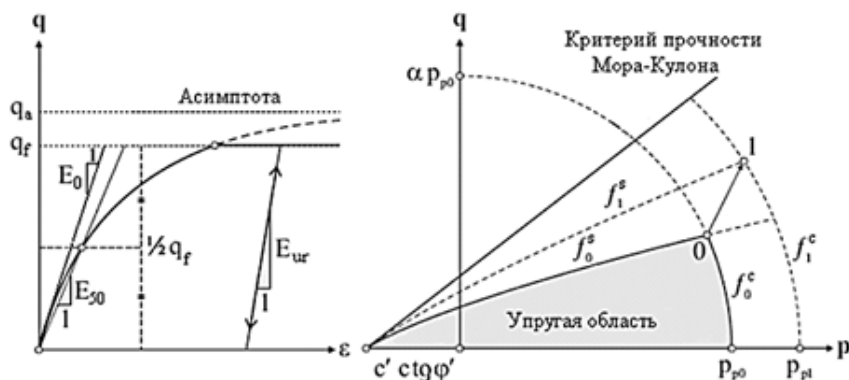


Рисунок -8.8. Гиперболическое отношение между напряжениями и деформациями (слева) и поверхности текучести модели Hardening Soil (справа)

Модель точно описывает поведение грунта при экскавации грунта, при устройстве подпорных стен и проходке туннелей, сопровождающейся уменьшением среднего эффективного напряжения и одновременно мобилизацией сопротивления пород сдвигу. Ограничения модели: неспособность учесть явления анизотропии прочности и жесткости, ползучести и длительной прочности, непригодность для моделирования динамических процессов.

Основные определяющие уравнения: гиперболическое отношение; суммируемость деформаций; функция текучести; закон пластического течения материала; закон пластического упрочнения.

Для задания модели необходимо 10 параметров – рис. 8.9:

Символ	Название	Ед. изм.
E_{50}^{ref}	Секущий модуль упругости при 50 % значении ($\sigma_1 - \sigma_3$) из трехосных испытаний (Reference stiffness for triaxial compression)	кН/м ²
E_{oed}^{ref}	Тангенциальный модуль упругости из компрессионных испытаний (Reference stiffness for primary oedometer loading)	
E_{ur}^{ref}	Модуль упругости при разгрузке-повторном нагружении из компрессионных испытаний (Reference stiffness for triaxial unloading)	
ν_{ur}	Число Пуассона при разгрузке-повторном нагружении, по умолчанию $\nu_{ur}=0,2$	–
m (power)	Показатель степени, для описывания влияния ограничивающего давления на модуль упругости, определяется из компрессионных испытаний	–
K_0	Коэффициент бокового давления грунта $K_0 = \sigma'_{xx} / \sigma'_{yy}$ при консолидации, по Jaky (1944) $K_0^{JK} = 1 - \sin \varphi$	–
p^{ref}	Опорный уровень напряжений (Reference stress for stiffnesses), по умолчанию $p^{ref}=100$	кН/м ²
c	Эффективное сцепление из трехосных испытаний	
φ (phi)	Эффективный угол внутреннего трения из трехосных испытаний	град
ψ (psi)	Угол дилатансии из трехосных испытаний, обычно $\psi = \varphi - 30^\circ$	

Рисунок – 8.9. Перечень параметров грунта для модели Hardening Soil

Расширенная обработка данных компрессионных, трёхосных и испытаний дилатометром позволяет установить значения дополнительных параметров деформируемости, таких как параметр нелинейности компрессионной кривой, модуль деформации при разгрузке – повторном нагружении, необходимых для проектирования сооружений повышенного уровня ответственности, например обделки метрополитена.

Имитация экспериментальных испытаний с помощью метода конечных элементов даёт возможность проверить правильность определения параметров деформируемости для расчётов осадки поверхности.

Процесс установления параметров грунта для последующего численного моделирования является важнейшей составляющей обеспечения качества оценки напряженно-деформированного состояния грунтового массива. Поэтому необходимо уделить особое внимание разработке отечественных нормативов для определения числа Пуассона, коэффициента бокового давления грунта в состоянии покоя, угла дилатансии. Следует установить методику определения этих параметров с достаточной надёжностью и с приемлемыми издержками.

Таким образом с помощью метода конечных элементов возможно не только выполнение расчётов различных предельных состояний оснований, но и установление неявных параметров грунта, используемых в качестве вводных.

Далее Вам предлагается решить несколько заданий для изучения базовых инструментов, необходимы для решения задач геотехники.

Перед выполнением заданий Вам необходимо загрузить курс на Ваш компьютер. Для этого в **Abaqus/CAE** перейдите **Plug-ins=> Tools=> Install Courses** и выберите удобную вам директорию и курс «Analysis of Geotechnics with Abaqus». Таким образом Abaqus добавит скрипты, необходимые для решения заданий.

Семинар 1 - Модели материалов в геотехнике

Введение

После прохождения этого семинара вы сможете:

Создавать диаграммы напряженного состояния.

Определять ряд моделей геотехнических материалов.

Использовать Abaqus/CAE для построения простых моделей, просмотра и интерпретации поведения материалов.

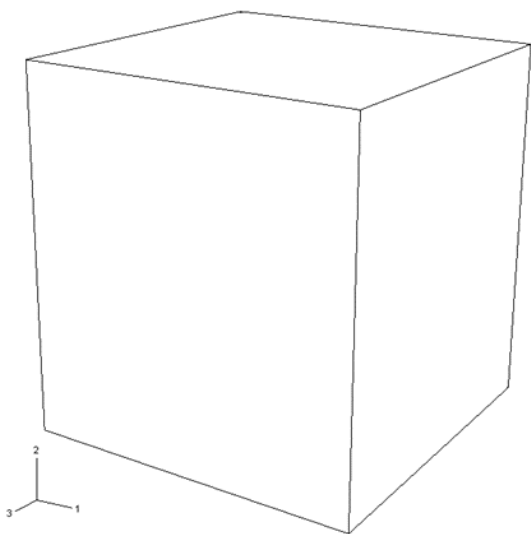


Рисунок W1- 1 Конфигурация модельного куба.

На этом семинаре вы познакомитесь с некоторыми моделями геотехнических материалов в Abaqus. Вы будете изучать поведение куба 2x2x2 м, показанного на рисунке W1-1. Этот куб будет подвергаться одноосному растяжению, одноосному сжатию, чистому сдвигу, гидростатическому растяжению и гидростатическому сжатию. Кубу будут назначены различные модели материалов, и будет смоделирована реакция куба для этих моделей материалов.

Предварительная подготовка

Введите рабочий каталог для этого семинара:

`../geotechnical/interactive/geomaterials`

Запустите сценарий `ws_geotech_geomaterials.py` с помощью следующей команды:


`abaqus cae startup=ws_geotech_geomaterials.py`

Приведённая выше команда создает базу данных Abaqus/CAE с именем `cube.cae` в текущем каталоге. Эта база данных содержит полную модель с именем `cube`. Материал куба линейно-упругий с модулем Юнга 70 ГПа и коэффициентом Пуассона 0,3. Грани куба, лежащие в плоскостях X-Y, Y-Z и Z-X, ограничены от смещений, нормальных к этим плоскостям. Предписанные смещения 0,01 вдоль внешних нормалей к трём другим граням заданы таким образом, чтобы куб находился в состоянии гидростатического напряжения. Сетка этого куба состоит из одного уменьшенного интегрированного элемента, как показано на рисунке W1-1. Для каждого из проблемных случаев в этом практикуме вы скопируете исходную модель куба и измените применённые граничные условия и данные о материалах.

Пример 1: Линейная эластичность

Вы начнёте этот семинар с запуска модели, созданной сценарием настройки, и изучения поведения куба при гидростатическом растяжении. Затем вы создадите новые модели, скопировав исходную модель и изменив граничные условия, чтобы подвергнуть куб (a) одноосному растяжению, (b) одноосному сжатию, (c) гидростатическому сжатию и (d) чистому сдвигу. После изменения граничных условий для модели вы запустите анализ, проверьте ошибки моделирования и просмотрите результаты.

1. В дереве модели разверните контейнер **Jobs**. Нажмите кнопку мыши 3 на задании с именем **Case_1_hydro_TN** и выберите **Submit** в появившемся меню, чтобы отправить задание на анализ.

Совет: Если дерево модели не видно, убедитесь, что в меню **View** стоит галочка напротив **Show Model Tree**. Если дерево модели по-прежнему не видно, перетащите курсор  из левой части окна Abaqus/CAE, чтобы развернуть дерево модели.

2. Во время выполнения задания нажмите кнопку мыши 3 на задании **Case_1_hydro_TN** в дереве моделей и выберите пункт **Monitor** в появившемся меню, чтобы просмотреть ход анализа. Проверьте наличие ошибок и предупреждений на вкладках

Ошибки и Предупреждения в диалоговом окне мониторинга задания.

3. После завершения работы нажмите кнопку мыши 3 на задании **Case_1_hydro_TN** в дереве моделей и выберите в появившемся меню пункт **Results**.
4. Изучите результаты анализа в модуле Визуализация. Посмотрите на деформированную форму и постройте контуры ненулевых компонентов напряжения (S11, S22 и S33).
5. В дереве моделей нажмите кнопку мыши 3 на кубе модели и в появившемся меню выберите **Copy Model**. Назовите новую модель **Case_1_uni_TN**.
6. Измените граничные условия, чтобы подвергнуть куб одноосному растяжению в направлении X.
 - a. В дереве моделей нажмите кнопку мыши 3 на контейнере **BCs** для модели **Case_1_uni_TN** и в появившемся меню выберите пункт **Manager**.
 - b. Выключите **BC-5**, которое представляет собой предписанное смещение 0,01 в *Y-направлении*. Это позволит удалить данное граничное условие смещения.
 - c. Аналогично выключите **BC-6**, который относится к предписанному граничному смещению в *Z-направлении*. Удаление этих граничных условий позволит свободно расширять или сжимать куб по направлениям Y и Z. Не удаляйте BC-4, который будет прикладывать напряжение в направлении X. Теперь эта модель готова к выполнению.
7. В дереве моделей дважды щелкните на **Jobs**, чтобы создать новое задание.
8. Назовите новое задание **Case_1_uni_TN** и выберите **Case_1_uni_TN** в качестве имени модели. Нажмите Продолжить. В диалоговом окне **Редактирование задания** нажмите **ОК**, чтобы принять настройки задания по умолчанию.
9. Отправьте задание **Case_1_uni_TN** на анализ и просмотрите результаты
10. Аналогично, создайте модели с именами **Case_1_uni_CMP** для одноосного сжатия, **Case_1_hydro_CMP** для гидростатического сжатия и **Case_1_shear** для чисто сдвигового состояния деформации. Измените эти модели следующим образом:

Пример_1_uni_CMP: примените смещение -0,01 м в **BC-4** и удалите **BC-5** и **BC-6**, чтобы получить одноосное сжатие.

Case_1_hydro_CMP: примените смещения **-0,01** м для **BC-4, BC-5** и **BC-6**, чтобы получить гидростатическое сжатие.

Случай_1_ сдвиг: Состояние деформации чистого сдвига можно получить, удалив **BC-2, BC-5** и **BC-6**, изменив **BC-4** так, что бы он задавал смещение на **0,01** м вдоль направления **Y**, и изменив **BC-1** так, чтобы задать нулевое смещение вдоль направлений **X** и **Y**.

11. Создавайте и отправляйте задания для этих моделей и визуализируйте результаты.

Вопрос W1-1: На меридиональной плоскости (давление p vs. напряжение Мизеса q) изобразите местоположение точек напряжения для одноосного растяжения, одноосного сжатия, гидростатического растяжения, гидростатического сжатия и чистого сдвига. Примечание: подробные инструкции включены в ответы к семинару.

Вопрос W1-2: Выведите зависимость между давлением и напряжением Мизеса для одноосного растяжения. Сравните с графиком в меридиональной плоскости.

Пример 2: Пластичность по Друкеру-Прагеру

В примере 1 материал куба был линейно упругим. В примере 2 вы добавите пластичность Друкера-Прагера и исследуете реакцию куба на одноосное растяжение и сжатие, выполнив следующие действия:

1. Скопируйте куб модели в новую модель с именем **Case_2_uni_CMP**.
2. В ветви Model Tree для модели **Case_2_uni_CMP** щёлкните кнопкой мыши **3** на материале **Elastic** и в появившемся меню выберите **Rename**. Переименуйте этот материал в **Drucker-Prager**.
3. Дважды щёлкните переименованный материал **Drucker-Prager**, чтобы отредактировать материал.
4. В диалоговом окне **Редактирование материала** выберите **Mechanical** → **Plasticity** → **Drucker Prager**. В соответствующих столбцах данных укажите угол трения **30**, коэффициент напряжения течения **1** и угол расширения **30**. Единицы измерения углов - градусы.
5. В опциях **Drucker Prager** редактора материалов нажмите **Suboptions** и в появившемся меню выберите **Drucker Prager Hardening**. Задайте предел текучести **30e6 Па** при абсолютной пластической деформации **0**. Эти данные для идеальной пластичности, так как предел текучести не зависит от пластической деформации. Нажмите **OK** в диалоговом окне **Drucker Prager Hardening** и в диалоговом окне **Edit Material**.

6. В дереве модели дважды щелкните Section-1, чтобы отредактировать определение сечения. Abaqus предупредит, что материал секции больше не существует. Нажмите кнопку Dismiss, чтобы закрыть предупреждение. В редакторе сечений нажмите ОК, чтобы определить сечение с материалом Drucker-Prager.
7. Выключите граничные условия BC-4, BC-5 и BC-6.
8. В ветви Model Tree для модели Case_2_uni_CMP дважды щелкните Loads, чтобы создать новую нагрузку. Выберите давление в качестве типа нагрузки и нажмите Продолжить.
9. Выберите поверхность, параллельную грани, лежащей в плоскости Y-Z, в качестве поверхности для приложения нагрузки давления (как показано на рисунке W1-2) и нажмите кнопку Готово в области запроса. Укажите величину нагрузки давления как 25×10^6 Па и нажмите ОК. Эта нагрузка давления подвергнет куб одноосному сжатию.

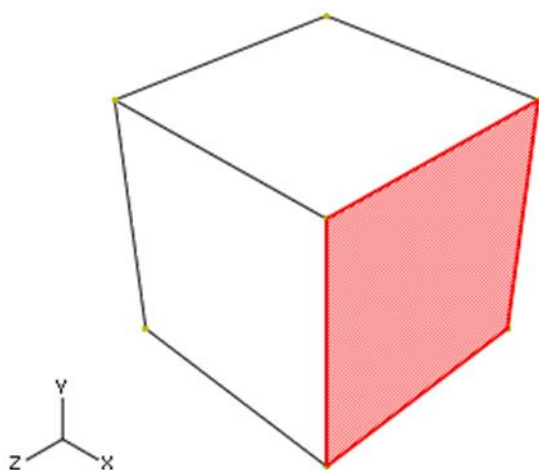


Рисунок W1-2: Выбор поверхности, лежащей параллельно грани на плоскости Y-Z.

10. В дереве моделей дважды щелкните Jobs, чтобы создать новое задание на анализ. Назовите задание Case_2_uni_CMP. Отправьте это задание.
11. Задание не будет завершено из-за некоторых ошибок. После завершения выполнения нажмите кнопку мыши $\mathbb{3}$ на задании и выберите в появившемся меню пункт Results. Вы должны иметь возможность визуализировать результаты Step-1 и Step-2 в модуле Визуализация. Вы увидите, что Step-1 завершился успешно, но Step-2 не завершился.

12. В дереве моделей дважды щелкните **Jobs**, чтобы создать новое задание на анализ. Назовите задание **Case_2_uni_CMP**. Отправьте это задание.
13. Задание не будет завершено из-за некоторых ошибок. После завершения выполнения нажмите кнопку мыши 3 на задании и выберите в появившемся меню пункт **Results**. Вы должны иметь возможность визуализировать результаты Step-1 и Step-2 в модуле Визуализация. Вы увидите, что Step-1 завершился успешно, но Step-2 не завершился.

Вопрос W1-3: Для Step 1 нарисуйте поверхность текучести в меридиональной плоскости и постройте историю напряжений вдоль направления нагрузки. Подтвердите, что напряжение находится в равновесии с внешней нагрузкой.

Вопрос W1-4: Почему задание не выполнено на Step 2?

Создайте новую модель Case_2_uni_CMP_TN, скопировав модель Case_2_uni_CMP.

Удалите нагрузку давления, определённую для предыдущего испытания на сжатие.

Для того чтобы исследовать работу модели материала Друкера-Прагера при сжатии и растяжении, вы проведёте испытание на одноосное сжатие, а затем испытание на одноосное растяжение. Для этого используйте два шага анализа.

Резюме ВС-4. На Step 1 примените одноосное сжатие, задав смещение -0,01 м вдоль направления X. На Step 2 измените граничное условие так, чтобы оно имело предписанное смещение 0,01 м, что приведёт к одноосному растяжению куба.

Создайте задание с именем Case_2_uni_CMP_TN. Отправьте это задание на расчёт.

Вопрос W1-5: На меридиональной плоскости изобразите историю прямого напряжения (S_{11}), напряжение Мизеса и местоположение напряжения. Деформируется ли материал при правильном пределе текучести при растяжении и сжатии?

Постройте график эквивалентной девиаторной пластической деформации как функцию объёмной пластической деформации.

- a. Переключитесь на модуль Визуализация и откройте файл выходной базы данных Case_2_uni_CMP_TN.odb с выключенной опцией только для чтения в диалоговом окне Открыть базу данных.
- b. Запустите Python-скрипт ws_geotech_dev_tensor.py. Этот скрипт вычисляет девиаторные и объёмные компоненты выходных переменных тензора.

- c. В диалоговом окне Get Input укажите PE в качестве выходной переменной.
- d. Результаты сценария записываются в выходную базу данных как полевые данные. Чтобы сохранить данные поля как данные X-Y, сделайте следующее:
 - i. В дереве результатов дважды щёлкните XYData.
 - ii. В диалоговом окне Создание данных XY выберите в качестве источника данных вывод полей ODB. Нажмите кнопку Продолжить.
 - iii. На странице вкладки Переменные диалогового окна XY Data from ODB Field Output выберите Integration Point в качестве позиции переменной. Включите EQ_DEV_PE: Deviatoric, что является эквивалентной девиаторной пластической деформацией. Включите VOL_PE: Volumetric, что представляет собой объёмную пластическую деформацию.
 - iv. На странице с вкладкой Элементы/узлы нажмите Редактировать выделение и выберите элемент, отображаемый в области просмотра. Нажмите кнопку Готово в области подсказок.
 - v. В диалоговом окне XY Data from ODB Field Output нажмите Save (Сохранить).
- e. В дереве результатов дважды щёлкните XYData.
- f. В диалоговом окне Создание данных XY в качестве источника выберите Операция над данными XY и нажмите кнопку Продолжить.
- g. В диалоговом окне Operate on XY Data выберите combine(X,X) из списка операторов. Выберите EQ_DEV_PE и нажмите кнопку Добавить в выражение. Аналогичным образом добавьте VOL_PE в выражение.
- h. Нажмите Plot Expression (Построить выражение).

Вопрос W1-6: Сравните эти результаты пластической деформации с результатами анализа материала Друкера-Прагера с нулевым углом расширения. Вам нужно будет повторно запустить анализ после изменения значения угла расширения. Что вы наблюдаете?

Пример 3: Друкер-Прагер с пластичностью крышки

В примере 1 материал куба был линейно-упругим, а в примере 2 - материал Друкера-Прагера. В примере 3 вы измените материал модели на материал Друкера-Прагера с пластичностью и исследуете реакцию модели на одноосное сжатие.

1. Создайте новую модель, скопировав модель куба. Назовите новую модель **Case_3**.

2. Переименуйте материал **Elastic** в **Cap**.
3. В дереве модели дважды щёлкните **Cap**, чтобы отредактировать материал. В диалоговом окне **Edit Material** выберите **Mechanical** → **Plasticity** → **Cap Plasticity**. В соответствующих колонках данных укажите когезию материала как **2,4226e7** Па, угол трения как **30**, эксцентриситет колпачка как **0,1**, положение начальной поверхности текучести как **0,002**, радиус переходной поверхности как **0**, и коэффициент напряжения течения как **1**.
4. Выберите **Suboptions** → **Cap Hardening** и укажите предел текучести в зависимости от объёмной пластической деформации в соответствии с данными в таблице W1-1. Нажмите ОК в диалоговых окнах **Suboptions Editor** и **Edit Material**.

Таблица W1-1: Данные по закалке колпачков.

p_b (Па)	ε_{vol}
5.0e6	0.000
10.0e6	0.001
30.0e6	0.002
60.0e6	0.003
100.0e6	0.004
200.0e6	0.005
500.0e6	0.006

5. Отредактируйте **раздел 1** так, чтобы он ссылался на материал **Cap**.

Вопрос W1-7: Нарисуйте начальную поверхность текучести и потенциал потока на меридиональной плоскости.

Далее вы измените модель для проведения испытания на одноосное сжатие, приложив смещение **-0,05** м вдоль направления **X** к грани куба, параллельной той, которая лежит в плоскости **Y-Z**.

6. Выключите граничные условия **BC-5** и **BC-6**. Отредактируйте **BC-4**, чтобы задать предписанное смещение **-0,05** м вдоль направления **X**.
7. Создайте задание с именем **Case_3** и отправьте его на анализ. После завершения задания просмотрите результаты.

Вопрос W1-8: Постройте график эквивалентной девиаторной пластической деформации как функцию объёмной

пластической деформации. (Используйте Python скрипт `ws_geotech_dev_tensor.py`, как описано ранее.) Сравните результат с поведением, полученным с помощью модели Друкера-Прагера в вопросе W1-6, и объясните поведение модели Капа.

Вопрос W1-9: Нарисуйте обновлённый потенциал потока на меридиональной плоскости.

Вопрос W1-10: Постройте график зависимости компонента напряжения S_{11} от компонента деформации E_{11} . Объясните реакцию.

Пример 4: Пластичность глины

В примере 4 вы будете использовать модель материала Clay (глина). Модель глины в Abaqus не имеет когезии, и поэтому сначала модель будет подвергнута начальному напряженному состоянию гидростатического сжатия. Это произойдёт на этапе 1 анализа. Затем, на этапе 2 анализа, будет исследована реакция модели на одноосное сжатие. Далее, на этапе 3, сжатие будет заменено растяжением. Сжатие и растяжение на этапах 2 и 3 будут применяться с использованием соответствующих предписанных граничных условий смещения.

1. Создайте новую модель, скопировав модель **куба**. Назовите новую модель **Case_4**.
2. Переименуйте материал **Elastic** в **Clay**.
3. В дереве модели дважды щёлкните **Clay**, чтобы отредактировать материал. В диалоговом окне **Редактирование материала** выберите **Механическая** → **Пластичность** → **Пластичность глины**. Из списка вариантов **Hardening** выберите **Tabular**. В соответствующих столбцах данных укажите коэффициент напряжения **0,577** (это тангенс 30 градусов), начальную объёмную пластическую деформацию **0,002**, размер влажной поверхности текучести **1** и коэффициент напряжения течения **1**.
4. Выберите **Suboptions** → **Clay Hardening** и укажите предел текучести в зависимости от объёмной пластической деформации в соответствии с данными таблицы W1-1, а затем нажмите **OK** в диалоговых окнах **Suboptions Editor** и **Edit Material**.
5. Отредактируйте Section-1 так, чтобы он относился к материалу Clay.
6. Выключите граничные условия BC-4, BC-5 и BC-6.
7. Приложите нагрузку давления величиной 30×10^6 Па из Step-1 к трём граням куба, к которым не применены граничные условия смещения.

8. Приложите начальное гидростатическое сжимающее напряжение 30 МПа, которое уравновесит приложенную нагрузку следующим образом:
 - a. В дереве модели дважды щёлкните **Predefined Fields**.
 - b. В диалоговом окне **Создание предопределенного поля** выберите **Initial** в качестве шага, **Mechanical** в качестве категории и **Stress** в качестве типа. Нажмите кнопку **Продолжить**.
 - c. Выберите весь экземпляр детали на видовом экране в качестве области, к которой нужно применить начальное условие.
 - d. В редакторе предопределенных полей введите **-30e6** для каждого из компонентов прямого напряжения и **0** для каждого из компонентов сдвигового напряжения.
 - e. Нажмите **ОК**.
 9. Создайте общий статический шаг с именем **Step-2**. В редакторе шагов выберите вкладку **Incrementation**. Измените размер начального приращения на **0,025**. Аналогично создайте **Step -3** с начальным размером инкремента **0,025**.
 10. Возобновите **BC-4** и переместите его на **Step-2**. На **Step-2** примените одноосное сжатие относительно начального состояния, задав равномерное смещение **0,05** для смещения вдоль X-направления. На **Step-3** измените граничное условие так, чтобы оно имело предписанное смещение **0,05**, что приведёт к одноосному растяжению куба.
 11. Создайте задание с именем **Case_4** и отправьте его на анализ. После завершения задания просмотрите результаты.
- Вопрос W1-11:** Нарисуйте начальную поверхность текучести на меридиональной плоскости.
- Вопрос W1-12:** Постройте график зависимости компонента прямого напряжения S_{11} от времени анализа. Сравните поведение при растяжении и сжатии с эквивалентной моделью Cap.

Примечание: для вашего удобства доступен скрипт, который создает полные модели, описанные в этих инструкциях. Запустите этот скрипт, если у вас возникнут трудности при выполнении описанных здесь инструкций или если вы хотите проверить свою работу. Скрипт называется `ws_geotech_geomaterials_answer.py` и доступна с помощью утилиты `Abaqus fetch`.

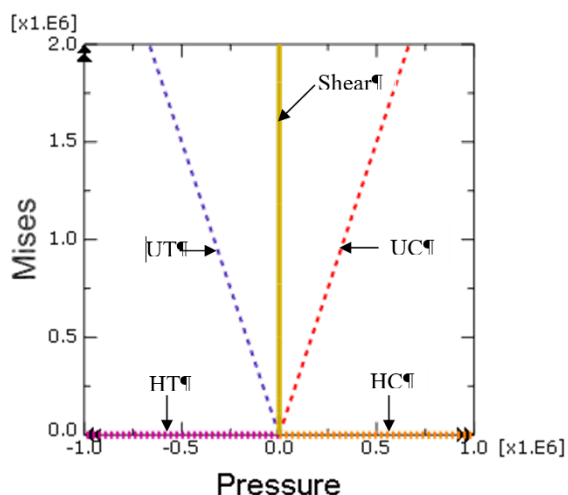
Ответы

- Вопрос W1-1:** Постройте расположение точек напряжения для одноосного растяжения, одноосного сжатия, гидростатического растяжения, гидростатического сжатия и чистого сдвига на меридиональной плоскости (давление p vs. напряжение Мизеса q).

Ответ: График зависимости давления p от напряжения Мизеса, q , может быть получен для представительной задачи следующим образом:

1. В дереве результатов разверните контейнер **History Output** под выходной базой данных с именем **Case_2_uni_CMP_TN.odb**.
2. В списке доступных исторических данных нажмите кнопку мыши $\mathbb{3}$ на переменной Mises stress (**SINV: MISES**). В появившемся меню выберите Сохранить как и назовите данные **X-Y Mises**.
3. Аналогично выберите переменную давления (**SINV: PRESS**). Сохраните данные X-Y в формате **Press**.
4. В дереве результатов дважды щёлкните **XYData**.
5. В диалоговом окне **Создание данных XY** в качестве источника выберите **Операция над данными XY** и нажмите кнопку **Продолжить**.
6. В диалоговом окне **Operate on XY Data** выберите **combine(X,X)** из списка операторов. Выберите Press и нажмите **Add to Expression**. Повторите эти действия для **Мизеса**. Окончательное выражение выглядит следующим образом: **объединить ("Пресс", "Мизес")**
7. Нажмите **Сохранить как**, чтобы сохранить данные зависимости Мизеса от давления для этой модели.

Повторите эту процедуру для всех пяти напряженных состояний. Постройте все пять кривых Mises vs. Pressure на одном графике X-Y (разверните контейнер **XYData**, выберите кривые и нажмите кнопку мыши $\mathbb{3}$; в появившемся меню выберите **Plot**). Настройте график (дважды щёлкните компоненты графика в области просмотра или используйте **Options** → **XY Options** → ...).



Вопрос W1-2: Выведите зависимость между давлением и напряжением Мизеса для одноосного растяжения. Сравните с графиком в меридиональной плоскости.

Ответ: Для одноосного растяжения мы имеем $\sigma_{11} = \sigma_t$ и все остальные компоненты напряжения равны нулю.
Давление

$$p = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3 = \sigma_t / 3$$

Девiatorный компонент напряжения

$$p = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3 = \sigma_t / 3$$

$$S_{22} = p$$

$$S_{33} = p$$

Все остальные компоненты девиаторного напряжения равны нулю.

$$\text{Напряжение Мизеса} = \left\{ \frac{3}{2} \mathbf{S}:\mathbf{S} \right\}^{0.5} = \sigma$$

Таким образом, для одноосного растяжения напряжение Мизеса связано с давлением в 3 раза. График в меридиональной плоскости согласуется с этой зависимостью.

Вопрос W1-3: Для этапа 1 нарисуйте поверхность текучести в меридиональной плоскости и постройте историю напряжений вдоль направления нагрузки. Подтвердите, что напряжение находится в равновесии с внешней нагрузкой.

Ответ: Напряжение Мизеса, q , имеет ту же величину, что и прямое напряжение σ_{11} , но оно всегда положительно, т.е. $q = |\sigma_{11}|$.

Если мы приложим внешнее давление 25 МПа к грани вдоль глобального направления X, то получим, что $\sigma_{11} = 25$ МПа. Поскольку это состояние напряжения является одноосным сжатием, мы имеем Мизеса, q , как 25 МПа, и давление, p , как $25/3$, то есть 8,333 МПа.

Предел текучести при сжатии, σ_c , составляет 30 МПа (то же значение, что и в исходном варианте). Предел текучести при растяжении, σ_t , имеет меньшее значение, чем предел текучести при сжатии. Предел текучести при растяжении, σ_t , связан с пределом текучести при сжатии, σ_c , следующим образом:

$$\text{Мы имеем критерий текучести в виде: } F = q - p \tan d = 0$$

Для одноосного растяжения $q = \sigma$ и давление $p = \sigma / 3$.

Для одноосного сжатия $q = \sigma$ и давление $p = \sigma / 3$.

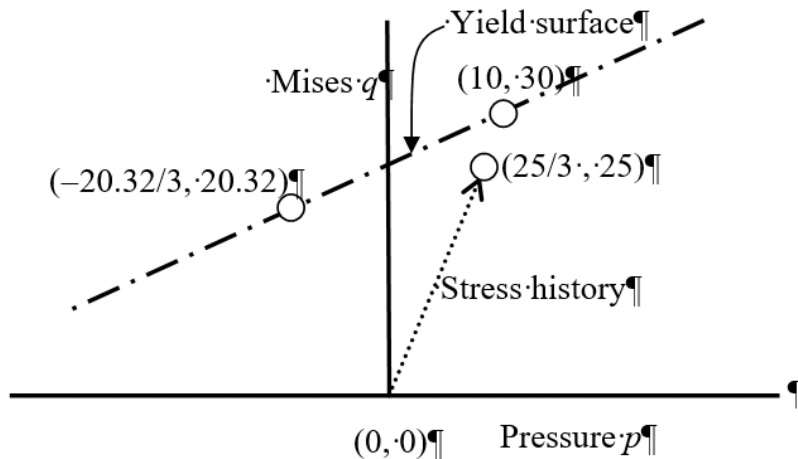
Подставляя эти значения в выражение для F и исключая d , получаем,

$$\sigma = \sigma_c \left\{ \frac{(1 + \tan \alpha)/3}{(1 + (\tan \alpha)/3)} \right\}.$$

Таким образом, для $\sigma_c = 30$ МПа и $\alpha = 30$ градусов,

получаем, $\sigma = 20,32$ МПа.

Поверхность текучести и история напряжений для этапа 1 могут быть изображены следующим образом:



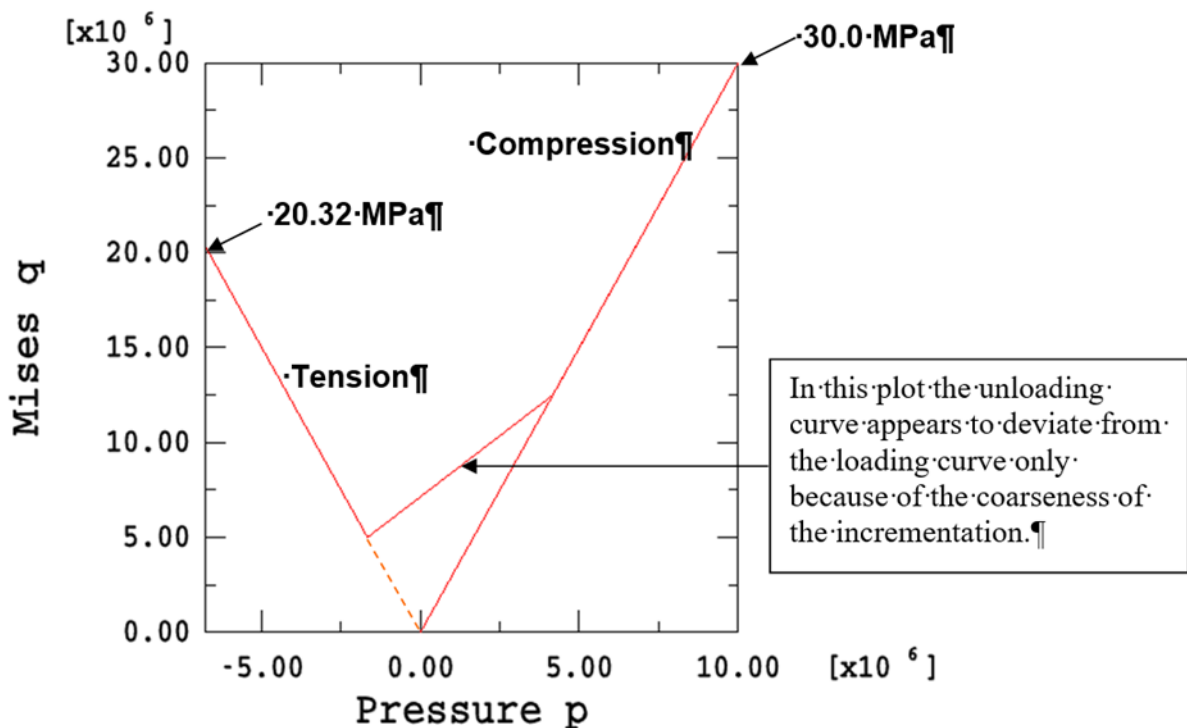
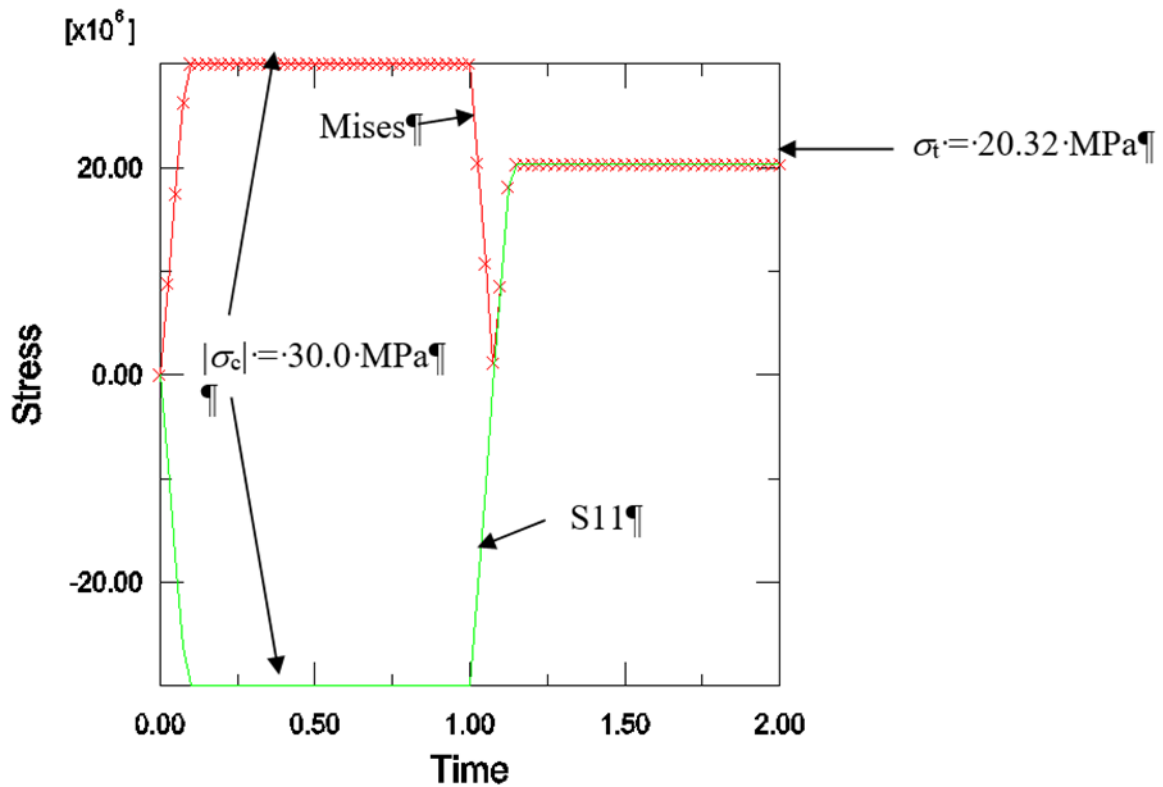
Вопрос W1-4: Почему задание не выполнено на этапе 2?

Ответ: Анализ терпит неудачу с численной сингулярностью, поскольку приложенная нагрузка больше предельного (или разрушающего) предела текучести при сжатии.

Вопрос W1-5: Постройте историю прямого напряжения (S11), напряжения Мизеса (q) и местоположение напряжения на меридиональной плоскости. Деформируется ли материал при правильном пределе текучести при растяжении и сжатии?

Ответ: Да, материал разрушается при ожидаемых значениях напряжения при сжатии и растяжении. Предел текучести при сжатии составляет 30 МПа, а предел текучести при растяжении - 20,32 МПа, как обсуждалось в ответе на вопрос W1-3.

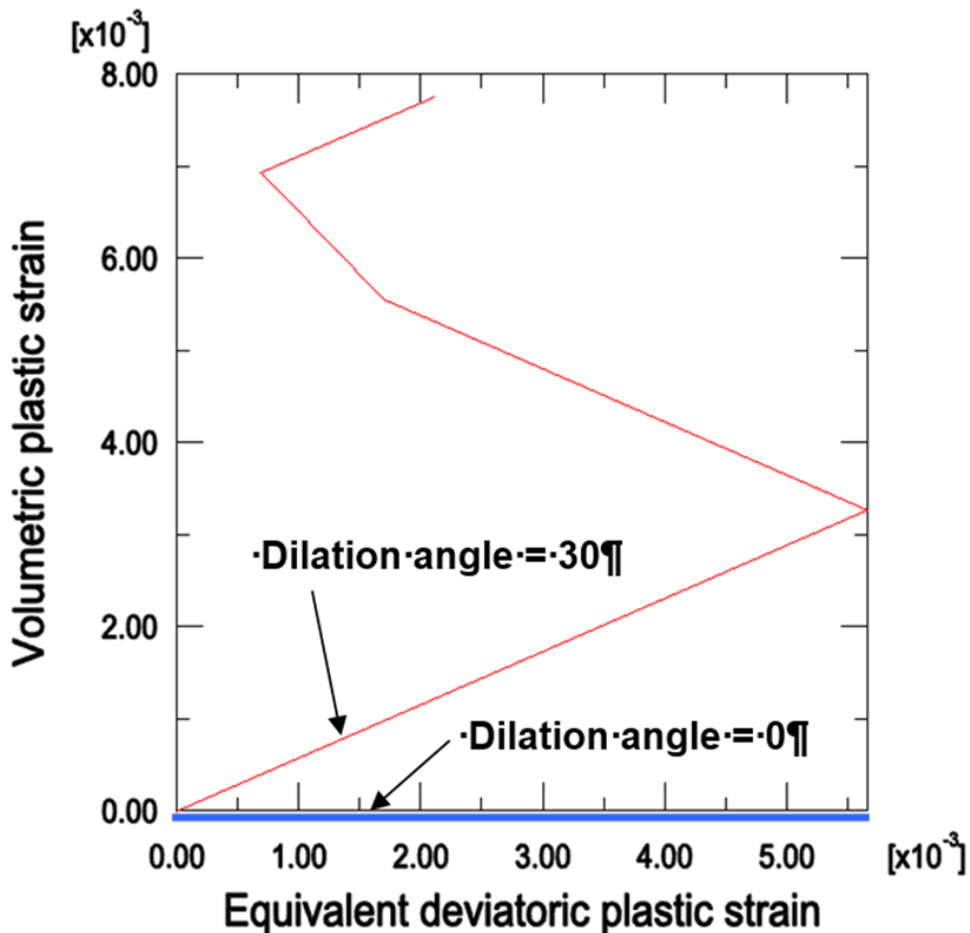
Далее следуют исторические графики прямого напряжения (S11), напряжения Мизеса (q) и локуса напряжения на меридиональной плоскости:



Вопрос W1-6: Сравните эти результаты пластической деформации с результатами анализа материала Друкера-Прагера с нулевым углом расширения. Вам нужно будет повторно запустить анализ после изменения значения угла расширения. Что вы наблюдаете?

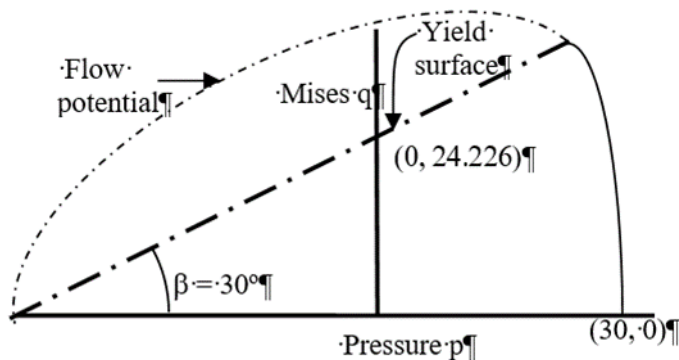
Ответ: Объёмная деформация равна нулю, когда угол расширения равен нулю; т.е. материал несжимаем. Для предотвращения блокировки могут потребоваться гибридные элементы.

Наклон линии на графике зависимости эквивалентной девиаторной пластической деформации от объёмной пластической деформации является тангенсом угла расширения. Модель Друкера-Прагера предсказывает непрерывное расширение, независимо от способа деформации. На практике материалы демонстрируют ограниченное количество дилатации.



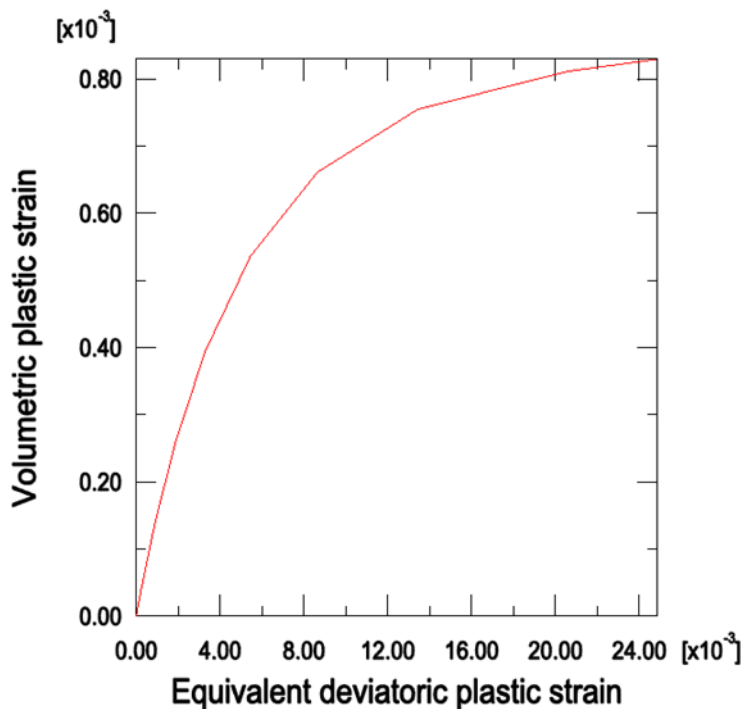
Вопрос W1-7: Нарисуйте начальную поверхность текучести и потенциал потока на меридиональной плоскости.

Ответ:



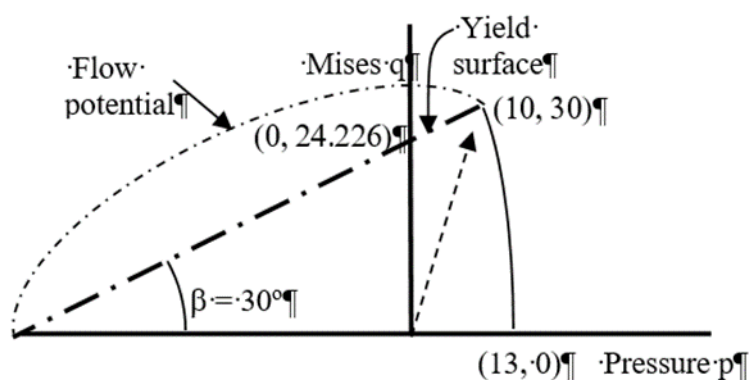
Вопрос W1-8: Постройте график эквивалентной девиаторной пластической деформации как функцию объёмной пластической деформации. (Используйте скрипт Python `ws_geotech_dev_tensor.py`, как описано ранее.) Сравните результат с поведением, полученным с помощью модели Друкера-Прагера в вопросе W1-6, и объясните поведение модели Кэпа.

Ответ: Модель Кэпа имеет ограничение на величину расширения. Модель Друкера-Прагера не имеет предела расширения.



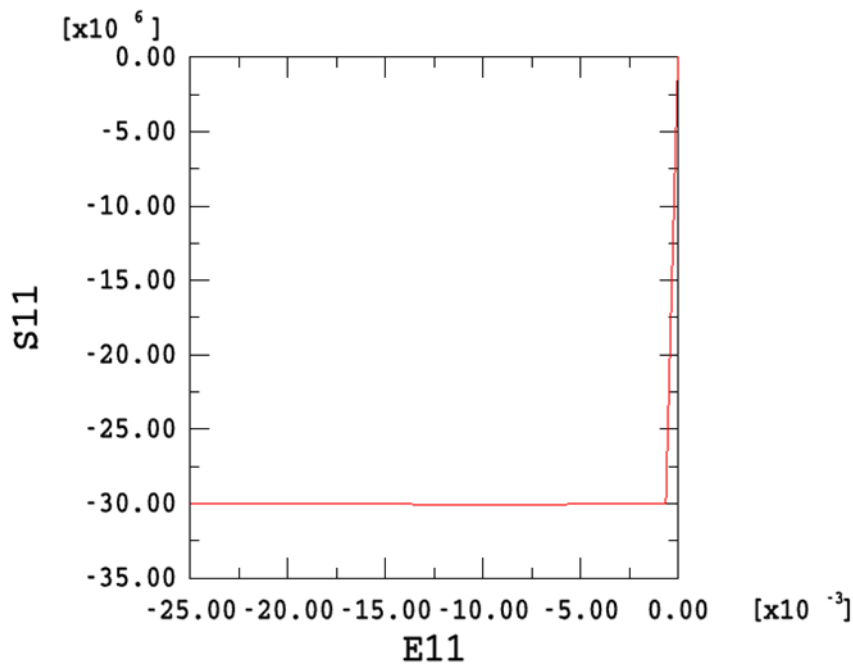
Вопрос W1-9: Нарисуйте обновлённый потенциал потока на меридиональной плоскости.

Ответ:



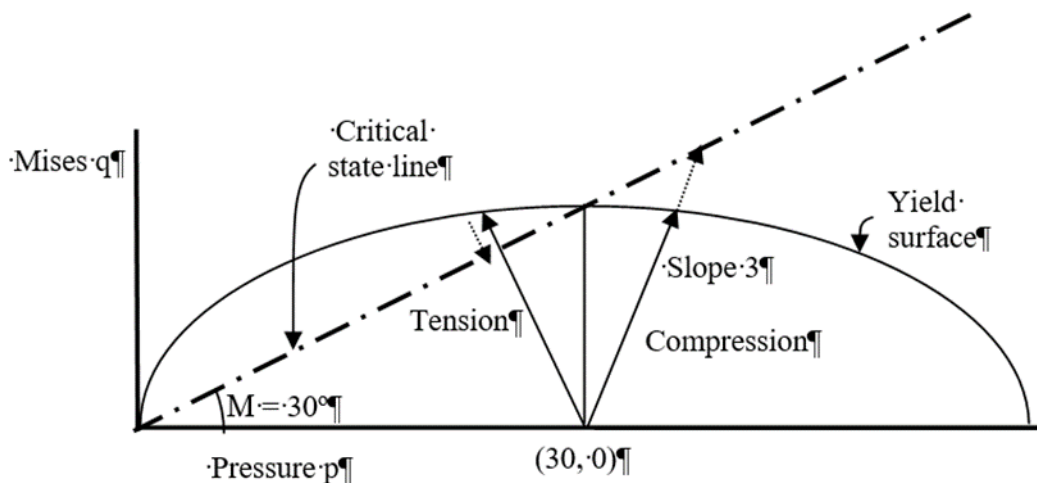
Вопрос W1-10: Постройте график зависимости компонента напряжения S_{11} от компонента деформации E_{11} . Объясните реакцию.

Ответ: Растяжение на поверхности сдвига приводит к идеальной пластической реакции, т.е. поверхность сдвига является поверхностью разрушения.



Вопрос W1-11: Нарисуйте начальную поверхность текучести на меридиональной плоскости.

Ответ:

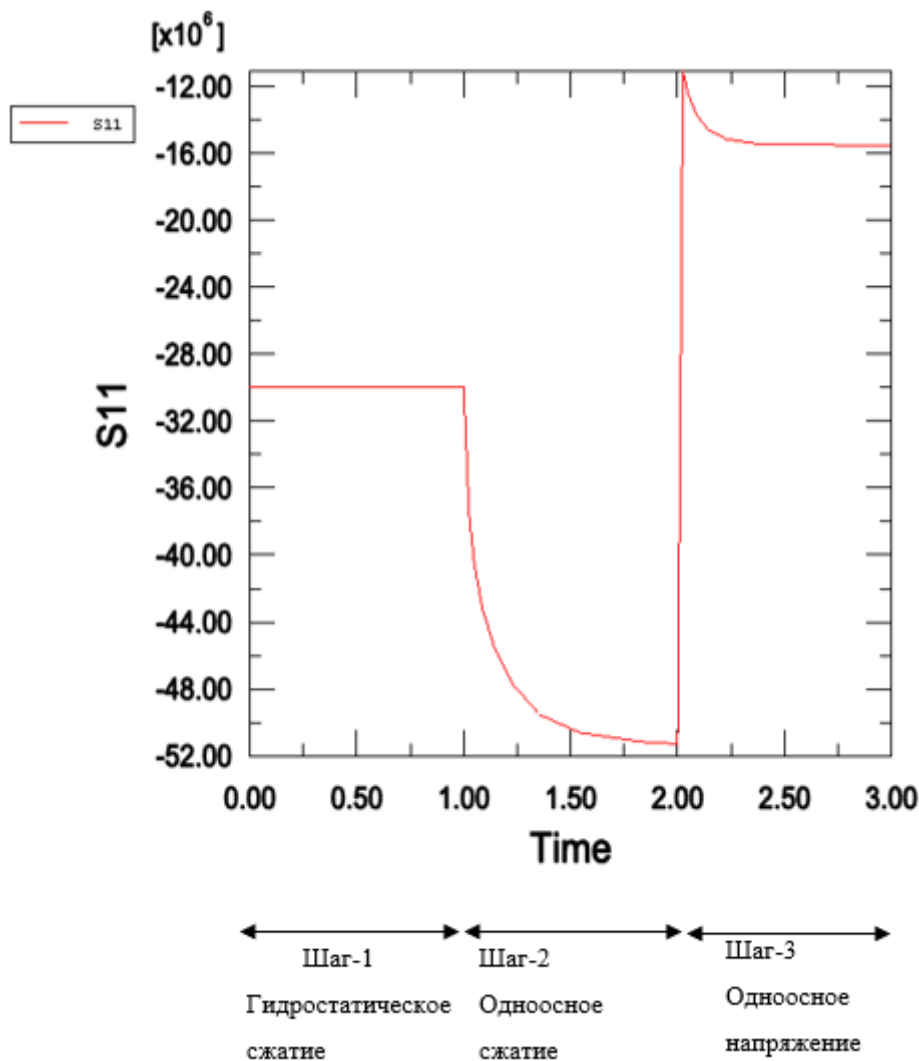


Вопрос W1-12: Постройте график зависимости компонента прямого напряжения S_{11} от времени анализа. Сравните поведение при растяжении и сжатии с эквивалентной моделью Cap.

Ответ: В модели Clay текучесть приводит к размягчению на сухой стороне, а упрочнение происходит на влажной стороне. Состояние разрушения наступает, когда напряжение достигает линии критического состояния.

Модель Clay демонстрирует размягчение при разрушении на растяжение и затвердевание при разрушении на сжатие. Модель Cap, однако, предсказывает идеальное пластическое разрушение на поверхности разрушения.

Если поверхность разрушения при сдвиге модели Cap совпадает с линией критического состояния этой модели Clay, то модель Cap предскажет разрушение без размягчения при относительном одноосном растягивающем напряжении 14,53 МПа (предел растяжения на рисунке выше, то есть при $S_{11} = 15,47$ МПа). В случае сжатия он разрушится без упрочнения при относительном одноосном сжимающем напряжении 21,45 МПа (предел сжатия на рисунке выше, то есть при $S_{11} = 51,45$ МПа).



Семинар 2 - Анализ потока поровых жидкостей: Консолидация Введение

После прохождения этого семинара вы сможете:

Моделировать поток поровой жидкости в полностью насыщенных средах.

Указывать начальные условия, которые уравнивают нагрузку.

Использовать Abaqus/CAE для построения простых моделей потока поровой жидкости.

На этом семинаре вы проведёте анализ консолидации на полностью насыщенной модели. Эта задача иллюстрирует, как анализ консолидации

может быть выполнен в Abaqus с помощью доступной возможности анализа диффузии напряжений.

Основные понятия консолидации.

Пористая среда представляет собой твёрдый скелет, пронизанный сложной системой каналов и трещин (Рис. 9.1. 1, 9.2). Также её можно рассматривать как множество твёрдых частиц (зёрен) тесно прилегающих друг к другу (Рис. 9.1. 9.3, 9.4).

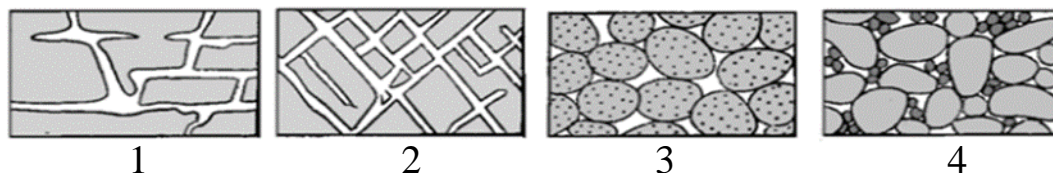


Рис. 9.1. Примеры пористых сред.

1 – поровое пространство трещиноватого известняка, частично расширенное растворением;

2 – порода, ставшая пористой вследствие возникновения трещин;

3 – хорошо отсортированный песок с высокой пористостью;

4 – плохо отсортированный песок с низкой пористостью.

В большинстве случаев пористые среды обладают нерегулярной внутренней структурой. Данное обстоятельство затрудняет подробное описание фильтрационных течений прямыми методами гидродинамики, предполагающими решение уравнений движения вязкой жидкости в области порового пространства. Эффективным оказывается подход, при котором пористый скелет и заполняющая его жидкость рассматриваются как сплошная среда. Основные характеристики такой среды (давление, плотность, скорость) в каждой точке пространства определяются осреднением по некоторой области, содержащей эту точку. Размеры области осреднения при этом должны быть значительно меньше характерных размеров пористого пласта с одной стороны и достаточно велики по сравнению с размерами пор.

Характеристики пористой среды

Пористость.

Одной из основных характеристик выделенной области пористой среды является пористость – отношение объёма области, занятого порами, к её общему объёму. Таким образом, если в объёме V пористого материала на поры приходится объём V_n , то пористость такого материала составит

$$m = \frac{V_n}{V}.$$

Пористость ограничивает количество жидкости, насыщающей пористую среду. В неоднородной среде пористость в данной точке $M(x, y, z)$ пространства определяется пределом:

$$m(M) = \lim \frac{\Delta V_n}{\Delta V} = \frac{dV_n}{dV}$$

Пористость – безразмерная величина со значениями в интервале $0 < m < 1$, характеризующая форму и взаимное расположение зёрен (пор) и потому одинаковая для геометрически подобных сред. Пористость почв лежит в диапазоне 0.3–0.7. Для более полного описания пористой среды необходимо также указывать характерный размер порового пространства – средний размер порового канала или зерна пористого скелета.

Выделяют полную и активную (эффективную) пористости. В определении полной пористости учитываются все без исключения поры в среде. Однако во многих пористых материалах существуют изолированные поры, не связанные с остальными. Такие поры не задействованы в движении жидкости. Поэтому целесообразным оказывается введение активной пористости, в определении которой учитываются только поры связанные между собой.

Просветность.

Наряду с пористостью выделяют такую характеристику пористых сред, как просветность или поверхностная пористость. Для её определения через произвольную точку пористой среды в некотором направлении проводится сечение плоскостью.

Площадь полученного сечения S , а площадь его части приходящейся на поры – S_n . Отношение площади пор к общей площади сечения называется просветностью:

$$n = \frac{S_n}{S}$$

Для неоднородных сред значение просветности в данной точке $M(x, y, z)$ пространства определяется:

$$(M, n) = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta S_n}{\Delta S} = \frac{dS_n}{dS}$$

где n – вектор нормали к плоскости сечения.

Просветность существенно зависит от направления сечения. Однако во многих пористых средах осреднённое значение просветности (для сечений по различным направлениям) совпадает с пористостью, то есть $m \approx n$. Это свойство лежит в основе одного из методов измерения пористости.

Удельная поверхность порового пространства

Удельная поверхность порового пространства, равная отношению площади поверхности части объёма занятого порами пор $S_{\text{пор}}$ ко всему объёму V :

$$\Sigma = S_{\text{пор}} / V$$

В отличие от просветности и пористости, удельная поверхность порового пространства – величина размерная.

Процесс фильтрационной консолидации в узком смысле означает деформации пористой среды под воздействием сжимающей поверхностной нагрузки вследствие выдавливания насыщающей жидкости из пор. В широком смысле – это разнообразные технологические воздействия в химических производствах, в строительстве и добыче полезных ископаемых, сопровождающиеся процессами деформации и фильтрации. Начало теории консолидации связано с работами К. Терцаги, который впервые исследовал одномерную задачу консолидации. Им сделано важное предположение о постоянстве суммарных напряжений в каждый момент времени при постоянной нагрузке (гипотеза Терцаги).

Грунты, являющиеся основаниями для строительства различных сооружений, по своим свойствам не относятся к традиционным фазовым состояниям веществ (твёрдое, жидкое, газообразное), так как состоят из множества отдельных частиц. Их прочностные и другие физико-механические свойства зависят от совокупного взаимодействия этих элементов и изменяются в широком диапазоне. Определение консолидации грунтов связано с явлением их сжимаемости под действием нагрузки. Это происходит в основном за счёт сближения твёрдых частиц друг к другу. Одновременно фильтруется вода, содержащаяся в порах грунта. Данное явление связано с тем, что в разных точках пласта поровое давление отличается. Вода стремится мигрировать в менее нагруженные зоны. Одновременно с этим происходит перестройка компоновки грунта. Процесс изменения расхода влаги с достаточной точностью описывается законом Дарси. Основными задачами, для решения которых предназначена теория консолидации грунтов, являются расчёт величины осадки грунта под воздействием нагрузки и времени, за которое она произойдёт.

Консолидация (уплотнение) грунтового слоя протекает в условиях неустановившейся фильтрации. Впервые уравнение, описывающее этот процесс при переменной пористости и проницаемости, было предложено русским учёным-гидравликом Н. Н. Павловским. Решение частной одномерной задачи в 1925 г. сделал австрийский геолог Карл Терцаги. В 30-е гг. советским грунтоведом Н. М. Герсевановым была разработана система уравнений в неполном виде для решения пространственной задачи. Дальнейшее развитие теория фильтрационной консолидации грунтов получила в трудах российского учёного В. А. Флорина. Его идеи и расчёты стали основой современной механики грунтов. Трёхкомпонентная модель, предложенная Флориным, была в последующем использована в трудах Ю. К. Зарецкого, Л. В. Горелика, М. Ю. Абелева, П. Л. Иванова и других учёных. Разработанные ими методики применяют при проектировании гидротехнических сооружений.

Разновидности консолидации.

Различают следующие типы консолидации грунтов: Естественная, обусловленная давлением вышележащих слоёв. По истечении определённого промежутка времени она заканчивается. Возникающие при этом напряжения называют историческими. Если в данный момент текущие напряжения в грунте совпадают с историческими, то говорят, что он нормально уплотнённый. В том случае, когда значение первых меньше, грунт является переуплотнённым (такое наблюдается при снижении нагрузки, например, при таянии ледника).

Первичная, происходящая за счёт миграции воды в порах при уменьшении их объёма под воздействием нагрузки. Величину консолидации определяют по графикам, приведённым ниже (при степени консолидации, находящейся в пределах 0-100%).

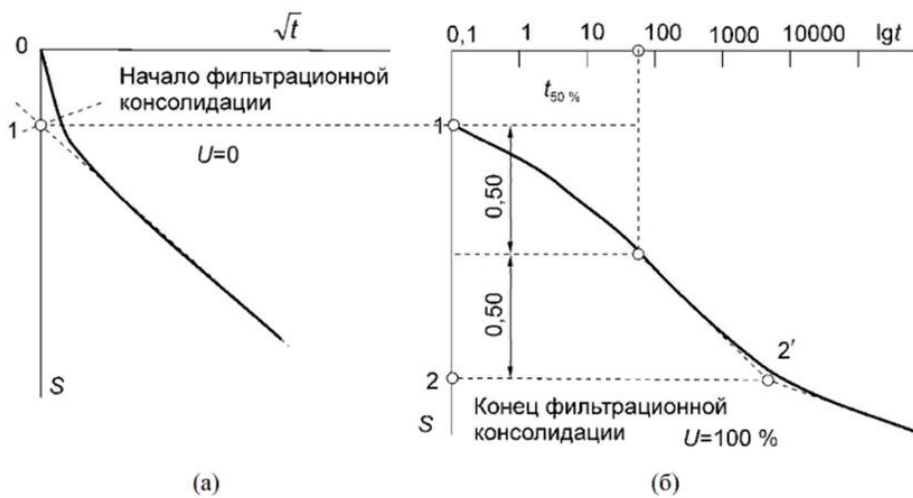


Рис. 9.2. Определение начала и завершения первичной консолидации

Вторичная. Уплотнение продолжается в результате ползучести твёрдых частиц (или скелета) грунта, которая не учитывалась в предыдущем случае. Для определения осадки рассчитывают коэффициент консолидации грунта вторичного процесса. Явление консолидации отличается от простого сжатия тем, что во втором случае не происходит изменения объёма воды. Схематично разница между этими двумя процессами представлена на рисунке 9.3.

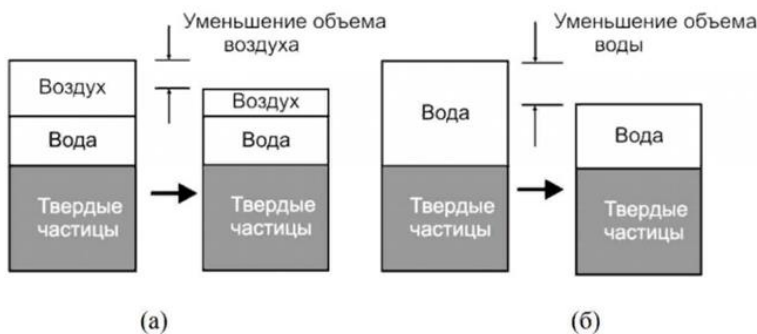


Рис. 9.3. Сжатие (а) и консолидация (б) грунта

Основными характеристиками грунта, влияющими на скорость осадки, являются: способность пропускать воду под давлением (водопроницаемость); структура (свойства частиц, из которых он состоит); давление, создаваемое жидкостью на стенки пор; способность скелета деформироваться с течением времени под воздействием нагрузки; сжимаемость минеральных частиц, воды и воздуха в порах грунта; схема нагружения; геологическое строение; преобладание той или иной фазы, наличие воздуха снижает коэффициент консолидации и скорость выравнивания избыточного порового давления. Существует несколько расчётных моделей с различными допущениями, позволяющими упростить определение необходимых показателей. Наиболее распространённой теорией является фильтрационная, согласно которой грунт полностью насыщен водой (основные ее допущения указаны выше). Такая модель находит применение для расчёта слабых глинистых грунтов, уплотняемых на большой площади. Точность расчёта и прогноза зависит от того, насколько близкими к реальности удаётся получить свойства грунтов. На консолидацию грунта влияют и такие труднопредсказуемые изменения, как утечки из водоподводящих или отводящих коммуникаций, изменение дренажа на прилегающей территории и другие процессы.

Особенности песчаных и глинистых грунтов.

В песчаных грунтах с высокой водонасыщенностью отжатие воды из пор протекает быстрее (соответственно выше коэффициент консолидации грунта), так как промежутки между твёрдыми частицами являются достаточно большими. Сдвиговые деформации в песчаных и обломочных породах возникают в результате взаимного смещения частиц и разрушения контактов между ними.

В глинах объёмная деформация вызывает плотную переупаковку частиц, окружённых жидкостной оболочкой. Скорость консолидации определяется в основном типом структурных связей и величиной нагрузки. Наличие водноколлоидных связей обуславливает упругость глинистых грунтов – их способность к восстановлению после устранения нагрузки. Упрочнение после уплотнения связано с тем, что происходит возобновление этих связей, если внутреннее напряжение не превышало структурную прочность. Так как поры в глинистых грунтах значительно меньше, то консолидация происходит медленнее. Наиболее сложными для прогнозирования являются структурно-неустойчивые грунты, у которых деформация происходит под влиянием дополнительных внешних факторов – оттаивания мёрзлых почв, разложения органики в торфах и заторфованных грунтах, обводнения лёсса, роста засоленности. Так, у торфа фильтрационная консолидация затухает быстро, а осадка продолжается в течение длительного периода времени.

Основное уравнение консолидации.

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{s + \mu \cdot n'}{p_1 + p} (1 + e) \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = (1 + e) \cdot \left[\frac{\partial}{\partial x} k_x \cdot \left(\frac{\partial H}{\partial x} - i_0 \right) + \frac{\partial}{\partial z} k_z \cdot \left(\frac{\partial H}{\partial z} - i_0 \right) \right]$$

где n' – содержание жидкости в единице объёма грунта; t – текущий период времени; s – поверхностная пористость; p – избыточное давление в поровой воде, появляющееся за счёт консолидации; p_1 – начальное давление до процесса консолидации; μ – коэффициент растворимости газа; e – коэффициент пористости; x и z – координаты для решения плоской задачи (для элементарного объёма грунта $dx \times dz \times 1$); k_x , k_z – коэффициенты фильтрации через левую и правую грань элементарного кубического объёма; H – величина напора; i_0 – начальный градиент напора.

Основной целью расчётов по теории фильтрационной консолидации является определение величины осадки грунта под воздействием сплошной нагрузки и времени, в течение которого она происходит. Для этого используются два метода вычислений – линейные и нелинейные (для ответственных сооружений). Коэффициент фильтрации, участвующий в расчётах, представляет собой скорость фильтрации воды в грунте при гидравлическом градиенте (уклоне). Его определяют одним из 3 способов – полевым испытанием (откачкой или наливом), в лабораторных условиях, косвенным методом (по данным механических анализов и пористости).

В инженерной практике строительных сооружений применяют разные виды расчётов по сложности. Основное уравнение консолидации приводится к определённом виду в зависимости от условий и поставленных задач.

Главными параметрами, описывающими напряженное состояние грунта, являются: Коэффициент консолидации, характеризующий скорость уплотнения.

$$C_v = \frac{k_\phi}{m_v \cdot \gamma_\omega}$$

k_ϕ – коэффициент фильтрации; m_v – коэффициент относительной сжимаемости; γ_ω – удельный вес воды; c_v – коэффициент консолидации.

Степень консолидации грунта. Это понятие используется для определения осадки с момента начала нагружения до любого промежутка времени.

$$U_{sp} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-N} = \frac{S_t}{S}$$

U_{sp} – степень консолидации грунта; S – осадка в начальный момент времени; S_t – осадка в текущий момент времени; N – const.

Период первичной консолидации.

$$t = \frac{4 \cdot h^2}{\pi^2 \cdot c_v} \cdot N$$

Влияние анизотропии.

При сооружении объектов на макропористых лёссовых грунтах в расчёты вводят поправочный коэффициент на анизотропию, так как изотропный способ решения даёт заниженные показатели скорости консолидации. Коэффициент анизотропии рассчитывают по формуле.

$$\alpha = n_f \cdot \sqrt{\frac{2}{n_f^2 + 1}}$$

где n_f – степень фильтрационной анизотропии.

Полученное значение позволяет принять решение о проведении дополнительных защитных и предупредительных мероприятий по укреплению фундамента сооружений: общее водопонижение; проектирование поверхностного стока воды; борьба с утечками воды и другие.

Задача консолидации Терцаги

Одной из классических задач пороупругости, для которых известно аналитическое решение, является классическая одномерная задача консолидации Терцаги [Terzaghi1996]. Рассмотрим насыщенную пороупругую область с линейными размерами L_x , L_y , L_z . Верхняя граница резервуара имеет координату $z = 0$, нижняя – $z = L_z$. Нижняя и боковые границы являются непротекаемыми, при этом нижняя стенка закреплена, а боковые стенки могут деформироваться только в вертикальном направлении. Верхняя граница является проницаемой, к ней прикладывается сжимающее напряжение величиной $T_z = -\sigma_0$, что приводит к деформации пороупругой среды. В такой постановке задача является одномерной, решение, которое не зависит от x и y . Схематично постановка задачи представлена на рис. 9.4.

Процесс фильтрационной консолидации в узком смысле означает деформации пористой среды под воздействием сжимающей поверхностной нагрузки вследствие выдавливания насыщающей жидкости из пор. В широком смысле – это разнообразные технологические воздействия в химических производствах, в строительстве и добыче полезных ископаемых, сопровождающиеся процессами деформации и фильтрации. Начало теории консолидации связано с работами К. Терцаги, который впервые исследовал одномерную задачу консолидации. Им сделано важное

предположение о постоянстве суммарных напряжений в каждый момент времени при постоянной нагрузке (гипотеза Терцаги).

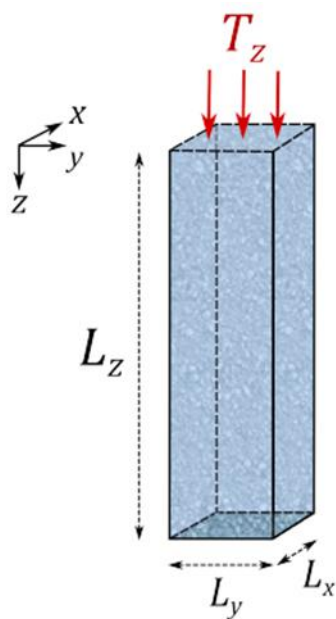


Рис. 9.4. Схематическое представление задачи Терцаги.

Одномерная задача консолидации Терцаги будет моделироваться с помощью двумерных элементов плоской деформации. В этой задаче тело грунта ограничено непроницаемыми, гладкими, жёсткими стенками на всей поверхности, кроме верхней, где возможен идеальный дренаж. В начале анализа на верхнюю поверхность тела резко прикладывается нагрузка. Мы хотим предсказать реакцию грунта как функцию времени после приложения нагрузки. Гравитацией пренебрегаем. Эта задача похожа на "Проблему консолидации Терцаги", раздел 1.15.1 руководства Abaqus Benchmarks Guide.

Столб грунта, представленный в модели, имеет ширину 50 м и высоту 100 м. Грунт считается упругим с модулем упругости $1,0 \times 10^8$ Па, коэффициентом Пуассона 0,3 и проницаемостью 0,002 м/с. Начальное пространственно постоянное значение коэффициента пористости равно 1,1. Грунт считается полностью насыщенным. Модель имеет сетку из 10 элементов по высоте и 1 элемента по ширине. Геометрическая конфигурация модели показана на рисунке W2-1.

Предварительная подготовка

Введите рабочий каталог для этого семинара:

```
../geotechnical/interactive/consolidate
```

Запустите сценарий `ws_geotech_consolidate.py` с помощью следующей команды:

```
abaqus cae startup=ws_geotech_consolidate.py
```

Приведённая выше команда создаёт базу данных Abaqus/CAE с именем `consolidate.cae` в текущем каталоге. Геометрия модели, свойства материала

и граничные условия смещения уже созданы в базе данных в модели с именем **consolidate**.



Рисунок W2-1: Геометрическая конфигурация образца для консолидации.

В модели **consolidate** не заданы граничные условия порового давления на внешних границах грунта. Это естественное граничное условие с нулевым потоком поровой жидкости, которое представляет собой не дренированное состояние. Приложение внешней нагрузки приведёт к увеличению порового давления в модели. Вы смоделируете это явление на первом этапе анализа консолидации, где вы приложите нагрузку давления на верхнюю поверхность модели и не допустите дренажа поровой жидкости по всей границе модели. На втором этапе анализа вы будете поддерживать нагрузку давления, полученную на первом этапе, и обеспечите дренаж поровой жидкости по всей верхней поверхности модели.

Начальный коэффициент пористости

В этом разделе вы зададите в модели начальное отношение пустот 1,1 в качестве предопределенного начального поля:

1. В дереве модели дважды щёлкните **Predefined Fields**.
2. В диалоговом окне **Create Predefined Field** выберите **Initial** в качестве Step, **Other** в качестве категории и **Void ratio** в качестве типа. Нажмите кнопку **Продолжить**.
3. Выберите весь экземпляр детали на видовом экране в качестве области, к которой нужно применить начальное условие.
4. В редакторе предопределенных полей выберите **Constant** в качестве распределения высоты.
5. Введите **1,1** в качестве значения начального коэффициента пористости.
6. Нажмите **ОК**.

Нагрузка под давлением

Первый Step анализа был создан сценарием настройки. В этом разделе вы завершите определение Step, определив нагрузку давлением.

1. В дереве моделей дважды щелкните **Loads**, чтобы создать новую нагрузку.
2. Выберите **Step-1** в качестве шага определения нагрузки и Давление в качестве типа нагрузки.
3. Выберите верхнюю поверхность в модели в качестве поверхности, к которой будет приложена нагрузка, и нажмите кнопку Готово в области запроса.
4. В диалоговом окне **Edit Load** укажите величину нагрузки **100** Па и нажмите **ОК**.

Вопрос W2-1: Каким будет состояние эффективного напряжения в модели, когда к верхней поверхности модели приложена нагрузка давления 100 и предотвращён дренаж поровой жидкости?

Консолидация

В этом разделе вы создадите второй Step с общим временем шага 10. На этом шаге вы обеспечите дренаж поровой жидкости через верхнюю границу, задав соответствующие граничные условия порового давления на верхней поверхности. Также необходимо указать соответствующее значение максимального изменения порового давления, допустимого на любом шаге, которое является параметром, определяющим точность интегрирования по времени для анализа переходной консолидации.

Вопрос W2-2: Определите соответствующее значение для максимального изменения порового давления, допустимого в любом приращении.

Размер элемента и размер приращения времени связаны настолько, что приращения времени меньше определённого размера не дают полезной информации. Эта связь пространственных и временных приближений наиболее очевидна в начале решения задач диффузии, сразу после предписанных изменений граничных значений.

Вопрос W2-3: Используя пространственно-временной критерий, определите размер начального приращения времени, чтобы избежать проскакивания в начальном решении.

Значения максимально допустимого изменения порового давления и величины начального приращения времени будут указаны в качестве данных для второго этапа анализа.

1. В дереве модели дважды щелкните **Steps**, чтобы создать новый шаг. В появившемся диалоговом окне **Create Step (Создание шага)** примите **Soils** в качестве процедуры и нажмите **Continue (Продолжить)**.

2. В редакторе шагов укажите период времени 10 и выключите опцию **Включить поведение ползучести/колебаний/вязкоупругости**.
3. Выберите вкладку **Incrementation (Приращение)** и укажите размер начального приращения времени в соответствующем месте. Укажите значение параметра **Max. pore pressure change per increment**. Нажмите **ОК**.
4. В дереве модели дважды щелкните **BCs**, чтобы создать новое граничное условие.
5. В диалоговом окне **Create Boundary** выберите **Step-2** в качестве шага определения граничного условия, **Other** в качестве **Category** и **Pore pressure** в качестве типа граничного условия.
6. Выберите верхнюю поверхность модели в качестве области для нового граничного условия и нажмите кнопку **Done** в области запроса.
7. В диалоговом окне **Edit Boundary Condition** задайте поровое давление 0. Эта спецификация приведёт к постоянному нулевому поровому давлению на верхней поверхности и позволит дренаж поровой жидкости через эту границу.
8. Нажмите **ОК** в диалоговом окне **Edit Boundary Condition (Редактирование граничного условия)**.

Визуализация результатов

Определение модели завершено. В этом разделе вы проведёте анализ и изучите результаты.

В дереве моделей нажмите кнопку мыши 3 на консолидации заданий и в появившемся меню выберите **Submit (Отправить)**.

После завершения задания нажмите кнопку мыши 3 на задании **consolidate** и выберите в появившемся меню пункт **Results**. Abaqus переключится на модуль Visualization и откроет файл выходной базы данных **consolidate.odb**.

Вопрос W2-4: Постройте график порового давления и вертикального напряжения вдоль вертикальной кромки в разные моменты времени в ходе анализа.

Вопрос W2-5: Изобразите поровое давление и вертикальное напряжение как функцию времени на дне образца.

Примечание: Для вашего удобства доступен скрипт, создающий полную модель, описанную в этих инструкциях. Запустите этот скрипт, если у вас возникнут трудности при выполнении описанных здесь инструкций или если вы хотите проверить свою работу. Скрипт называется **ws_geotech_consolidate_answer.py** и доступна с помощью утилиты **Abaqus fetch**.

Ответы

Вопрос W2-1: Каким будет состояние эффективного напряжения в модели, когда на верхнюю поверхность модели приложена нагрузка давлением 100 Па и предотвращён дренаж поровой жидкости?

Ответ: Получается напряженное состояние с равномерным поровым давлением, равным внешней нагрузке по всему телу, без эффективного напряжения, передаваемого скелетом грунта. Жидкость несёт мгновенную нагрузку.

Вопрос W2-2: Определите соответствующее значение для максимального изменения порового давления, допустимого в любом приращении.

Ответ: Значение, которое на порядок меньше приложенного давления, должно обеспечивать умеренную точность.

Вопрос W2-3: Используя пространственно-временной критерий, описанный в Лекции 5, определите размер начального приращения времени, чтобы избежать проскакивания в начальном решении.

Ответ: Начальное приращение времени может быть вычислено следующим образом:

$$t \geq \{w / (6Ek)\} (h)^2$$

Имеем $h = 10$ м, $E = 108$ Па, $k = 2 \times 10^4$ м/с,
 $w = 1,0$ Н/м³. Следовательно,
 $t \geq 0,00083$ с.

Вопрос W2-4: Постройте график порового давления и вертикального напряжения вдоль вертикальной кромки в разные моменты времени в ходе анализа.

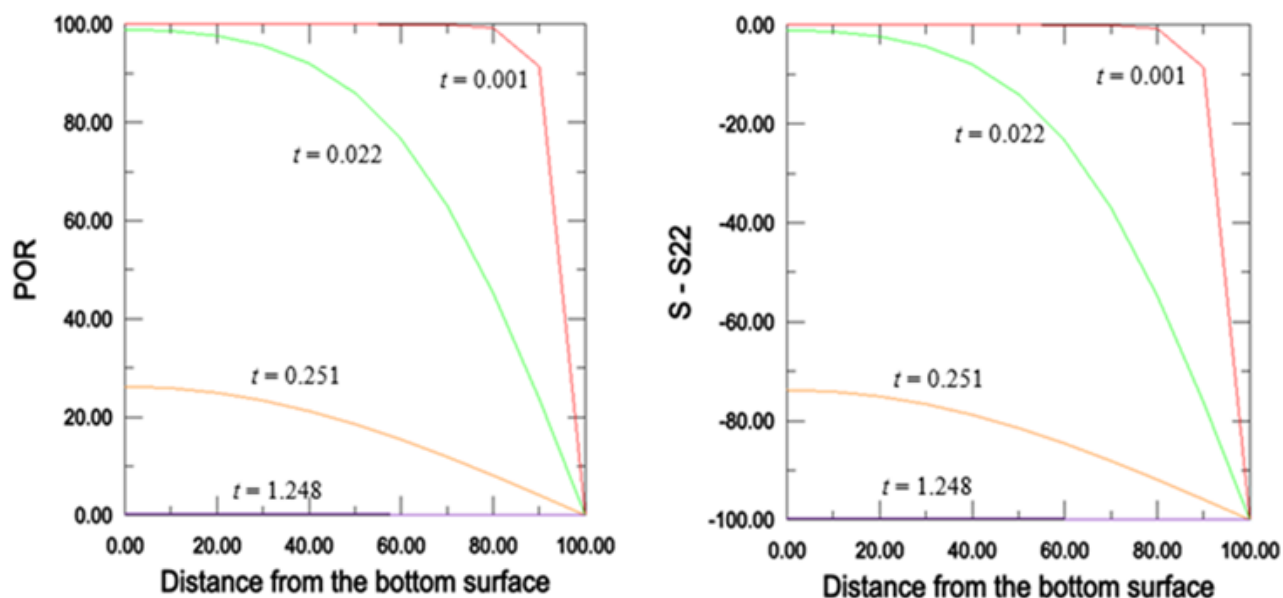
Ответ: В модуле визуализации необходимо создать путь, чтобы можно было построить результаты вдоль этого пути. Создание пути и построение результатов X-Y вдоль этого пути может быть выполнено следующим образом:

1. В дереве результатов дважды щёлкните **Paths**.
2. В диалоговом окне **Создание** контура выберите **список Edge** и нажмите кнопку **Продолжить**.
3. В диалоговом окне **Редактирование контура списка краёв** нажмите кнопку **Добавить после**.
4. В области подсказок выберите метод отбора **по кратчайшему расстоянию**.
5. В области просмотра выберите левый край нижнего элемента.

При необходимости нажмите кнопку **Flip (Перевернуть)**, чтобы начальная точка соответствовала левому нижнему узлу нижнего элемента. Нажмите кнопку Готово в области подсказок.

6. Выберите левый верхний узел верхнего элемента в качестве конечного узла.
7. Нажмите **Готово** в области запроса.
8. Метки граней перечислены в диалоговом окне **Edit Edge List Path**. Нажмите **ОК**, чтобы завершить определение контура.
9. В дереве результатов дважды щёлкните **XYData**.
10. В диалоговом окне **Создание данных XY** выберите **Путь** и нажмите кнопку **Продолжить**.
11. В диалоговом окне **XY Data from Path** выберите кадр и полевую выходную переменную, нажав **Step/Frame** и **Field Output** соответственно. Постройте и сохраните данные X-Y по напряжению (S22) и поровому давлению (POR) для нескольких кадров.
12. Разверните контейнер **XYData**.
13. Выберите имена сохранённых данных и нажмите кнопку мыши 3; в появившемся меню выберите **Plot**. Отобразится комбинированный график X-Y для выбранных кривых.

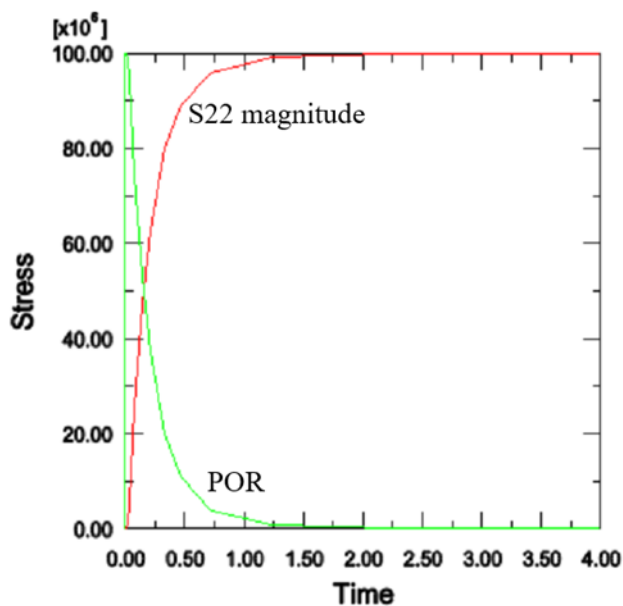
Графики показывают, что поровое давление уменьшается, а значения S22 увеличиваются с течением времени. После $t=1,25$ значения порового давления практически равны нулю.



Вопрос W2-5: Постройте график порового давления и вертикального напряжения как функцию времени на дне образца.

Ответ: Результаты порового давления и напряжения записывались в базу данных в качестве исторических данных во время

анализа. Эти данные доступны из диалогового окна **History Output (Result→ History Output)**. Чтобы построить график величины напряжения, необходимо сохранить исторические данные и выполнить над ними операцию (дважды щёлкните **XYData** и выберите **Operate on XY data** в качестве источника данных). Значения POR уменьшаются со временем по мере того, как поровая вода проникает от верхней поверхности. Значения S22 одновременно увеличиваются по величине. Следовательно, по мере консолидации нагрузка, первоначально переносимая поровой жидкостью, передаётся твёрдым зёрнам.



Семинар 3 - Анализ потоков поровых жидкостей: Фильтрация Введение

Расчётные схемы. Гидравлические элементы фильтрационного потока. Основной закон фильтрации.

Для получения количественных гидрогеологических прогнозов (расчётов) в каждом конкретном случае необходима расчётная схема, которая в деталях учитывает природные условия и главные определяющие факторы. Эти факторы должны быть представлены с учётом применения расчётных методов.

Расчётная схема определяет область движения подземных вод в естественных условиях, с учётом построенных сооружений как единую физическую область, в которой происходят изменения напоров, расходов, скоростей подземных вод, т.е. определяет начальные и граничные условия.

Построение расчётной схемы и метода расчёта производится с учётом:

- гидравлического характера водоносного горизонта, условий питания в зоне (площади) распространения и связи с атмосферой;
- фильтрационных свойств потока;

- режима фильтрационных потоков;
- геометрических очертаний водоносных горизонтов и наличия питания через боковые границы

При выполнении расчётов схематизацию гидрогеологических условий по характеру напора подразделяют на :

- безнапорные подземные воды со свободной поверхностью;
- напорные подземные воды, отделённые от атмосферы водоупорами, имеющие различные режимы и условие питания на участках водоносного горизонта;
- смешанные напорно-безнапорные воды, имеющие различные режимы и условие питания на участках водоносного горизонта.

Безнапорные подземные воды питаются атмосферными осадками, а также подземными водами из ниже расположенных водоносных горизонтов.

Напорные подземные воды изолированы от атмосферы и от соседних пластов, и получают питание от инфильтрации атмосферных осадков от удалённых областей выхода водоносных горизонтов на поверхность.

В случае системы напорных водоносных слабопроницаемых слоёв необходим учёт перетекания воды из одного горизонта в другой.

Напорно-безнапорный режим движения характерен в областях выхода напорного водоносного горизонта на поверхность или вблизи рек, водоёмов, других дренирующих элементов.

Определение режима фильтрационного потока необходимо для анализа гидрологической обстановки и разработки расчётной схемы.

Водоносные горизонты как напорные, так и безнапорные, расположенные на глубинах 300 □ 400 метров, образуют зону активного водообмена.

Режим движения подземных вод в зоне активного водообмена всегда неустановившийся, так как постоянно происходит изменение интенсивности инфильтрации атмосферных осадков, изменяются уровни во в реках, водоёмах.

При строительстве различных сооружений происходит нарушение движения подземных вод и вблизи сооружения образуется неустановившийся режим течения. Это характерно как для напорного, так и для безнапорного водоносного горизонтов.

Скорость изменения напоров, динамика отдачи воды из водоносных горизонтов в условиях неустановившегося движения определяется водонепроницаемостью и коэффициентом уровнепроводности. Для случая неучёта упругих свойств пород и воды режим фильтрации называется жёстким.

В реальных условиях границы области фильтрации и границы различных пород имеют неправильную геометрическую форму и поэтому для выполнения расчётов их заменяют на прямолинейные или круговые.

После схематизации водоносные пласты представляются в формах:

- безграничный;
- полуграничный с одной прямолинейной границей;
- с двумя параллельными прямолинейными границами;
- прямоугольник;
- круг.

Определение особенностей гидрогеологических условий и их схематизация определяют вид дифференциальных уравнений и начальных и граничных условий, по которым определяется конкретное решение задачи движения подземных вод.

Гидравлические элементы фильтрационного потока

Режим движения подземных вод зависит от характера и размера пор и пустот, которые зависят от состава горных пород.

Различают два режима движения вод – ламинарный и турбулентный.

Движение подземных вод в пористых породах протекает при ламинарном режиме, так как вода движется в отдельных слоях породы и перемешивается, скорость движения воды пропорциональна градиенту напора.

Французский гидравлик Дарси в 1856 году на основании опытов установил закон фильтрации в пористой среде.

Закон определяет связь расхода фильтрационного потока Q с площадью поперечного сечения ω и градиентом напора i :

$$Q = K \cdot \omega \cdot i$$

где K - коэффициент фильтрации.

Так как скорость потока V , проходящего через единицу площади, составляет $V = Q/\omega$, следовательно $V = K \cdot i$.

Исходя из этого определяется коэффициент фильтрации как скорость при градиенте напора $i=1$.

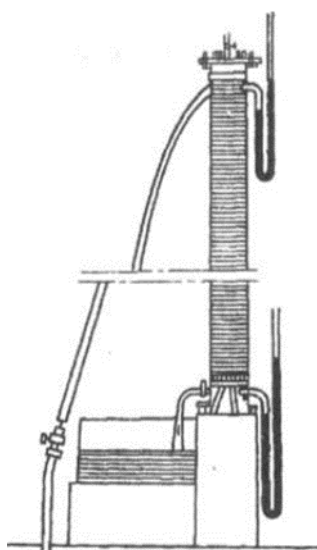


Рис. 1. Установка Анри Дарси для исследования течения воды через вертикальные песчаные фильтры

Первые экспериментальные наблюдения за движением воды в трубах, заполненных песком, произвели А. Дарси (1856 г.) и Ж. Дюпюи (1848-1863 гг.). Этими работами было положено начало теории фильтрации. Именем Дарси назван линейный закон фильтрации, который он установил, создавая первую совершенную систему водоснабжения в Европе.

Анри Дарси исследовал течение воды через вертикальные песчаные фильтры (рис. 1), которые требовались для водоснабжения города Дижона.

При расчёте фильтрационного потока с различными гидродинамическими характеристиками, применяют термин коэффициент проницаемости K_n , который связан с коэффициентом фильтрации соотношением

$$K_n = K \frac{\eta}{\gamma} = K \frac{\nu}{g}, \text{ где } \nu = \frac{\eta}{\rho}$$

η, ν – абсолютный и кинематический коэффициенты вязкости;

γ – объёмный вес,

ρ – плотность жидкости,

g – ускорение силы тяжести.

По данным ряда исследователей линейный закон фильтрации применяется с достаточной для практики точностью как для мелкозернистых и крупных песков, так и для песчано - галечных и трещиноватых пород при скоростях движения подземных вод до 1000 м/сутки.

Для случаев скоростей движения подземных вод, превышающих эти значения, применяется двухчленная формула, в которой уклон зависит от скорости фильтрационного потока:

$$i = A \cdot V + B \cdot V^2,$$

где A и B – коэффициенты, определяемые экспериментально.

При больших скоростях течения $A \cdot V$ можно пренебречь по сравнению с $B \cdot V^2$, тогда

$$Q = K_k \cdot \omega \cdot \sqrt{i}$$

здесь K_k – коэффициент турбулентной фильтрации, определённый опытами.

Критерием установки верхней границы применимости закона фильтрации Дарси является безразмерное число Рейнольдса (Re).

Коэффициент Re по определению В.Н. Щелкачёва (Н.Н. Павловского) имеет следующий вид:

$$Re = \frac{10}{n^{2,3}} \cdot \frac{V \cdot \sqrt{K_n}}{\gamma},$$

n – пористость грунта;

V – средняя скорость фильтрации;

K_n – коэффициент проницаемости;

γ – объёмный вес.

Определённое по этой формуле критическое значение составило 1-12.

В случае существования начального градиента основной закон фильтрации при ламинарном движении будет иметь следующий вид:

$$V = K \cdot (I - I_0),$$

где I_0 – начальный градиент

$$I_0 = \frac{2\tau_0}{\gamma \cdot r},$$

где τ_0 – предельное напряжение сдвигу граничного слоя жидкости;

γ - объёмный вес воды;

r – расчётный радиус порового канала.

Уравнение фильтрационного потока при жёстком режиме фильтрации

Общий вид уравнения неразрывности для пространственного фильтрационного потока имеет вид:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0,$$

где V_x, V_y, V_z – скорости фильтрационного потока.

Применим закон Дарси, значения скорости будут иметь следующий вид:

$$V_x = -K_x \frac{\partial H}{\partial x}, V_y = -K_y \frac{\partial H}{\partial y}, V_z = -K_z \frac{\partial H}{\partial z},$$

K_x, K_y, K_z – компоненты коэффициента фильтрации.

Подставив значения скоростей в общее уравнение неразрывности получим:

$$K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0.$$

Для изотропного однородного потока, когда $K_x = K_y = K_z = \text{const}$, уравнение принимает вид уравнения Лапласа.

Гидродинамическое течение может быть наглядно продемонстрировано построение гидродинамической сетки движения.

Гидродинамическая сетка состоит из системы линий равного напора и линий тока и наглядно демонстрирует структуру плоского потока и распределение гидродинамических элементов.

Полоса, заключённая между соседними линиями тока называется лентой тока. Участки ленты тока, заключённые между соседними линиями равного напора - отсеки ленты тока.

Как правило линии равного напора строятся с постоянным шагом изменения напора, то есть равномерные.

Для профильного потока ширина шага принимается равной 1м.

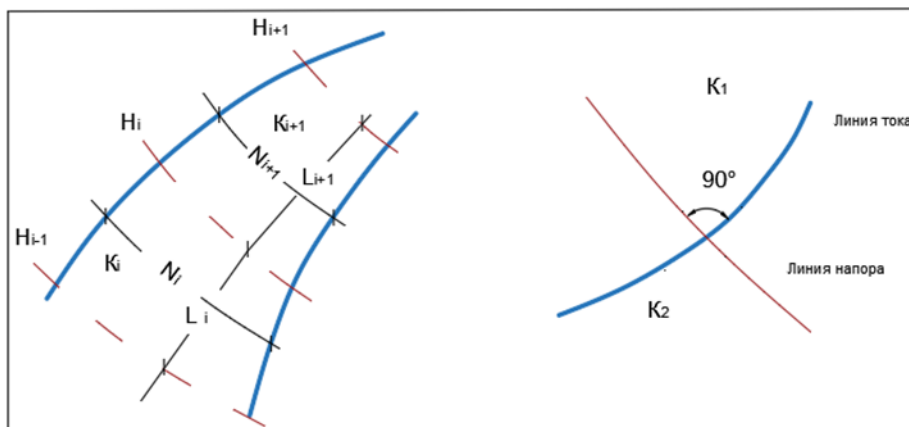


Рис. 2. Линии тока и линии равных напоров.

В изотропном потоке линии токов и линии равного напора ортогональны друг другу, также отношение длины отсека L_i ленты к его ширине N_i постоянны. Исходя из этого возможно рассмотрение различных граничных условий на различных участках потока.

После прохождения этого семинара вы сможете:

Моделировать поток поровой жидкости в задачах с частичным насыщением.

Задавать начальные условия, которые уравнивают нагрузку.

Использовать Abaqus/CAE для построения простых моделей потока поровой жидкости.

На этом семинаре вы проведёте анализ поглощения поровой жидкости на частично насыщенном образце. Эта задача иллюстрирует, как анализ поглощения поровой жидкости может быть выполнен в Abaqus с использованием доступной возможности анализа диффузии напряжений.

Мы рассматриваем одномерную задачу на впитывание, в котором поглощение жидкости происходит против гравитационной нагрузки, вызванной весом жидкости. В этой задачи жидкость подаётся на дно частично насыщенного столба материала, и материал поглощает столько жидкости, сколько позволяет вес поднимающейся жидкости. Столб материала кинематически ограничен в горизонтальном направлении, так что все деформации материала будут происходить в вертикальном направлении. В этом смысле задача является одномерной. Геометрическая конфигурация модели показана на рисунке W3-1.

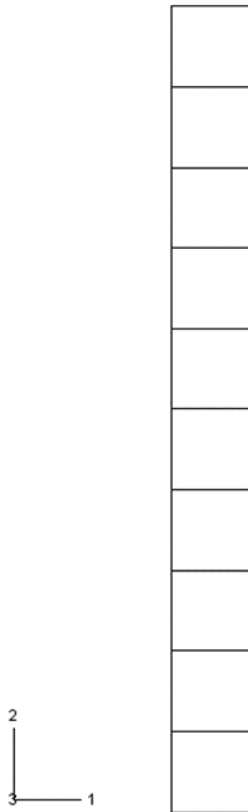


Рисунок W3-1 Геометрическая конфигурация впитывающей модели.

Предварительная подготовка

Введите рабочий каталог для этого семинара:

../geotechnical/interactive/wicking

Запустите сценарий **ws_geotech_wicking.py** с помощью следующей команды:

abaqus cae startup=ws_geotech_wicking.py

Приведённая выше команда создаёт базу данных Abaqus/CAE с именем **wicking.cae** в текущем каталоге. Геометрия модели, свойства материалов и история нагружения уже созданы в базе данных в модели с именем **wicking**.

Для данных о материале в базе данных используются единицы измерения в тоннах, метрах (м) и секундах (с), поэтому сила будет выражаться в **килоНьютонах (кН)**, а напряжение - в **килоПаскалях (кПа)**. Столб материала имеет высоту 1 м и ширину 0,1 м. Сетка состоит из 10 элементов с плоской деформацией и степенями свободы на узлах (СРЕ4Р). Для механических свойств мы предполагаем, что материал упругий с модулем Юнга 50000 Па и коэффициентом Пуассона 0. Плотность сухой массы материала составляет 100 кг/м³.

Проницаемость полностью насыщенного материала составляет $3,7 \times 10^{-4}$ м/с. Мы предполагаем, что проницаемость изменяется как кубическая функция насыщенности, что является настройкой по умолчанию для частично насыщенного проницаемости.

Удельный вес жидкости (воды) составляет 104 Н/м^3 , а модуль объёмной упругости - 2 ГПа. Капиллярное действие в пористой среде определяется кривыми абсорбции/эксорбции, показанными на рисунке W3-2. Эти кривые дают (отрицательные) зависимости порового давления от насыщения для поведения абсорбции и эксорбции. Переход между абсорбцией и эксорбцией и наоборот происходит вдоль склона сканирования, который в данном примере по умолчанию установлен в 1,05 раза больше наибольшего склона любой ветви кривых абсорбции/эксорбции.

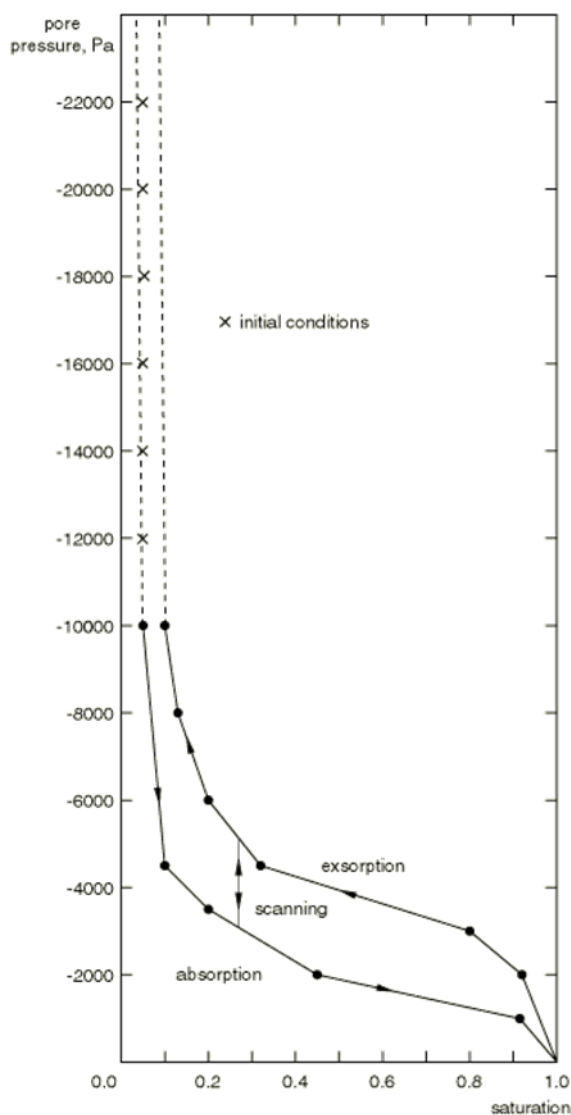


Рисунок W3-2 Кривые абсорбции и эксорбции для модельного материала.

Начальные условия

Начальное условие насыщения составляет 5%, а начальный коэффициент пустотности равен 5 по всей колонне.

Начальные условия для порового давления должны иметь градиент, равный удельному весу жидкости, чтобы, согласно закону Дарси, не было начального потока. Для этой цели мы предполагаем, что начальное поровое давление изменяется линейно от -12000 Па в нижней части колонны до -22000 Па в верхней части колонны. Эти начальные условия удовлетворяют соотношению поровое давление/насыщенность в том смысле, что они находятся между кривыми абсорбции и экссорбции.

Вопрос W3-1: Определите вертикальную координату фреатической поверхности.

Начальные условия для эффективного напряжения рассчитываются на основе плотностей сухого материала и жидкости, начального насыщения, коэффициента пустотности и начального порового давления с использованием соображений равновесия и принципа эффективного напряжения. Важно указать правильные начальные условия для данного типа задач; в противном случае система может оказаться настолько далеко от равновесия, что запуск может не состояться из-за невозможности найти сходящиеся решения.

Вопрос W3-2: Определите начальные условия для эффективного напряжения.

Начальные условия для порового давления, эффективного напряжения, насыщения и коэффициента пустотности должны быть заданы в качестве исходных данных для анализа.

Для определения начальной насыщенности:

1. В дереве модели дважды щёлкните **Predefined Fields**.
2. В диалоговом окне **Create Predefined Field** (Создание **предопределенного поля**) выберите **Initial** в качестве шага, **Other** в качестве категории и **Saturation** в качестве типа. Нажмите кнопку **Продолжить**.
3. Выберите весь экземпляр детали на видовом экране в качестве области, к которой нужно применить начальное условие.
4. Введите **0.05** в качестве значения начального насыщения.
5. Нажмите **ОК**.

Для определения начального порового давления:

1. В дереве модели дважды щёлкните **Predefined Fields**.
2. В диалоговом окне **Create Predefined Field** (Создание **предопределенного поля**) выберите **Initial** в качестве шага, **Other** в качестве категории и **Pore pressure** в качестве типа. Нажмите кнопку **Продолжить**.
3. Выберите весь экземпляр детали на видовом экране в качестве области, к которой нужно применить начальное условие.
4. В редакторе **предопределенных полей** выберите **Линейное** в качестве распределения высот.
5. Введите **-22** в качестве значения начального порового давления на высоте 1.

6. Введите **-12** в качестве значения начального порового давления на высоте **0**.
7. Нажмите **ОК**.

Для определения начального коэффициента пустотности:

1. В дереве модели дважды щёлкните **Predefined Fields**.
2. В диалоговом окне **Create Predefined Field (Создание предопределенного поля)** выберите **Initial** в качестве шага, **Other** в качестве категории и **Void ratio** в качестве типа. Нажмите кнопку **Продолжить**.
3. Выберите весь экземпляр детали на видовом экране в качестве области, к которой нужно применить начальное условие.
4. В редакторе предопределенных полей выберите **Constant** в качестве распределения высоты.
5. Введите **5** в качестве значения начального коэффициента пустотности.
6. Нажмите **ОК**.

Для определения начального геостатического напряжения:

1. В дереве модели дважды щёлкните **Predefined Fields**.
2. В диалоговом окне **Create Predefined Field (Создание предопределенного поля)** выберите **Initial** в качестве Step, **Mechanical** в качестве категории и **Geostatic stress** в качестве типа. Нажмите кнопку **Продолжить**.
3. Выберите весь экземпляр детали на видовом экране в качестве области, к которой нужно применить начальное условие.
4. Введите **-1.1** в качестве значения начального геостатического напряжения на высоте **1**.
5. Введите **-2.01667** в качестве значения начального геостатического напряжения на высоте **0**.
6. Установите компоненты бокового напряжения равными **0**.
7. Нажмите **ОК**.

Анализ

Анализ будет проводиться в два этапа. Первый шаг — это шаг геостатического анализа с короткой временной продолжительностью. Этот геостатический шаг гарантирует, что модель находится в равновесии к началу шаг 2, который моделирует переходное явление впитывания. Для Step-2 критерий сходимости для отношения наибольшей поправки к наибольшему соответствующему приращению решения был увеличен со значения по умолчанию 0,01 до значения 2. Это увеличение помогает добиться сходимости на ранних стадиях анализа, когда скорость изменения насыщения и порового давления велика в нижней части колонны викинга. Шаги 1 и 2 уже включены в модель. В этом разделе вы создадите и отправите задание на анализ. После выполнения задания вы изучите результаты.

1. В дереве модели нажмите кнопку мыши 3 на **wicking** задания и в появившемся меню выберите **Submit (Отправить)**.

2. После завершения работы изучите результаты.

Вопрос W3-3: Постройте график распределения вертикального напряжения, порового давления и насыщения по высоте образца в разные моменты времени.

Вопрос W3-4: Изобразите временную историю объёма жидкости, поглощённой колонной.

Усовершенствованная геостатическая процедура

В этом разделе вы будете использовать усовершенствованную геостатическую процедуру. Эта процедура итеративно получает напряженное состояние, которое находится в равновесии с приложенными нагрузками и граничными условиями, и одновременно достигает малых смещений в пределах заданных пользователем допусков. Чтобы использовать эту процедуру, сделайте следующее:

1. Скопируйте модель **wicking** в новую модель с именем **wicking_enh_geo**.
2. Удалите предопределённое поле, соответствующее геостатическому напряжению.
3. Если этот параметр удалён, для модели не будут заданы значения начальных напряжений. В результате в анализе начальные напряжения принимаются равными нулю.
4. В дереве моделей, в модели **wicking_enh_geo**, дважды щелкните **Step-1**, чтобы отредактировать этот шаг.
5. Выберите вкладку **Incrementation** и выберите **Automatic**. Примите настройку по умолчанию для увеличения времени и нажмите **ОК**.
6. В дереве моделей дважды щелкните **Jobs**, чтобы создать новое задание.
7. В диалоговом окне **Edit Job** выберите **wicking_enh_geo** в качестве исходной модели, введите **wicking_enh_geo** в качестве имени задания и нажмите кнопку **Продолжить**.
8. Нажмите **ОК**.
9. В дереве моделей нажмите кнопку 3 на задании **wicking_enh_geo** и в появившемся меню выберите **Submit (Отправить)**.
10. После завершения работы изучите результаты и убедитесь, что вычисленные смещения после усовершенствованной геостатической процедуры близки к нулю.

Примечание: Для вашего удобства доступен скрипт, создающий полную модель, описанную в этих инструкциях. Запустите этот скрипт, если у вас возникнут трудности при выполнении описанных здесь инструкций или

если вы хотите проверить свою работу. Скрипт называется `ws_geotech_wicking_answer.py` и доступна с помощью утилиты `Abaqus fetch`.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебном пособии приводятся инструкции для работы с универсальным программным комплексом для расчётов задач геотехники с помощью метода конечных элементов SIMULIA Abaqus.

После освоения материалов данного пособия Вы сможете использовать моделирование для написания курсовых, дипломных работ и дальнейшего решения практических задач.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями N 1, 2, 3, 4)
2. СП 50-101-2004 Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений Свод правил от 09.03.2004 N 50-101-2004);
3. СП 50-102-2003 Проектирование и устройство свайных фундаментов Свод правил от 21.06.2003 N 50-102-2003
4. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Гид по геотехнике (путеводитель по основаниям, фундаментам и подземным сооружениям)./ ПИ «Геореконструкция» – СПб. 2010 – 208 с. ISBN 978-5-9902005-1-7
5. ГОСТ 12248.1-2020 "Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза" ;
6. ГОСТ 12248.2-2020 "Грунты. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия" М.: — Стандартинформ 2020.
7. ГОСТ 12248.3-2020 "Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трёхосного сжатия" М.: — Стандартинформ 2020.
8. ГОСТ 12248.4-2020 "Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия" М.: — Стандартинформ 2020.
9. ГОСТ 12248.5-2020 "Грунты. Метод суффозионного сжатия" М.: — Стандартинформ 2020.
10. ГОСТ 12248.6-2020 "Грунты. Метод определения набухания и усадки" М.: — Стандартинформ 2020.
11. ГОСТ 12248.7-2020 "Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мёрзлых грунтов методом испытания шариковым штампом" М.: — Стандартинформ 2020.
12. ГОСТ 12248.8-2020 "Грунты. Определение характеристик прочности мёрзлых грунтов методом среза по поверхности смерзания" М.: — Стандартинформ 2020.

13. ГОСТ 12248.9-2020 "Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мёрзлых грунтов методом одноосного сжатия" ; М.: — Стандартиформ 2020.

14. ГОСТ 12248.10-2020 "Грунты. Определение характеристик деформируемости мёрзлых грунтов методом компрессионного сжатия". М.: — Стандартиформ 2020.

15. ГОСТ 12248.11-2020 "Грунты. Определение характеристик прочности оттаивающих грунтов методом среза". М.: — Стандартиформ 2020.

ВАСИЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ФАРТУКОВ
МАРИНА ИЛЬНИЧНА ЗБОРОВСКАЯ
СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ РЫЖОВ
АЛЕКСАНДР КОНСТАНТИНОВИЧ БОРОДИН

ВВЕДЕНИЕ В МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ГЕОТЕХНИКИ

Учебное пособие

Подписано для размещения в Электронно-библиотечной системе РГАУ-
МСХА имени К.А. Тимирязева 15.11.2022 г.