

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

**Ю. В. НИКИТЮК, В. А. ПРОХОРЕНКО,
А. А. СЕРЕДА**

**ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.
ANSYS WORKBENCH**

Практическое руководство

для студентов специальностей

1-31 04 01 «Физика (по направлениям)»,

1-31 04 03 «Физическая электроника»,

1-31 04 08 «Компьютерная физика»,

1-39 03 01 «Электронные системы безопасности»,

1-39 03 02 «Программируемые мобильные системы»,

1-98 01 01 «Компьютерная безопасность (по направлениям)»

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2023

УДК 004.9(076)
ББК 32.973-02я73
Н623

Рецензенты:

кандидат физико-математических наук Д. С. Кузьменков,
кандидат технических наук Д. В. Прокопенко

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»

Никитюк, Ю. В.

Н623 Введение в технологии компьютерного моделирования.
ANSYS WORKBENCH : практическое руководство /
Ю. В. Никитюк, В. А. Прохоренко, А. А. Серда ; Гомельский
гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины,
2023. – 43 с.

ISBN 978-985-577-948-4

В практическом руководстве рассмотрены основные сведения о про-
грамме ANSYS WORKBENCH, приведены описание ее графического интер-
фейса и пошаговый алгоритм работы с проектом в ANSYS WORKBENCH.

Адресовано студентам специальностей 1-31 04 01 «Физика (по направле-
ниям)», 1-31 04 03 «Физическая электроника», 1-31 04 08 «Компьютерная фи-
зика», 1-39 03 01 «Электронные системы безопасности», 1-39 03 02 «Програм-
мируемые мобильные системы», 1-98 01 01 «Компьютерная безопасность»
(по направлениям).

УДК 004.9(076)
ББК 32.973-02я73

ISBN 978-985-577-948-4

© Никитюк Ю. В., Прохоренко В. А.,
Серда А. А., 2023

© Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Основные сведения об ANSYS WORKBENCH.....	5
2. Графический интерфейс ANSYS WORKBENCH.....	7
3. Работа с проектом в ANSYS WORKBENCH.....	14
3.1 Задание свойств материала.....	18
3.2 Построение и импорт геометрии.....	23
3.3 Формирование конечно-элементной модели.....	29
3.4 Задание граничных условий и нагрузок.....	37
3.5 Выполнение расчета и вывод результатов.....	39
Литература.....	43

ВВЕДЕНИЕ

Важными навыками, которые должны быть приобретены выпускниками факультета физики и информационных технологий, можно считать следующие: анализ физических закономерностей на основе современных теоретических представлений и использование математических и компьютерных методов; выполнение исследовательской работы в областях, где используются физико-математические методы анализа и компьютерные технологии; разработка физико-математических методов для решения задач в областях техники, экономики и управления; производство расчетов при проектировании стандартных конструкций и компонентов электронных систем безопасности с учетом знаний в области механики материалов и теории машин и механизмов.

Формирование этих навыков тесно связано с использованием компьютерного моделирования для изучения разнообразных физических процессов, происходящих в материалах и изделиях.

В настоящее время ведущие промышленные корпорации мира считают программное обеспечение ANSYS неотъемлемой частью своих высокотехнологичных и наукоемких производств. В число клиентов ANSYS входит первая десятка промышленных корпораций из числа ста наиболее процветающих компаний мира.

Для решения инженерных задач и эффективного управления расчетными ресурсами компания ANSYS разработала платформу ANSYS Workbench, которая позволяет объединить задачи вычислительной гидродинамики, теплообмена, механики деформируемого твердого тела и электромагнетизма в один комплексный междисциплинарный проект. В платформу также интегрированы все современные технологии и инструменты для взаимодействия с CAD-системами, исправления дефектной геометрии, создания высококачественных сеток, пре- и пост-процессинга, что значительно облегчает работу специалиста и делает её максимально эффективной. В свою очередь, архитектура ANSYS Workbench является открытой, что позволяет пользователю интегрировать собственные разработки в расчетную среду, тем самым расширяя ее возможности. Использование ANSYS WORKBENCH переводит процесс моделирования на современный уровень. Применение ANSYS WORKBENCH делает моделирование более наглядным, а многие действия пользователя более простыми, что особенно важно для начинающих пользователей.

В практическом руководстве рассмотрены основные сведения о программе ANSYS WORKBENCH, приведено описание ее графического интерфейса и приведен пошаговый алгоритм работы с проектом в ANSYS WORKBENCH.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ANSYS WORKBENCH

В настоящее время комплекс ANSYS – одно из самых мощных программных средств анализа для широкого круга инженерных дисциплин. В комплексе представлены инструменты для проведения следующих типов анализа:

– **Structural Mechanics** – моделирование задач динамики и прочности, включая линейный статистический анализ, спектральный и гармонический анализ, оценку потери устойчивости, механику разрушения. Линейка модулей ANSYS для решения задач механики деформируемого твердого тела включает Static Structural, Transient Structural, Rigid Dynamics, Steady-State Thermal, Transient Thermal, Linear Buckling, nCode, Harmonic Response, Random Vibration, Modal, Response Spectrum, Explicit Dynamics/AUTODYN.

– **Fluid Mechanics** – моделирование течений жидкости и газа. Позволяет исследовать широкий спектр проблем гидрогазодинамики, включая стационарные и нестационарные течения, сжимаемые и несжимаемые течения, невязкие, ламинарные и турбулентные течения, многокомпонентные и многофазные течения, течения с химическими реакциями, течения через пористые среды и т. д. Линейка модулей ANSYS для препроцессинга, решения и обработки результатов в задачах гидрогазодинамики включает модули Fluent, CFX, Icepak, CFD-Flo, Vista TF, Icem CFD, TurboGrid, TGrid, BladeModeler, CFD-Post.

– **Electromagnetics** – расчет радиоэлектронных компонентов и устройств, интегральных схем, антенн, электрических машин, приводов, силовой электроники, систем автоматики, трансформаторов, электрических батарей и др. Линейка программных продуктов для решения задач электромеханики включает Maxwell, RMxpprt, PExpprt, Simplorer.

– **Связанные расчеты** – моделирование задач на стыке различных разделов физики. Позволяет проводить многодисциплинарный анализ, основанный на сочетании различных типов решателей. Как правило, каждый решатель соответствует отдельному приложению в среде программы.

Обращение к тому или иному решателю, а также взаимодействие между приложениями эффективно осуществляется с помощью ANSYS WORKBENCH.

Использование ANSYS WORKBENCH переводит процесс моделирования на современный уровень. Применение ANSYS WORKBENCH делает моделирование более наглядным, а многие действия пользователя более простыми, что особенно важно для начинающих пользователей.

Можно выделить следующие этапы проведения инженерного анализа в ANSYS WORKBENCH:

– *разработка модели* (препроцессинг). На данном этапе осуществляется подготовка геометрической модели, задание материала и его свойств, генерация конечно-элементной сетки, определение физических условий моделирования. Конечным результатом этапа является модель, подготовленная для численного решения;

– *настройка решателя и решение*. На данном этапе задаются необходимые настройки решателя, параметры, обеспечивающие сходимость итерационного процесса, и запускается решатель. Конечным результатом этапа является численное решение, полученное с заданной точностью;

– *обработка результатов* (постпроцессинг). На данном этапе полученное численное решение задачи используется для визуализации распределения необходимых физических величин (напряжений, деформаций, температур и др.). Конечным результатом этапа является набор графиков, анимаций, массивов значений, представляющих необходимые результаты решения задачи.

При решении практической задачи, как правило, приходится часто возвращаться к предыдущим этапам, вносить изменения в модели, перестраивать конечно-элементную сетку, корректировать настройки решателя. Для этого наличие в ANSYS WORKBENCH удобных инструментов играет весьма важную роль, так как позволяет существенно ускорить процесс получения решения.

ANSYS WORKBENCH обеспечивает инженера большим количеством инструментов, необходимых на всех этапах анализа, позволяет быстро получать численное решение различными решателями, эффективно организует взаимосвязи между отдельными видами инженерных расчетов.

Следует отметить, что ANSYS WORKBENCH пока не предоставляет пользователю всех возможностей ANSYS Mechanical APDL и автоматизирует некоторые важные операции, например, выбор типа конечного элемента, что не всегда бывает удобным. Компания ANSYS, Inc. интенсивно развивает ANSYS WORKBENCH как в части совершенствования графического интерфейса, так и в части расширения возможностей платформы.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите типы анализа, проведение которых возможно в ANSYS WORKBENCH.

2. Перечислите этапы проведения инженерного анализа в ANSYS WORKBENCH.

3. Сравните преимущества и недостатки ANSYS WORKBENCH и ANSYS Mechanical APDL.

2. ГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС ANSYS WORKBENCH

Запуск ANSYS WORKBENCH выполняется из основного меню Пуск => Программы => ANSYS => WORKBENCH. После загрузки выводится основное окно программы, которое в свою очередь состоит из нескольких окон (рисунок 1).

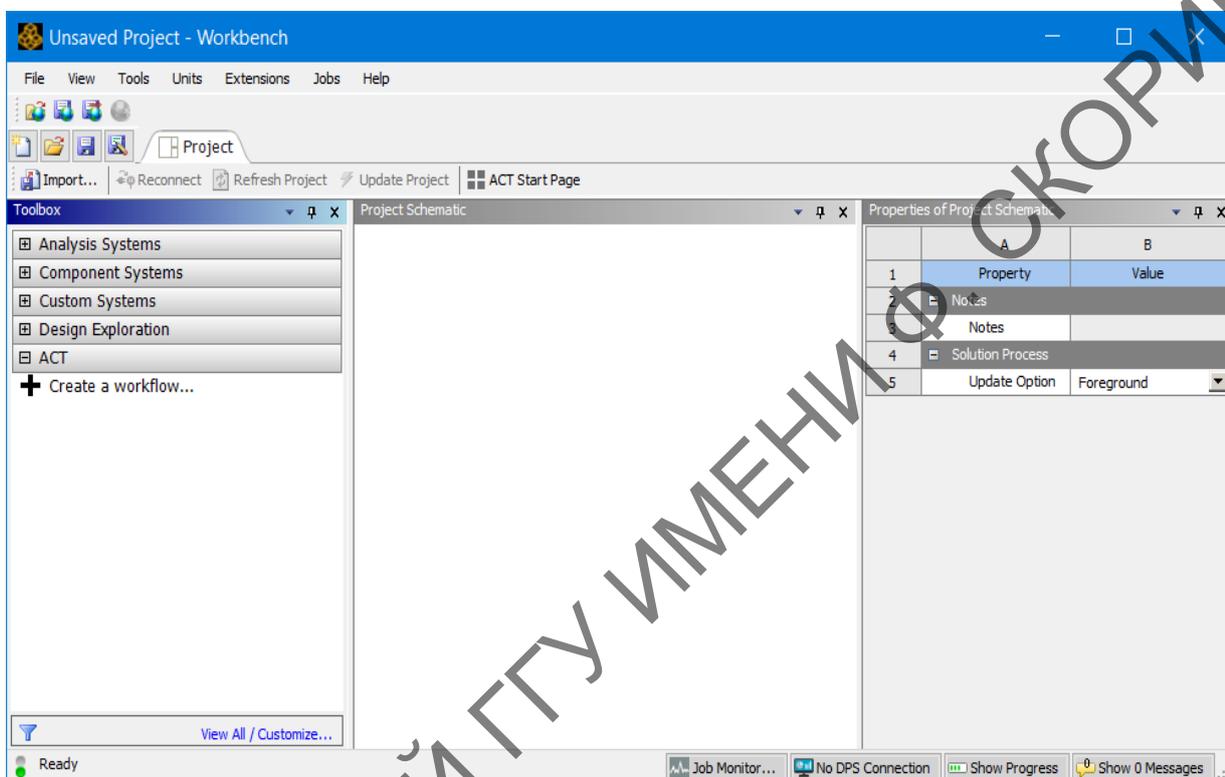


Рисунок 1 – Основное окно ANSYS WORKBENCH

Каждое из окон может быть изменено в размерах, свернуто или закрыто обычными средствами Windows. Ниже представлено описание и функциональные особенности окон.

Окно **Project Schematic** – главное окно проекта, расположено в центре основного окна WORKBENCH (рисунок 2). Содержит структурные компоненты проекта (блоки) и связи между ними. Такой подход позволяет наглядно представлять части проекта и управлять связями между его отдельными блоками.

Окно **Toolbox** – окно инструментов проекта, расположено слева от окна Project Schematic. Содержит несколько разделов, отображенных в виде раскрывающихся списков (рисунок 3).

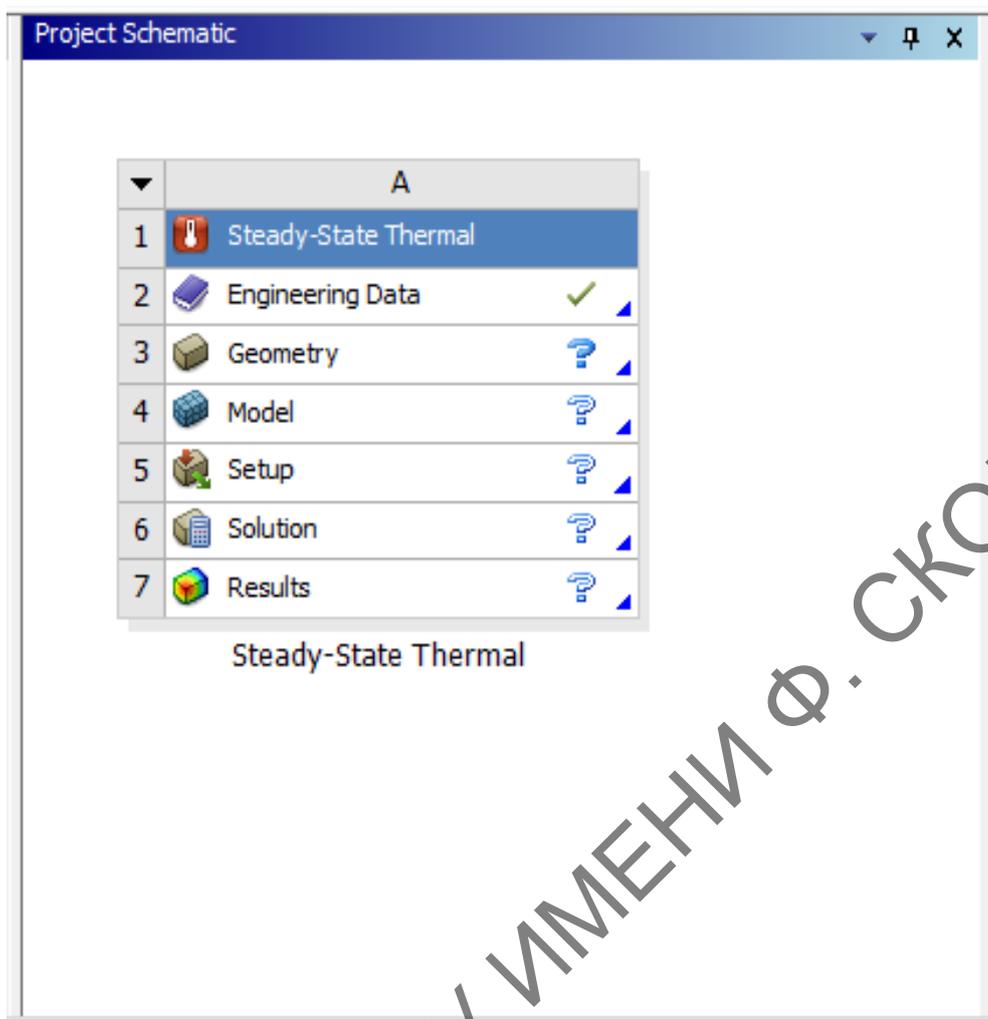


Рисунок 2 – Окно **Project Schematic**

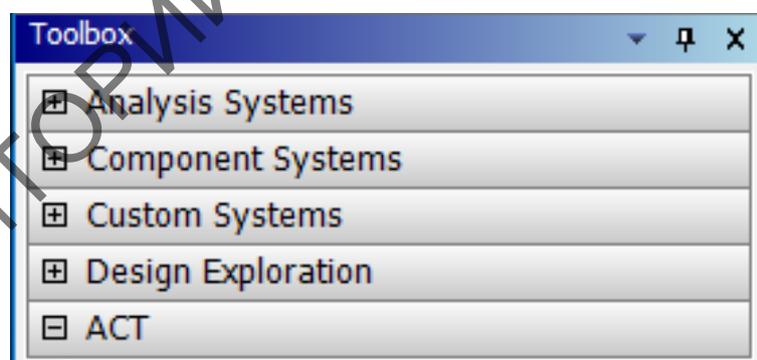


Рисунок 3 – Окно **Toolbox**

Разделы окна **Toolbox**:

– **Analysis Systems** содержит готовые шаблоны для различных типов численного анализа (рисунок 4);



Рисунок 4 – Окно **Analysis Systems**

– **Component Systems** содержит такие отдельные компоненты инженерного анализа, как геометрическая модель, конечно-элементная сетка и др. (рисунок 5);



Рисунок 5 – Окно **Component Systems**

– **Custom Systems** содержит готовые связки шаблонов для решения междисциплинарных задач (рисунок 6);

– **Design Exploration** содержит инструменты решения задач оптимизации (рисунок 7).

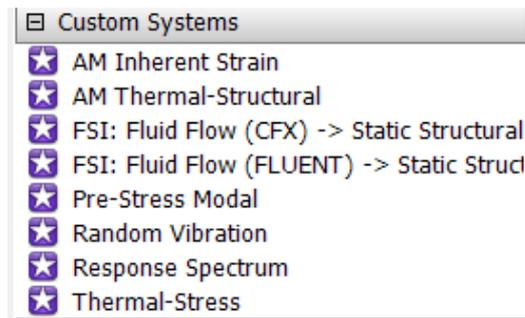


Рисунок 6 – Окно **Custom Systems**

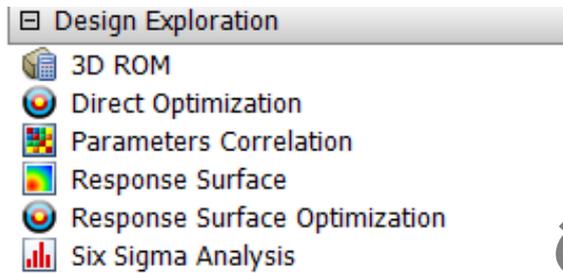


Рисунок 7 – Окно **Design Exploration**

Окно **Properties of Schematic** – окно, в котором отображаются свойства выбранного объекта (рисунок 8). Все свойства объекта в данном окне отображаются в виде таблицы, в первом столбце которой записано наименование свойства или параметра, а во втором отражено его значение.

	A	B
1	Property	Value
2	General	
3	Component ID	Solution
4	Directory Name	SYS
5	Queue	
6	ServerUrl	
7	UserName	
8	Notes	
9	Notes	
10	Used Licenses	
11	Last Update Used Licenses	
12	System Information	
13	Physics	Thermal
14	Analysis	Steady-State
15	Solver	Mechanical APDL
16	Solution Process	
17	Update Option	Use ap... ▾
18	Solve Process Setting	My Computer

Рисунок 8 – Окно **Properties of Schematic**

В нижней части экрана расположено окно **Messages**, которое служит для отображения служебных сообщений, предупреждений или сообщений об ошибках.

В верхней части основного окна расположена зона стартового окна ANSYS WORKBENCH, которая содержит вкладки **File**, **View**, **Tools**, **Units**, **Extension**, **Jobs**, **Help**. Рассмотрим подробнее вкладки **File**, **View**, **Tools**, **Units**.

Меню вкладки **File** позволяет создать новый проект или загрузить имеющийся, а также сохранить проект, находящийся в работе.

Меню вкладки **View** позволяет добавить или убрать дополнительные окна в стартовое графическое окно интерфейса ANSYS WORKBENCH. Для этого необходимо поставить или убрать галочку напротив названия интересующего окна путём нажатия левой кнопки мыши на соответствующее название. Размер и расположение всех окон можно изменить посредством манипуляций, аналогичных тем, что совершаются при работе с окнами Windows.

Меню вкладки **Tools** позволяет выполнить основные настройки ANSYS WORKBENCH.

Меню вкладки **Units** (рисунок 9) даёт возможность выбрать удобную для поставленной задачи систему единиц измерений. При этом можно переходить из одной системы единиц в другую на любом этапе работы с проектом. Для выбора необходимой системы единиц поставьте галочку напротив интересующей системы (из списка доступных).

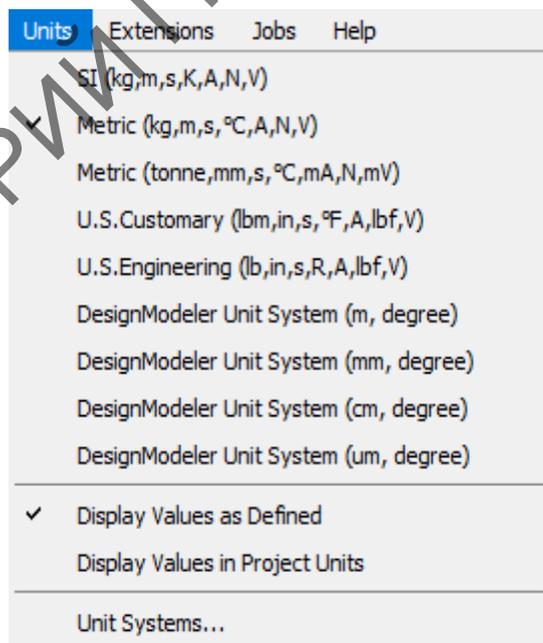


Рисунок 9 – Окно **Units**

Вопросы для самоконтроля

1. Что содержится в окне **Project Schematic**?
2. Какие инструменты содержатся в окне **Design Exploration**?
3. Возможности какого окна целесообразно использовать при решении междисциплинарных задач?

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

3. РАБОТА С ПРОЕКТОМ В ANSYS WORKBENCH

Приведем краткий обзор основных модулей и приложений, используемых в ANSYS WORKBENCH для работы с проектом.

Engeneering Data – интерфейс для управления базой данных свойств материалов, а также входных параметров математических моделей.

Design Modeler и **SpaceClaim** – приложения для создания геометрических 2D/3D-моделей.

Meshing – многофункциональный сеточный препроцессор, который позволяет генерировать высококачественные расчетные сетки в автоматическом режиме для различных типов инженерного анализа.

Static Structural предназначен для решения задач механики деформируемого твердого тела в статической постановке.

Transient Structural – модуль для решения задач динамики конструкций.

Explicit Dynamics/AUTODYN/LS-DYNA – модули для расчета задач динамики конструкций и моделирования быстропротекающих нелинейных процессов: высокоскоростных ударов, пробитий, фрагментации, разрушения и т. д.

Rigid Dynamics предназначен для моделирования динамики подвижных систем, механизмов.

Steady-State Thermal/Transient Thermal – анализ стационарного/нестационарного теплового поля.

Fluid Flow (CFX)/Fluid Flow (Fluent) предназначены для решения задач гидродинамики, а также для задач сопряженного теплообмена.

Electric предназначен для моделирования электрических полей постоянного тока в проводниках.

Thermal-Electric – стационарный электротермический анализ, позволяющий исследовать процессы тепловыделения при прохождении электрического тока по проводнику.

Modal – модальный анализ, расчет собственных частот и форм колебаний.

Harmonic Response – гармонический анализ для определения отклика конструкции на действие гармонических нагрузок. Позволяет оценить негативные последствия вынужденных колебаний – резонанса, усталости и т. д.

Response Spectrum – анализ отклика конструкции на действие динамических нагрузок. Используется для расчета сейсмостойкости сооружений.

Random Vibration – анализ отклика конструкции на действие случайных вибрационных нагрузок.

В качестве примера приведем структуру проекта статического прочностного анализа **Steady-State Thermal**. Двойным нажатием левой кнопки мыши выбираем Static structural в окне Analysis Systems. В основном окне проекта появится блок, содержащий этапы выполнения анализа (рисунок 10):

- задание свойств материала (**Engineering Data**);
- построение и импорт геометрии (**Geometry**);
- формирование конечно-элементной модели (**Model**);
- задание граничных условий и нагрузок (**Setup**);
- выполнение расчёта (**Solution**);
- вывод результатов (**Results**).

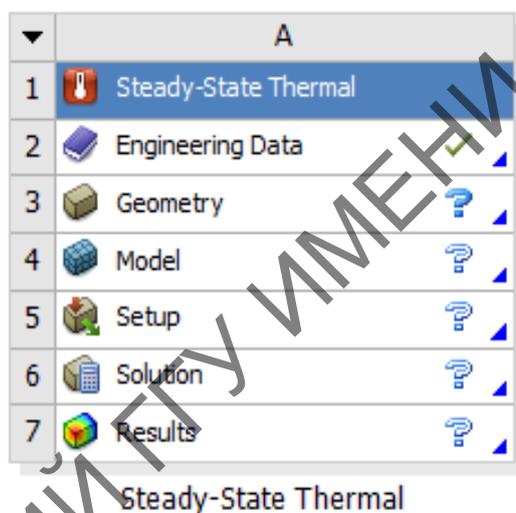


Рисунок 10 – Результат выбора анализа

Меню управления блоком инженерного анализа в **Project Schematic** вызывается нажатием кнопки в левом верхнем углу блока и позволяет выполнить следующие действия (рисунок 11):

- обновить (**Update**);
- сделать дубликат блока (**Duplicate**);
- изменить вид инженерного анализа в блоке (**Replace With**);
- удалить всю информацию блока (**Clear Generated Data**);
- удалить блок (**Delete**);
- переименовать блок (**Rename**);
- перейти к окну свойств блока (**Properties**).

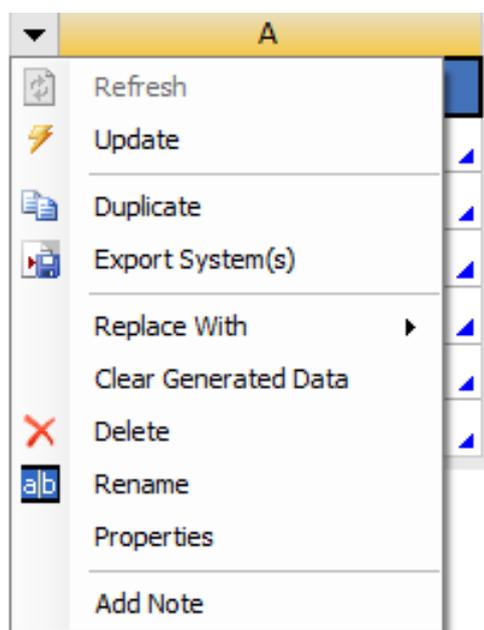


Рисунок 11 – Меню управления блоком инженерного анализа

Похожее меню имеет каждый элемент блока. Для его вызова нужно нажать правую кнопку мыши на элементе (рисунок 12). В нем отражены операции, выполняемые с данным элементом, такие как редактирование элемента (**Edit**), обновление (**Update**), передача данных из нового блока (**Transfer Data From New**) и другие.

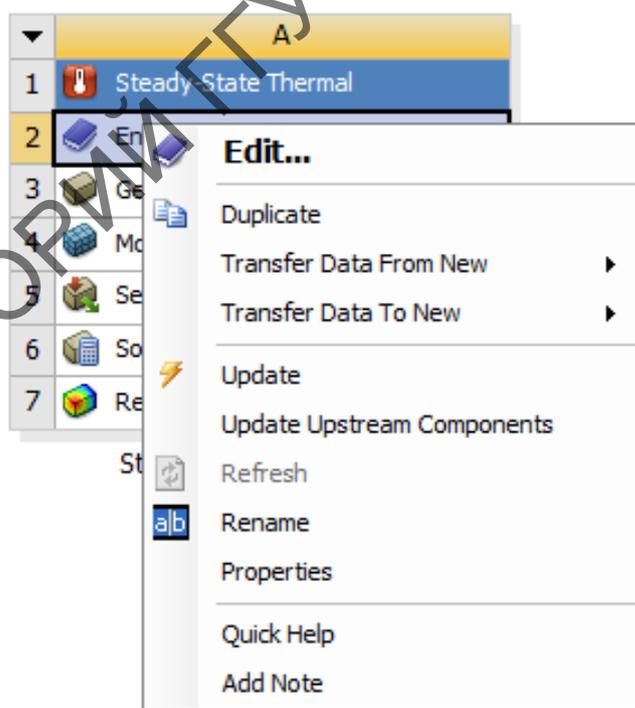


Рисунок 12 – Меню управления элементами блока инженерного анализа

Каждый элемент блока инженерного анализа имеет статус, отображаемый справа от его наименования. Если блок только что вставлен, то в нем по умолчанию задаются лишь свойства материала в элементе **Engineering Data**, который при этом помечается галочкой. По мере работы с проектом изменяется статус других элементов блока. Если для элемента блока не определены какие-либо свойства, то его статус отмечается знаком вопроса. Если для элемента требуется проведение расчетов, то его статус помечается знаком молнии, а если требуется только обновить связи или свойства элемента, то его статус отмечается знаком .

При проведении моделирования в ANSYS WORKBENCH иногда возникает необходимость в установлении связей между отдельными блоками инженерного анализа. Необходимость связывания блоков может быть обусловлена особенностью анализа, например, расчет температурных напряжений. В этом случае связываемые блоки должны обмениваться информацией.

ANSYS WORKBENCH поддерживает два типа связи, устанавливаемой между блоками инженерного анализа: простая связь для передачи данных (**Transfer Data**) или совместно используемая связь (**Share**).

При наличии простой связи данные из одного блока передаются как входные в другой блок. При наличии совместно используемой связи устанавливается соответствие между связанными ячейками, что накладывает ограничения на редактирование и сброс данных в зависимых элементах.

На рисунке 13 отражена схема связанного статического термомеханического анализа. В данной задаче свойства материалов, геометрическая модель, КЭ-сетка используются совместно, поэтому связь данных элементов имеет тип **Share**.

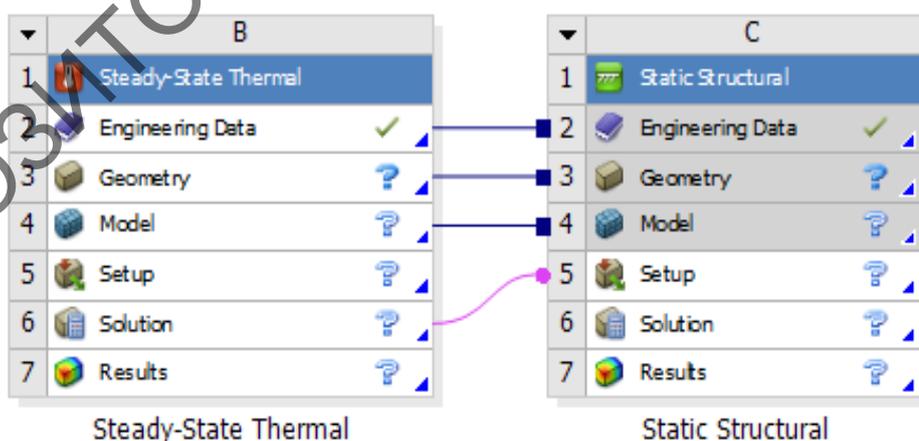


Рисунок 13 – Меню управления элементами блока инженерного анализа

Самый простой способ вставки связанного блока инженерного анализа состоит в следующем. Нажав и удерживая нажатой левую кнопку мыши на нужном блоке в окне **Toolbox**, нужно переместить указатель на элемент существующего блока, с которым требуется установить связь. Если, показав на элемент **Geometry**, отпустить левую клавишу мыши, то будет установлена связь между элементами **Engineering Data** и **Geometry**. Если, показав на элемент **Model**, отпустить левую клавишу мыши, то будет установлена связь между элементами **Engineering Data**, **Geometry** и **Model**.

Элементы блока, которые могут участвовать в установлении связей, выделены прямоугольником, а типы связей между ними показаны справа (рисунок 14).

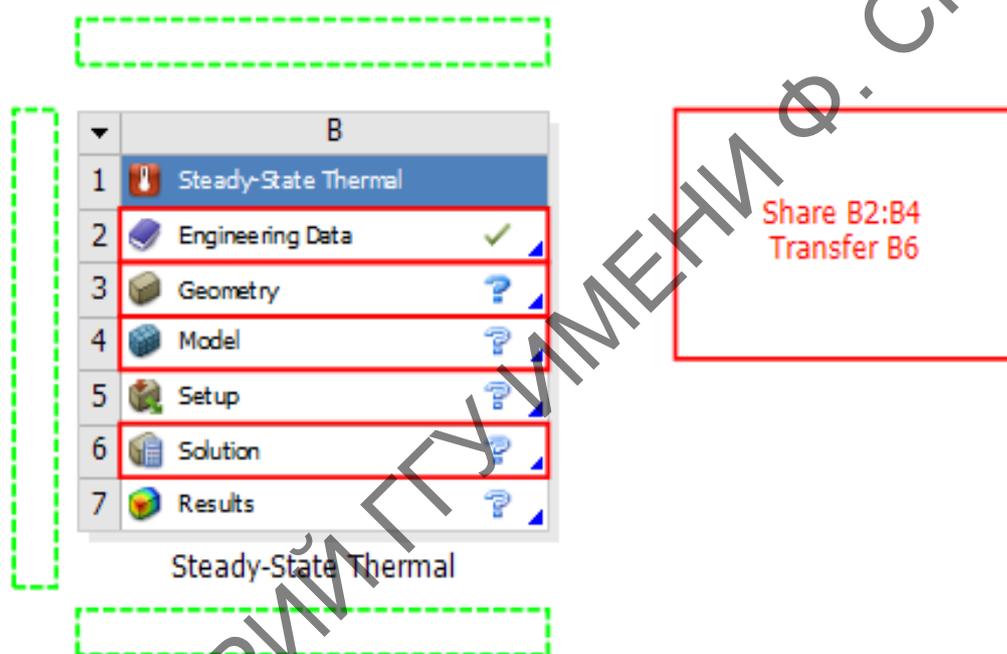


Рисунок 14 – Вставка связанного блока инженерного анализа

3.1 Задание свойств материала

Важным этапом моделирования является выбор материалов для созданных тел и указание их свойств. Для этих целей в ANSYS WORKBENCH существует модуль управления материалами, связанный с блоком анализа и представленный элементом **Engineering Data**.

Выбирать материалы и задавать их свойства с помощью этого модуля можно как до построения геометрической модели, так и после.

Модуль управления материалами может быть использован в качестве хранилища библиотек свойств материалов.

После вставки в проект нового блока инженерного анализа элемент **Engineering Data** уже отмечен как определенный, так как в нем по умолчанию выбрана конструкционная сталь (рисунок 15). Изменить материал или его свойства можно на любом этапе моделирования.

The image shows two overlapping windows from a software application. The top window is titled 'Outline of Schematic A2: Engineering Data' and contains a table with columns A, B, C, D, and E. Row 1 is 'Contents of Engineering Data' with a 'Source' icon and 'Description' in column E. Row 2 is 'Material'. Row 3 is 'Structural Steel' with a description in column E: 'Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1'. A row below contains a link: 'Click here to add a new material'.

The bottom window is titled 'Properties of Outline Row 3: Structural Steel' and contains a table with columns A, B, C, D, and E. Row 1 is 'Property', 'Value', and 'Unit'. Row 2 is 'Material Field Variables' with a 'Table' icon. Row 3 is 'Density' with a value of 7850 and unit kg m⁻³. Row 4 is 'Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion'. Row 6 is 'Isotropic Elasticity'. Row 12 is 'Strain-Life Parameters'. Row 20 is 'S-N Curve' with a 'Tabular' icon. Row 24 is 'Tensile Yield Strength' with a value of 2,5E+08 and unit Pa. Row 25 is 'Compressive Yield Strength' with a value of 2,5E+08 and unit Pa. Row 26 is 'Tensile Ultimate Strength' with a value of 4,6E+08 and unit Pa. Row 27 is 'Compressive Ultimate Strength' with a value of 0 and unit Pa.

Рисунок 15 – Свойства конструкционной стали

Чтобы запустить модуль управления материалами, нужно вызвать контекстное меню нажатием правой кнопки мыши на строке элемента **Engineering Data** и выбрать пункт **Edit**. После загрузки появится рабочая область модуля, из которой можно управлять материалами, получать доступ к внешним источникам данных о материалах, а также сохранять данные для дальнейшего использования (рисунок 16).

Unsaved Project - Workbench

File View Tools Units Extensions Jobs Help

Project: A2:Engineering Data

Filter Engineering Data Engineering Data Sources

Engineering Data Sources

Physical Properties

- Linear Elastic
- Hyperelastic Experimental Data
- Hyperelastic
- Chaboche Test Data
- Plasticity
- Creep
- Life
- Strength
- Gasket
- Viscoelastic Test Data
- Viscoplastic
- Shape Memory Alloy
- Geomechanical
- Damage
- Cohesive Zone
- Fracture Criteria
- Crack Growth Laws
- Three Network Model
- Thermal
- Thermopower
- Electric
- Piezoelectric
- Linear "Soft" Magnetic Material
- Linear "Hard" Magnetic Material
- Nonlinear "Soft" Magnetic Material
- Nonlinear "Hard" Magnetic Material
- Perforated Media
- Custom Material Models

Table of Properties Row 11: Strain-Life Parameters

	A	B	C	D	E	F
1	Strength Coefficient (Pa)	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient (Pa)	Cyclic Strain Hardening B
2	9.3E+08	-0.106	0.213	-0.47	1E+09	0.2

Chart of Properties Row 11: Strain-Life Parameters

Table of Properties Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E	F
1	Density	Value	Unit	Source		
2	7850	kg m ⁻³				
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion					
5	Isotropic Elasticity					
11	Strain-Life Parameters					
19	S-N Curve	Tabular				
23	Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa			
24	Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa			
25	Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa			
26	Compressive Ultimate Strength	0	Pa			
27	Isotropic Thermal Conductivity	60.5	W m ⁻¹ C ⁻¹			
28	Specific Heat Constant Pressure, C _p	494	J kg ⁻¹ C ⁻¹			
29	Isotropic Relative Permeability	10000				
30	Isotropic Resistivity	1.7E-07	ohm m			

Ready

Windows Taskbar: 1627, 13.01.2023, Рус, Unsa..., Базы..., LMC, бр... , Ники..., бр..., KM, Л..., C:\Us..., C:\Us..., D:\...

Рисунок 16 – Рабочая область модуля Engineering Data

Всю работу с редактором материалов можно условно разделить на две части: работа непосредственно с источником данных (при активной закладке **Engineering Data Source**) и работа с материалами, внедренными в проект (закладка **Engineering Data Source** не активна).

Слева в окне редактора материалов располагается окно инструментов **Toolbox**, где отражен весь набор свойств, которые могут быть заданы для каждого материала.

В окне **Engineering Data Source** содержатся данные о базах данных материалов. Окно становится доступным после активации соответствующей закладки в верхнем левом углу окна редактора материалов.

При работе с источником в окне данных о материалах **Outline of Schematic** отображаются все материалы, хранящиеся в указанном источнике.

В случае работы с материалами, внедренными в проект (при неактивной закладке **Engineering Data Source**), в окне **Outline of Schematic** можно создать, удалить или переименовать материал, добавить его описание, добавить материал из внешнего источника данных или задать материал «по умолчанию» для конкретных частей модели.

При работе с источником данных в столбце **Contents of Engineering Data** окна **Outline of Schematic** указываются имена всех материалов, содержащихся в выбранном источнике. Пиктограммы слева от имен материалов указывают корректность введенных свойств данного материала. Столбец **Add** служит для добавления материала из источника данных в текущий проект. Если элемент включен в текущий проект, справа загорается соответствующая пиктограмма. Столбец **Source** указывает на источник, в котором хранятся данные о материале, а в столбце **Description** приводится его краткое описание.

При неактивной закладке **Engineering Data Source** в верхнем левом углу окна редактора свойств материалов окно **Outline of Schematic** отображает только те материалы, которые включены в данный проект. В случае необходимости в данном окне можно удалить или дублировать выбранный материал, просмотреть, обновить или удалить связь (ссылку) с источником данных.

Существуют три типа источников данных, используемых в рабочей области модуля управления материалами: текущий набор материалов, библиотека материалов и избранное. **General Materials** – библиотека материалов общего использования, которые могут применяться в различных типах анализа. Материалы из библиотеки добавляются в текущий набор материалов нажатием кнопки с желтым плюсом в столбце **Add** панели **Outline Panel**. Добавим таким способом в текущий набор материалов свойства кремния из библиотеки **General Materials** (рисунок 17).

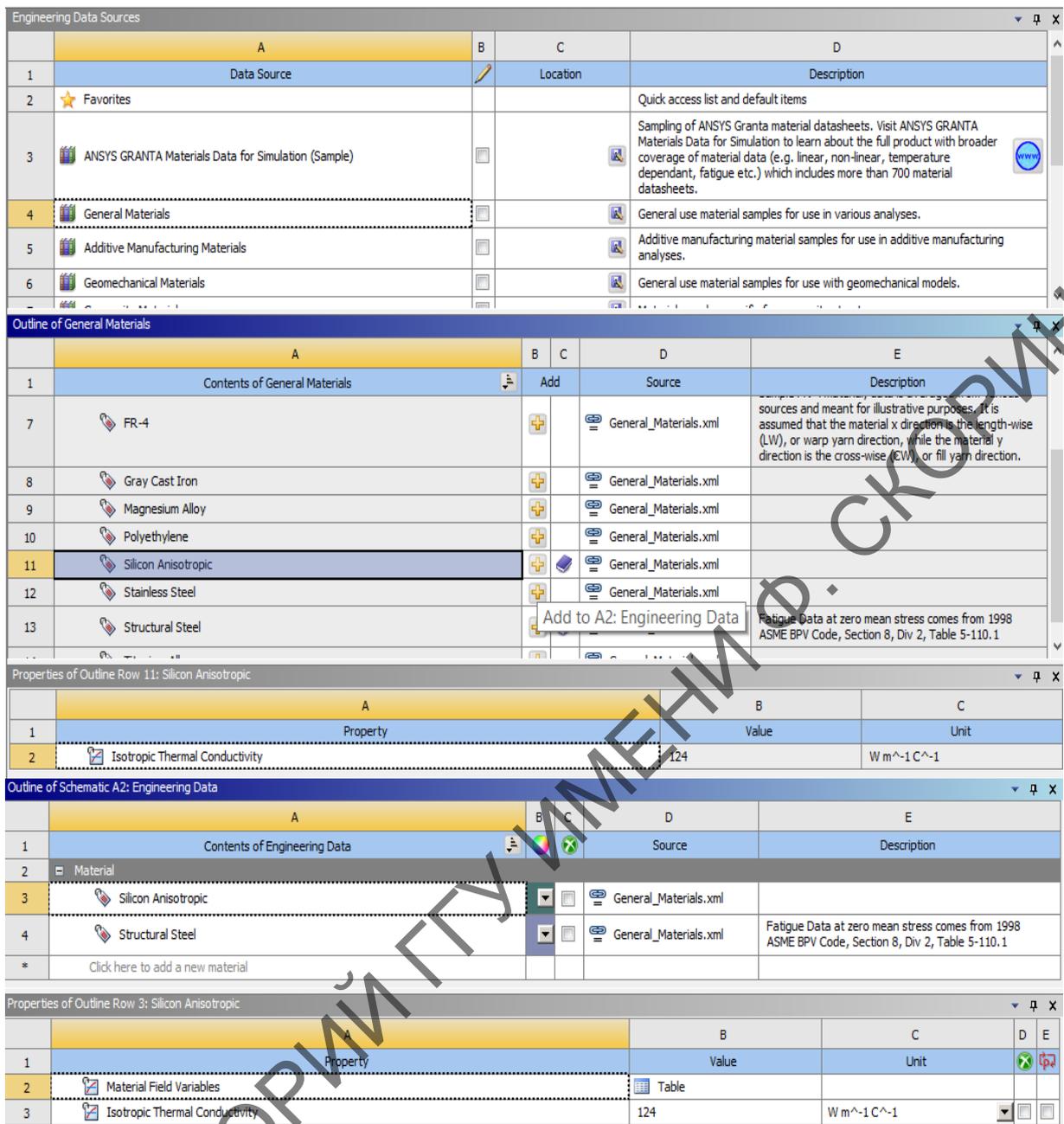


Рисунок 17 – Задание свойств кремния

Зададим свойства кремния как нового материала. Для этого откроем **Physical Properties** в **Toolbox** и зададим значение коэффициента теплопроводности (рисунок 18).

Все свойства выбираемого материала отображаются в окне **Properties of Outline Row**. Столбец свойств (**Property**) содержит наименования свойств данного материала и его параметры.

Наряду с окном **Properties of Outline Row** данные о свойстве материала также отображаются в виде таблицы в окне **Table of Property**, а в окне **Chart of Properties** выводится график изменения данного свой-

ства от указываемого параметра. При работе с материалами, внедренными в проект (закладка **Engineering Data Source** неактивна), в окнах **Properties of Outline Row** и **Table of Properties Row** можно произвести корректировку свойств материала.

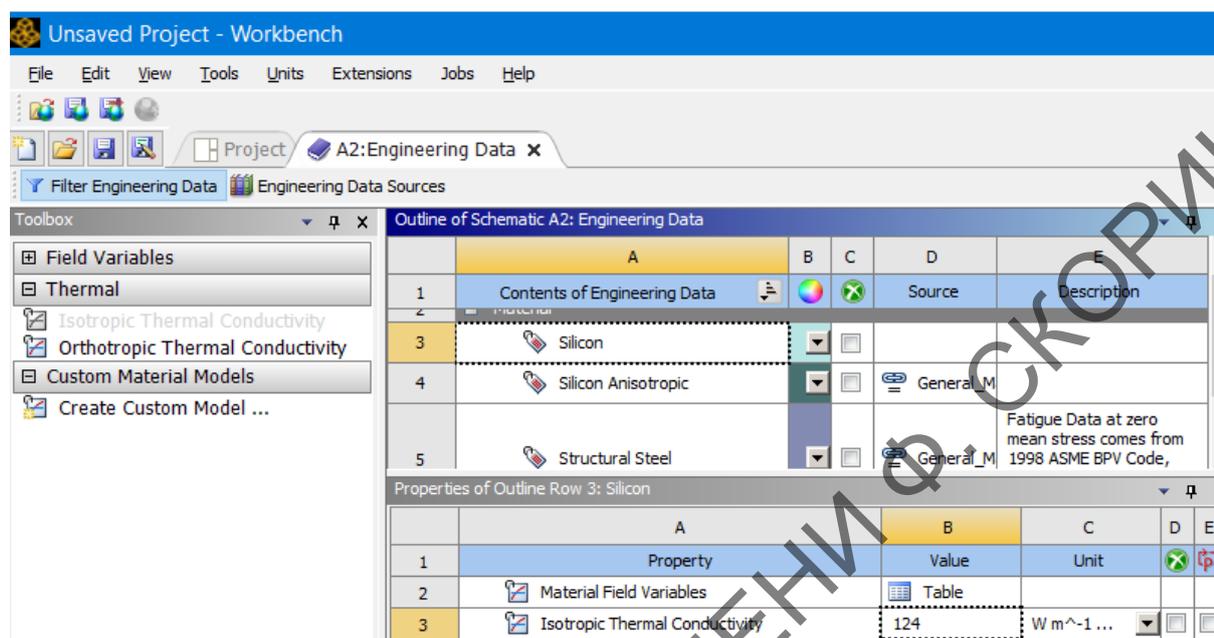


Рисунок 18 – Задание свойств кремния (второй вариант)

Для изменения материала, принятого «по умолчанию», необходимо выбрать в **Engineering Data Source** источник данных, затем в панели **Outline of Schematic** выбрать материал и с помощью контекстного меню добавить его в «Избранное» (команда **Add to Favorites**). Далее в **Engineering Data Source** необходимо отобразить содержимое группы **Favorites** и в контекстном меню, указать данный материал в качестве материала «по умолчанию» **Default Solid Material**.

3.2 Построение и импорт геометрии

ANSYS WORKBENCH предоставляет следующие возможности для геометрического моделирования:

- создание геометрии с нуля;
- импорт геометрии из сторонних CAD-систем (AutoCAD, SolidWorks и др.);
- редактирование импортированной геометрии;
- двунаправленное параметрическое связывание с различными CAD-системами (импорт-экспорт модели).

Основными программными модулями ANSYS, используемыми для создания геометрических моделей, являются:

- SpaceClaim Direct Modeler (рисунок 19);
- Design Modeler (рисунок 20);
- Mechanical APDL.

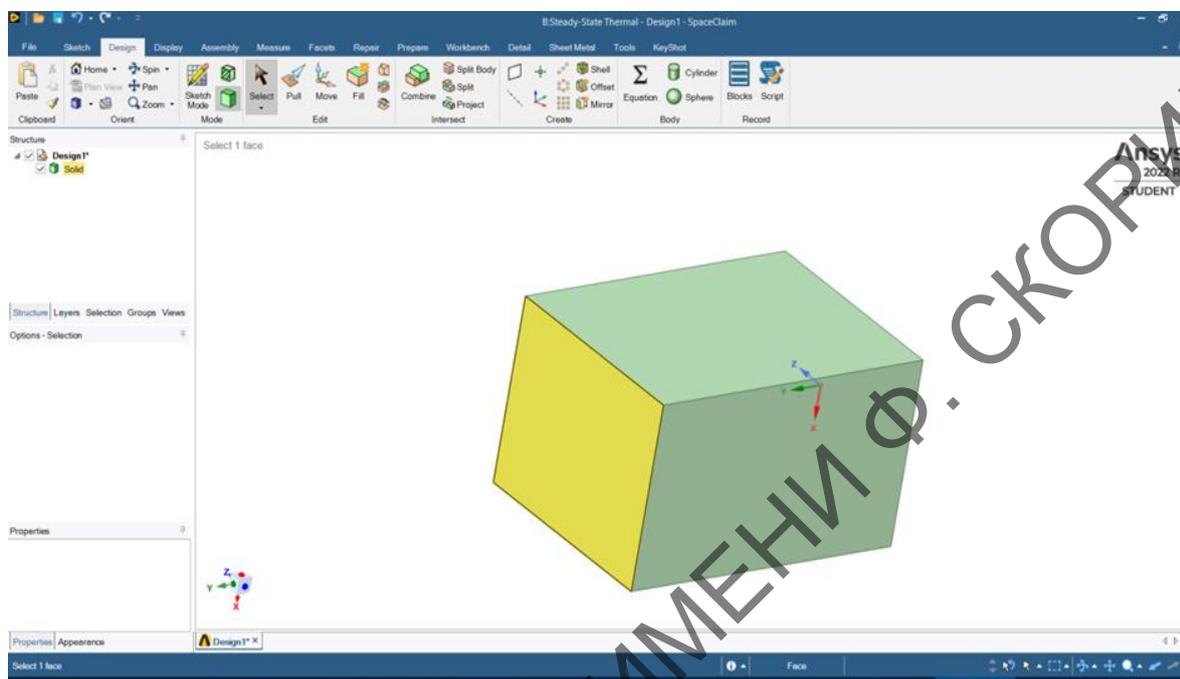


Рисунок 19 – SpaceClaim Direct Modeler

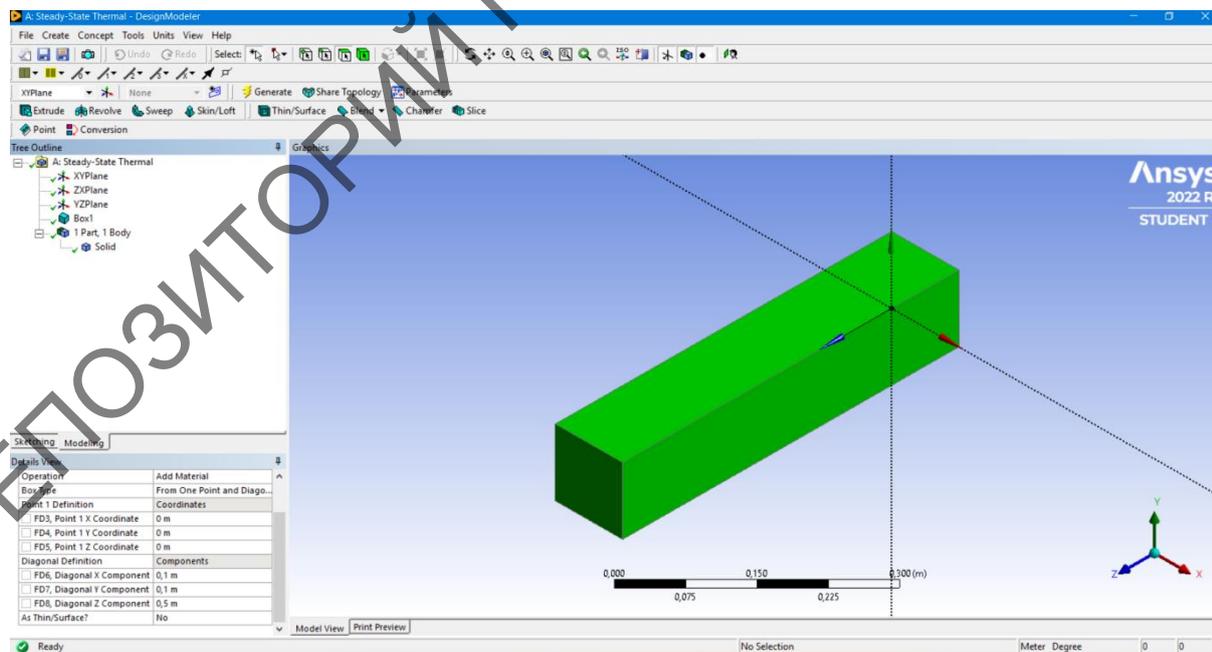


Рисунок 20 – Design Modeler

SpaceClaim Direct Modeler – это многофункциональное приложение для 3D-моделирования, обеспечивающее эффективное решение общих задач моделирования. Программа нацелена на создание и редактирование геометрии. Наглядные и интуитивно понятные инструменты позволяют создавать объекты с целью их многократного использования в последующем. SpaceClaim идеально подходит для инженеров, у которых нет времени на освоение «тяжелых» инструментов системы автоматизированного проектирования (САПР), которые нуждаются в мощном и простом приложении для 3D-моделирования. SpaceClaim позволяет не только эффективно работать со сторонними моделями, но и создавать их самостоятельно. Помимо твердотельного моделирования SpaceClaim имеет в своем арсенале мощные инструменты для обработки результатов 3D-сканирования и подготовки моделей для 3D-печати. В результате применения SpaceClaim можно в короткие сроки получить модель сканируемого изделия и в дальнейшем использовать ее в производстве.

Геометрический процессор Design Modeler основан на ядре Parasolid и обладает возможностями параметризации геометрии. Design Modeler является самостоятельным приложением и запускается через ANSYS WORKBENCH из шаблонов с панели **Toolbox**. Построение геометрической модели происходит путем выполнения последовательности операций, производящих преобразования геометрии. Все этапы построения геометрии хранятся в виде древовидной структуры, что позволяет изменять первоначальные параметры в любой момент создания геометрии. В Design Modeler есть возможность создавать геометрические модели с помощью графических примитивов, операций с ними и их параметрического описания.

Построение твердотельной модели в Design Modeler возможно с помощью комбинации двух вариантов:

- при помощи набора готовых примитивов и применения булевых операций к ним;
- при помощи последовательного иерархического построения элементов модели, начиная с опорных точек, затем линий, сплайнов и далее твердых тел. Design Modeler располагает средствами для импорта геометрических моделей из большинства популярных CAD-систем, а также поддерживает чтение геометрических форматов .iges, .sat, .step и др.

Этапы работы с геометрической моделью имеют структурное представление в виде дерева. Каждый объект в дереве обладает набором свойств, которые могут быть дополнены и отредактированы.

Интерфейс модуля Design Modeler включает следующие окна и панели инструментов.

Главное меню включает набор команд для управления файлами проекта, отображения модели в графическом окне, локальных настроек проекта, выбора единиц измерения, а также набор команд для построения 2D/3D геометрических моделей и справочную информацию о программном продукте. Основные команды главного меню приведены ниже:

- **File** (команды для работы с файлами проекта: сохранение, переименование, импорт, экспорт и т. д.);

- **Create** (инструменты для создания 3D-тел на основе эскизов, а также операции их преобразования (логические операции, удаление, перемещение, масштабирование и т. д.).);

- **Concept** (инструменты концептуального моделирования на основе эскизов: создание точек на плоскости, построение линий по набору точек, создание плоскости на основе эскиза и т. д.);

- **Tools** (расширенный функционал для работы с 3D-моделями, а также средства доработки модели и проведения автоматизированного анализа дефектов геометрии);

- **Units** (выбор единиц измерения);

- **View** (настройки графического отображения модели);

- **Help** (руководство по работе с программным продуктом).

Панели инструментов включают набор инструментов для быстрого доступа к часто используемым командам, выбора элементов геометрии (вершины, ребра, грани, 3D-тела) и опций настройки их отображения в графическом окне.

В модуле Design Modeler существуют два основных режима работы: **Modeling** и **Sketching**, переключение между которыми осуществляется с помощью одноименных вкладок.

В режиме **Modeling** отображается дерево проекта (Tree Outline), которое содержит список декартовых плоскостей в глобальной системе координат, а также все операции, выполненные для построения геометрии, с учетом их взаимосвязей и последовательности добавления в проект. Каждая новая операция представляет собой объект дерева и имеет список свойств и параметров, отображаемых в окне **Details View**. Режим **Sketching** предназначен для построения 2D-эскизов моделей.

Графическое окно (**Graphics**) – рабочее окно проекта, в котором отображается геометрическая модель.

Под графическим окном располагается информационная панель, на которой отображаются информация о выбранных единицах измерения, статусе выполняемой на текущий момент операции и данные о выбранном в графическом окне элементе геометрической сборки.

Разработка геометрической модели начинается с создания начальной геометрии, которая затем преобразуется в окончательную геометрическую модель с помощью функций геометрического процессора. Все действия, выполненные в ходе создания геометрии, отображаются в **Tree Outline** (рисунок 21). В большинстве случаев основой геометрической модели служит двумерный эскиз, который с помощью специальных операций преобразуется в 2D/3D геометрический объект.

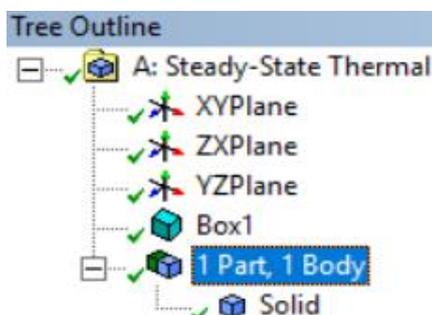


Рисунок 21 – Дерево проекта

На этапе создания геометрии существует возможность импортировать модель, созданную в одной из внешних CAD-систем, исправить (изменить, упростить) данную геометрию с помощью модуля **Design Modeler** и подготовить ее для построения расчетной сетки с учетом выбранного типа численного анализа.

Для обзора настроек импорта моделей добавим в окно **Project Schematic** шаблон Geometry. Большая часть настроек импорта моделей из CAD-систем находится в разделах Basic Geometry Options и Advanced Geometry Options окна **Properties** (рисунок 22).

В основных настройках указываются типы передаваемых при импорте объектов (3D-тела, поверхности, линии), а также опции импорта параметризованных геометрических моделей из CAD-систем.

В разделе Advanced Geometry Options находятся параметры, определяющие:

- тип анализа (Analysis Type): 2D или 3D;
- ассоциативность (Use Associativity) для передачи свойств материалов, граничных условий и нагрузок на модель, заданных в сторонней CAD-системе;
- импорт системы координат (Import Coordinate);
- «умное» обновление CAD (SmartCADUpdate): опция предполагает, что если в CAD были изменены некоторые части сборки, то в Design Modeler при повторном импорте осуществляется обновление только измененных частей.

Properties of Schematic C2: Geometry		
	A	B
1	Property	Value
2	[-] General	
3	Component ID	Geometry 2
4	Directory Name	Geom
5	[-] Notes	
6	Notes	
7	[-] Used Licenses	
8	Last Update Used Licenses	
9	[-] Basic Geometry Options	
10	Solid Bodies	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Surface Bodies	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Line Bodies	<input type="checkbox"/>
13	Parameters	Independent
14	Parameter Key	ANS;DS
15	Attributes	<input type="checkbox"/>
16	Named Selections	<input type="checkbox"/>
17	Material Properties	<input type="checkbox"/>
18	[-] Advanced Geometry Options	
19	Analysis Type	3D
20	Use Associativity	<input checked="" type="checkbox"/>
21	Import Coordinate Systems	<input type="checkbox"/>
22	Import Work Points	<input type="checkbox"/>
23	Reader Mode Saves Updated File	<input type="checkbox"/>
24	Import Using Instances	<input checked="" type="checkbox"/>
25	Smart CAD Update	<input checked="" type="checkbox"/>
26	Compare Parts On Update	No
27	Enclosure and Symmetry Processing	<input checked="" type="checkbox"/>
28	Decompose Disjoint Geometry	<input checked="" type="checkbox"/>
29	Clean Geometry On Import	<input type="checkbox"/>
30	Stitch Surfaces On Import	None
31	Mixed Import Resolution	None
32	Import Facet Quality	Source

Рисунок 22 – Окно настроек импорта моделей

WORKBENCH поддерживает следующие версии CAD-пакетов: AutoCAD 2012+, Autodesk Inventor 2012, Creo Elements/Direct Modeling 18.0, Creo Parametric (Pro/ENGINEER), NX 8.0, Parasolid 24.0, SolidEdgeST4 (104), SolidWorks 2011, ANSYS SpaceClaim Direct Modeler 2011+, Teamcenter 8.0, 8.1 и 8.3, CATIA.

Существуют два типа импорта CAD-моделей в проект WORKBENCH: на основе однонаправленной и двунаправленной связей. Однонаправленная связь осуществляется с помощью следующих способов (рисунок 23):

– команды главного меню: File => Import в окне проекта ANSYS WORKBENCH;

– команды **Import Geometry**, вызываемой через контекстное меню компонента **Geometry** в окне **Project Schematic**;

– в окне приложения **Design Modeler** с помощью команды **File => Import External Geometry File**, позволяющей импортировать несколько файлов с геометрическими моделями одновременно.

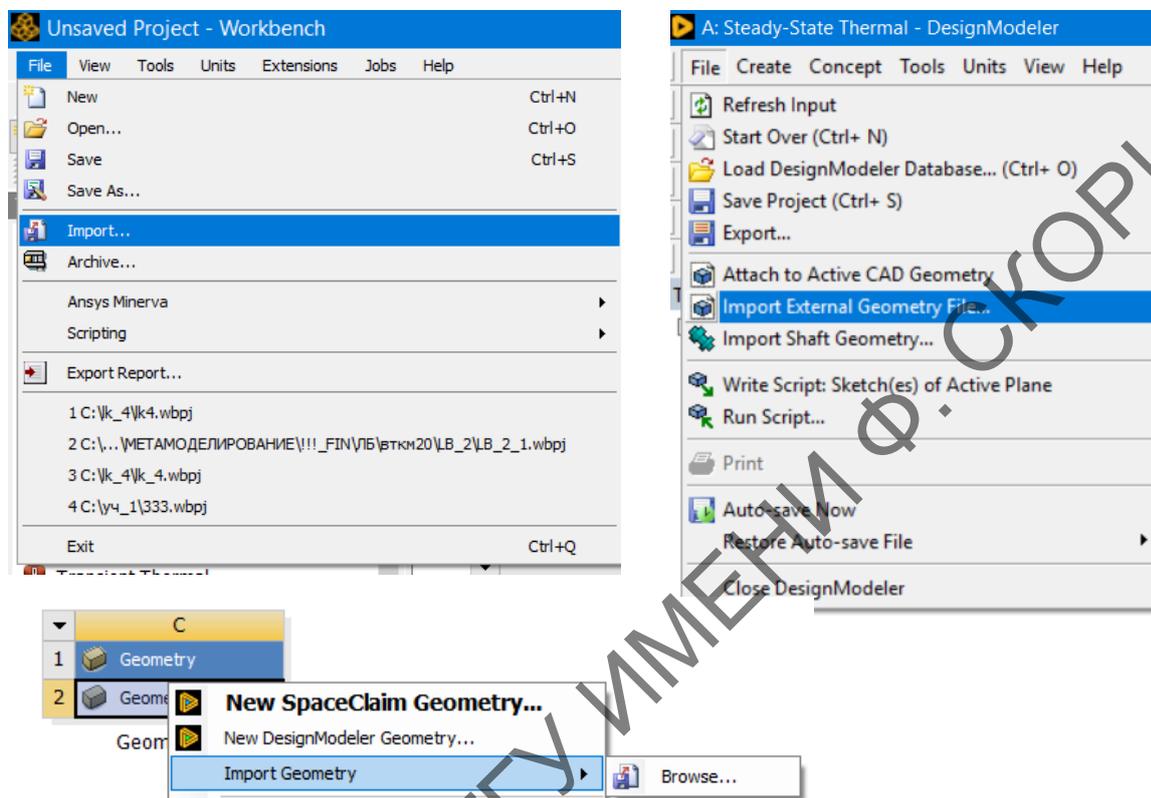


Рисунок 23 – Способы импорта CAD-геометрии

Двунаправленная связь осуществляется при вызове приложения ANSYS WORKBENCH через CAD-систему и позволяет экспортировать параметры из CAD в ANSYS WORKBENCH, а также автоматически отслеживать изменения модели, выполненные на одной из сторон связи (в CAD-системе или в ANSYS WORKBENCH).

3.3 Формирование конечно-элементной модели

ANSYS WORKBENCH имеет несколько инструментов для построения конечно-элементных сеток. В зависимости от типа решаемой задачи могут быть применены следующие сеточные препроцессоры:

1) ANSYS Meshing – универсальный 2D/3D-сеточный препроцессор, позволяющий воспроизводить структурированные и неструктурированные сетки на основе призматических, гекса- и тетраэлементов.

Для 2D-областей генератор позволяет строить сетки на основе четырех- и треугольных элементов. Преимуществом сеточного препроцессора Meshing является его тесная интеграция в среду WORKBENCH;

2) ANSYS TurboGrid предназначен для автоматического построения качественных гексаэдральных сеток для различных типов лопаточных машин (гребные винты, лопасти вентиляторов, крыльчатки осевых насосов и т. д.);

3) ANSYS ICEM CFD – один из мощных современных сеточных генераторов, позволяющих расширить функционал препроцессоров ANSYS Meshing. Включает инструменты для обработки сложных геометрий и сборок, исправления дефектов модели, построения высококачественных сеток на основе гекса- и тетраэлементов. Сеточный генератор включает набор методов для контроля за качеством расчетных ячеек и совместим с популярными геометрическими форматами. ANSYS ICEM CFD представляет собой независимый от ANSYS WORKBENCH препроцессор, который может быть вызван как отдельно, так и из-под ANSYS WORKBENCH.

Рассмотрим основы работы в сеточном препроцессоре Meshing. Сеточный препроцессор Meshing полностью интегрирован в ANSYS WORKBENCH и позволяет создавать конечно-элементные сетки для различных типов инженерного анализа. Работа в Meshing концептуально повторяет процесс создания геометрических моделей в Design Modeler, описанный выше. Ниже рассмотрим основные особенности работы в препроцессоре Meshing.

Сеточный препроцессор Meshing может быть запущен через интерфейс среды WORKBENCH двумя способами.

Первый способ подразумевает использование препроцессора как отдельного компонента, который в дальнейшем может быть связан с одним или несколькими другими модулями. Для этого необходимо найти на панели Component System в **Toolbox** компонент **Mesh** и дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на компоненте или, зажав левую кнопку мыши, «протянуть» компонент с панели инструментов в рабочее пространство проекта **Project Schematic**. Далее необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по добавленному в проект компоненту **Mesh** (или вызвать контекстное меню компонента через правую кнопку мыши и выбрать пункт **Edit**) для вызова сеточного генератора (рисунок 24).

Второй способ подразумевает использование сеточного препроцессора в рамках готовых шаблонов, предназначенных для расчетов задач гидродинамики, электромагнетизма, механики деформируемого твердого тела и т. д.

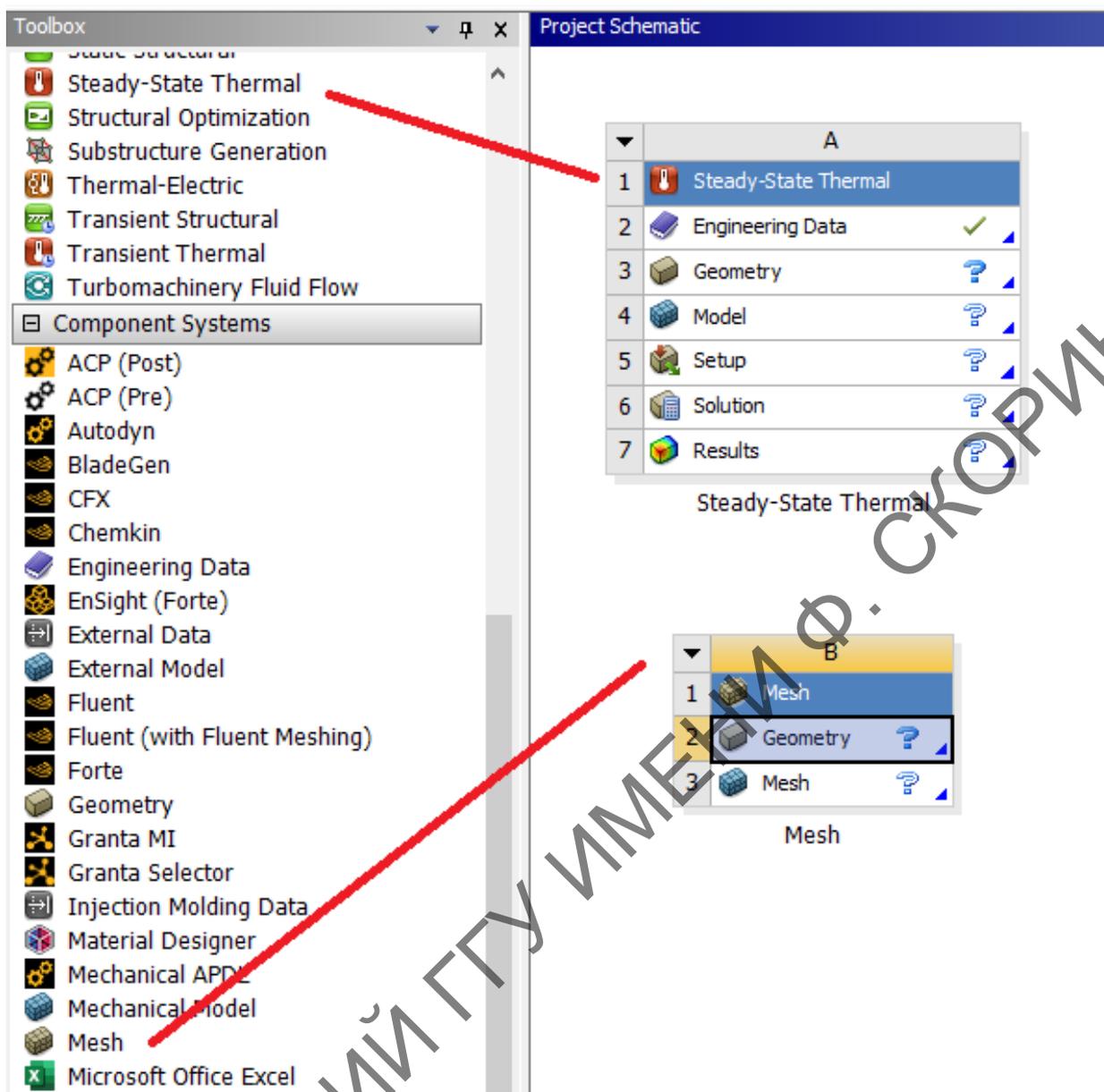


Рисунок 24 – Способы запуска Meshing

Как уже отмечалось, готовые шаблоны расположены на панели Analysis System в **Toolbox**. Для добавления шаблона в окно проекта необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на шаблоне или, зажав левую кнопку мыши, «протянуть» шаблон с панели инструментов в рабочее пространство проекта (рисунок 24). Далее необходимо двойным щелчком левой кнопки мыши выбрать этап **Mesh** в добавленном шаблоне.

Для генерации сетки конечных элементов запустим Steady-State Thermal Mechanical (рисунок 25). Steady-State Thermal Mechanical является универсальной оболочкой для различных решателей и обладает удобным графическим интерфейсом (по сравнению с оболочкой

ANSYS Mechanical APDL). При этом ANSYS Mechanical APDL может выполнять роль вспомогательной среды моделирования, обладая более широкими возможностями. Ее целесообразно применять в тех случаях, когда задача не может быть решена только средствами ANSYS WORKBENCH.

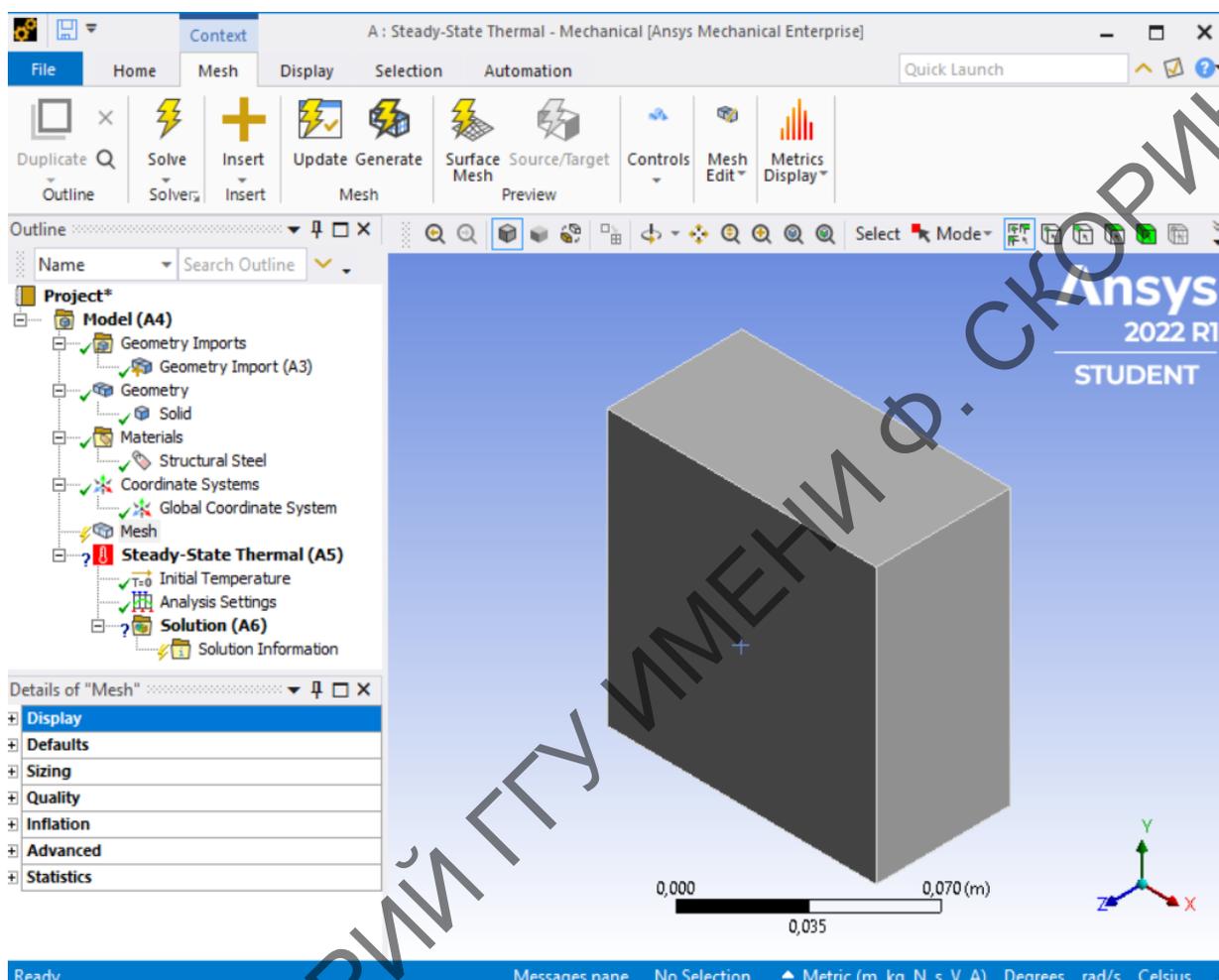


Рисунок 25 – Интерфейс приложения Steady-State Thermal Mechanical

Расчетная модель, созданная в Steady-State Thermal Mechanical, имеет представление на макроязыке APDL и может быть использована для проведения расчета в ANSYS Mechanical APDL. Передача модели из ANSYS WORKBENCH Mechanical в ANSYS Mechanical APDL осуществляется через текстовый файл, содержащий набор команд APDL (рисунок 26). Имеется возможность обратной передачи геометрической модели, сетки и результатов расчета из ANSYS Mechanical APDL в ANSYS WORKBENCH Mechanical.

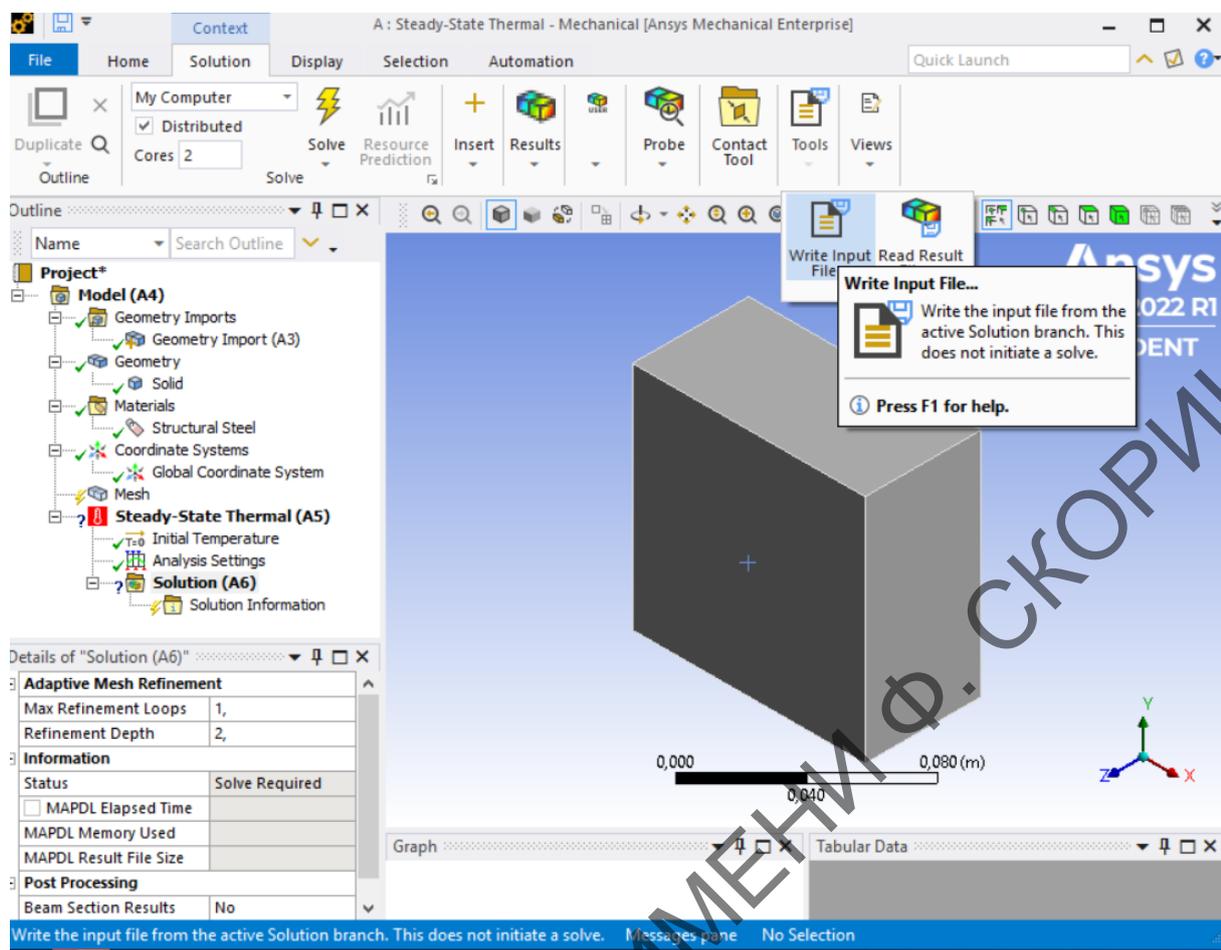


Рисунок 26 – Формирование APDL-файла для передачи модели из ANSYS WORKBENCH Mechanical в ANSYS Mechanical

Интерфейс приложения WORKBENCH Mechanical имеет структуру, аналогичную интерфейсам приложений Design Modeler. Многие элементы интерфейса в этих приложениях являются идентичными, например, инструменты управления видом модели, выбором режима выделения геометрических объектов и т. д. Однако ряд инструментов и элементов интерфейса зависит от используемого приложения. Интерфейс модуля Steady-State Thermal Mechanical состоит из главного меню, панели инструментов, окна дерева проекта, окна свойств и графического окна.

Расчетная модель в интерфейсе Steady-State Thermal Mechanical представляется в виде древовидной структуры со множеством разделов и объектов и расположена в окне **Outline** графического интерфейса Steady-State Thermal Mechanical (рисунок 27). Расчетная модель создается путем наполнения дерева проекта объектами, а объектов – информацией.

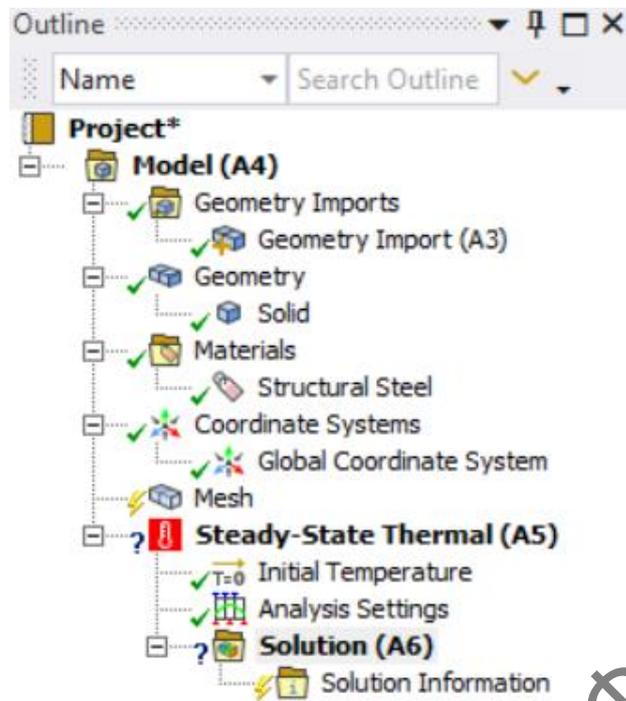


Рисунок 27 – Дерево проекта для модуля Steady-State Thermal Mechanical

Чтобы задать структуру сетки и форму ее ячеек, необходимо воспользоваться одним из интегрированных в Meshing методов. Доступ к методам осуществляется через контекстное меню компонента **Mesh** в дереве **Outline** (Mesh => Insert => Method) (рисунок 28) или через кнопку **Mesh Control** => **Method** на панели инструментов **Mesh**, которая появляется в разделе Toolbars при выделении левой кнопкой мыши.

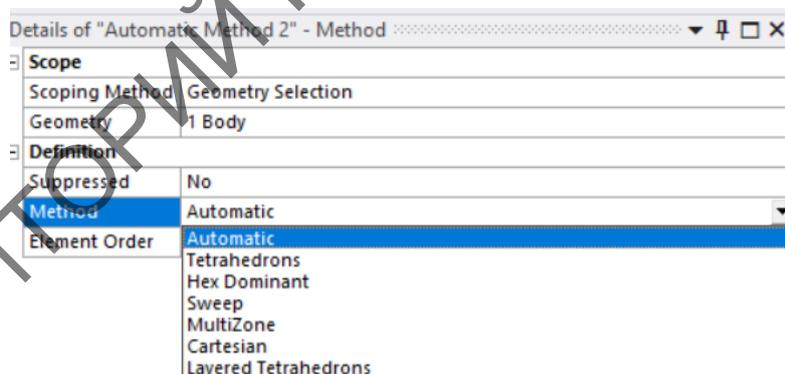


Рисунок 28 – Выбор методов интегрированных в Meshing

Для построения расчетной сетки в Meshing необходимо задать глобальные и (или) локальные настройки, которые будут определять характеристики сетки: структуру сетки, форму, размер и деформации элементов. Глобальные настройки определяют характеристики сетки

для всей модели, в то время как локальные настройки позволяют задать индивидуальные свойства отдельным группам сеточных элементов в модели. Локальные настройки в большинстве случаев имеют более высокий приоритет, чем глобальные.

Доступ к глобальным настройкам сетки осуществляется через окно **Details of Mesh**, открывающееся при выделении компонента **Mesh** дерева **Outline**. На рисунке 29 показано окно глобальных настроек с выпадающими списками параметров.

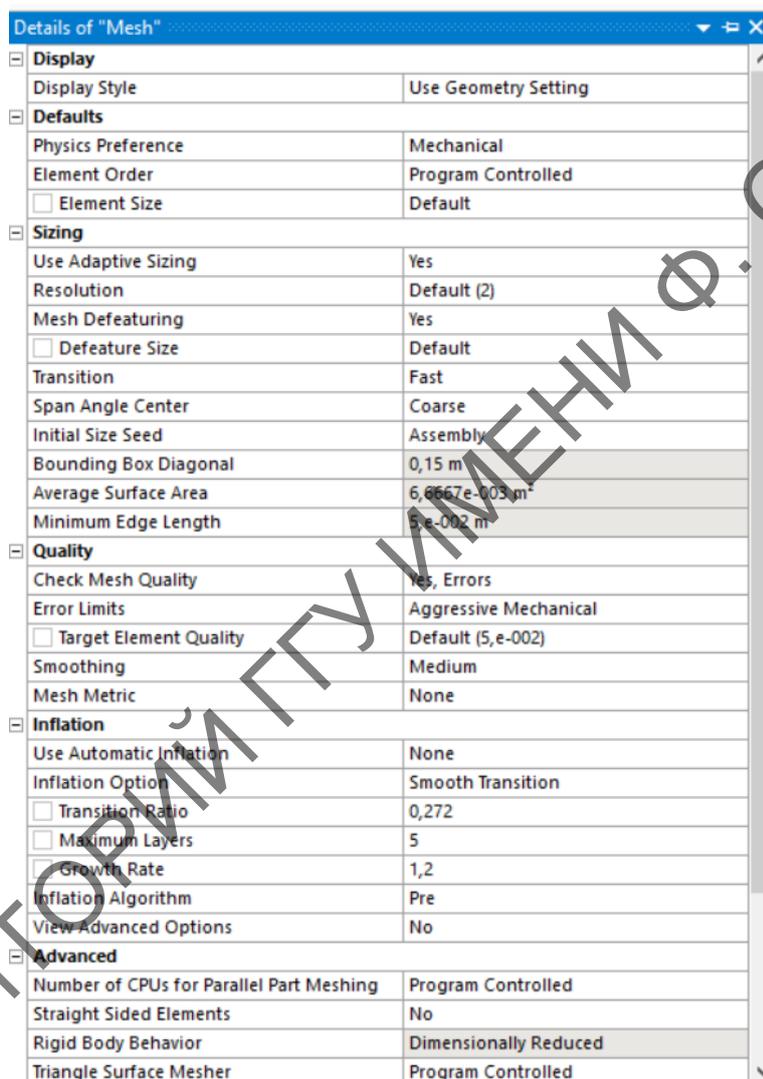


Рисунок 29 – Окно глобальных настроек сетки в Meshing

Инструменты для настройки локальных параметров сетки доступны через контекстное меню компонента **Mesh** дерева **Outline**: **Mesh** => **Insert** (рисунок 30). Локальные настройки позволяют задать свойства расчетной сетки для отдельных частей геометрической модели (3D-тела, поверхности, ребра).

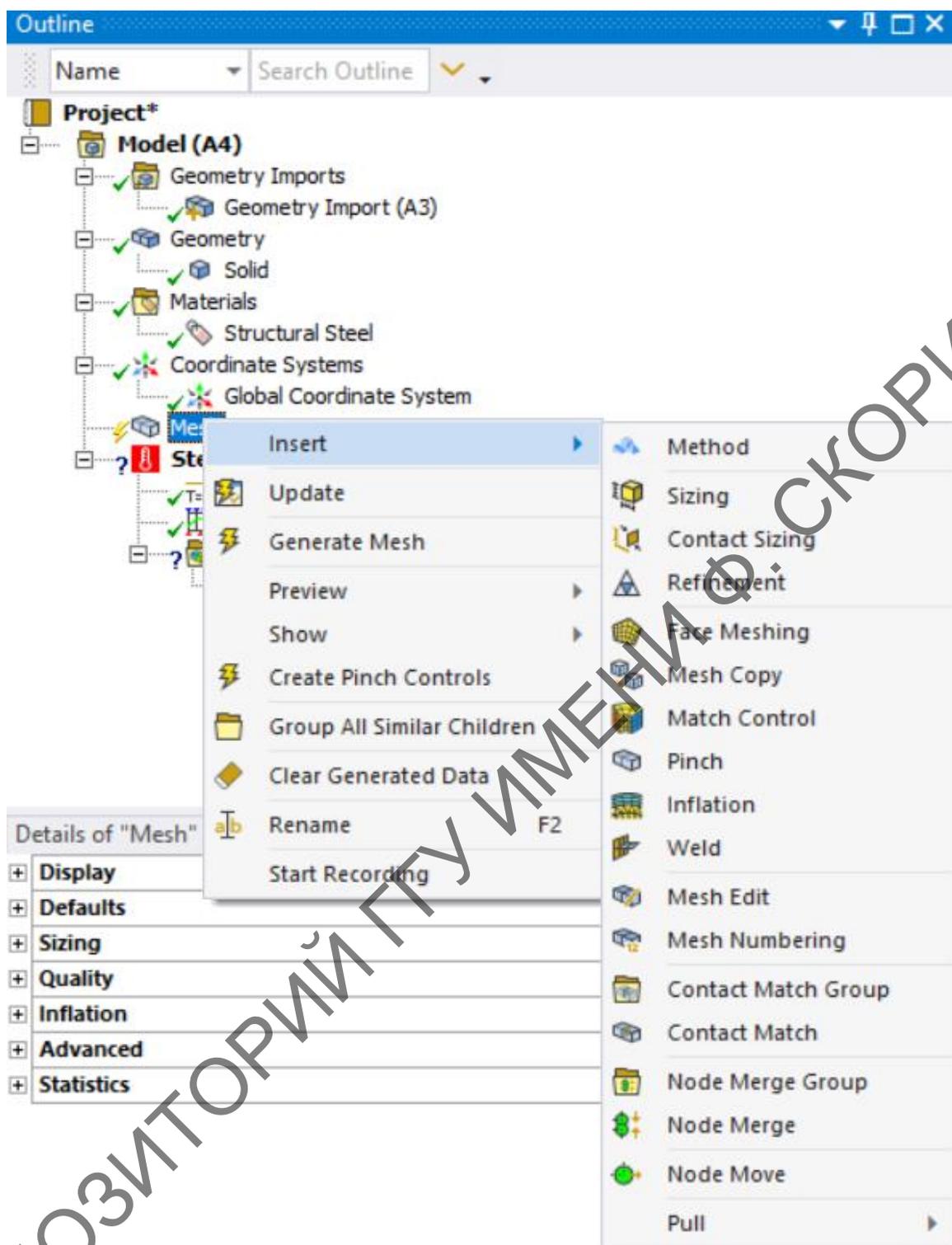


Рисунок 30 – Доступ к инструментам для настройки локальных параметров сетки

Для генерации сетки конечных элементов (КЭ) нужно выбрать правой кнопкой мыши пункт дерева проекта **Mesh** и далее – **Generate Mesh**. Полученная сетка КЭ представлена на рисунке 31.

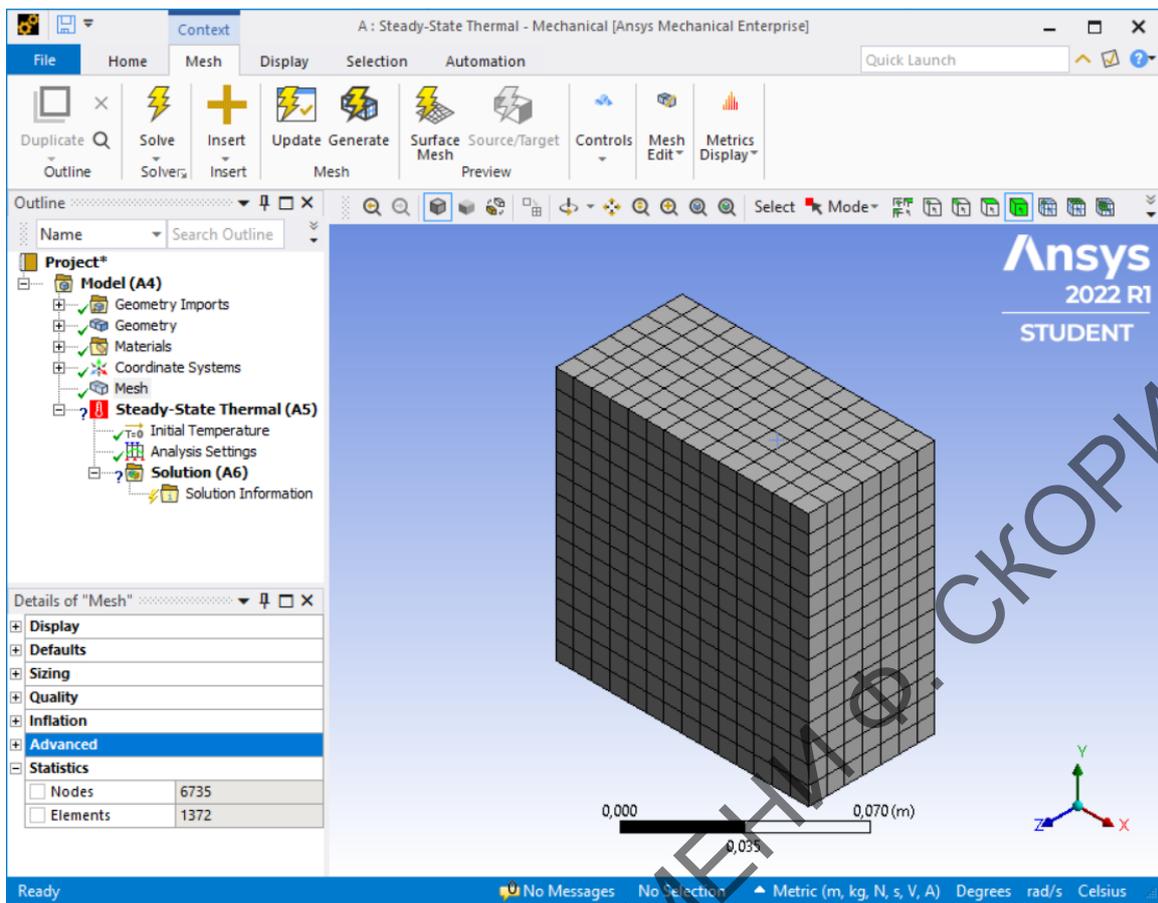


Рисунок 31 – Конечно-элементная модель образца

3.4 Задание граничных условий и нагрузок

Следующим этапом подготовки к проведению расчета является определение внешних воздействий (механических, тепловых и т. д.) на конструкцию. Обычно внешнее воздействие определяется на границе созданной модели. Под терминами «ограничение» и «нагрузка» понимаются все разнообразные процессы, которые происходят как на поверхностях твердого тела, так и в отдельных точках внутри него. «Ограничением» в ANSYS WORKBENCH – это закрепление, то есть ограничение перемещений и вращений в структурном анализе, либо определение температуры при решении задач теплообмена, а «нагрузка» – приложение сосредоточенных или распределенных сил (структурный анализ) или тепловых потоков (задачи теплообмена) и т. д.

При задании граничных условий и нагрузок используется раздел дерева проекта, который носит название того расчетного модуля, используемого в качестве решателя, например Steady-State Thermal (рисунок 25). Граничные условия добавляются с помощью контекстного меню раздела (Insert) или кнопок панелей инструментов (рисунок 32).

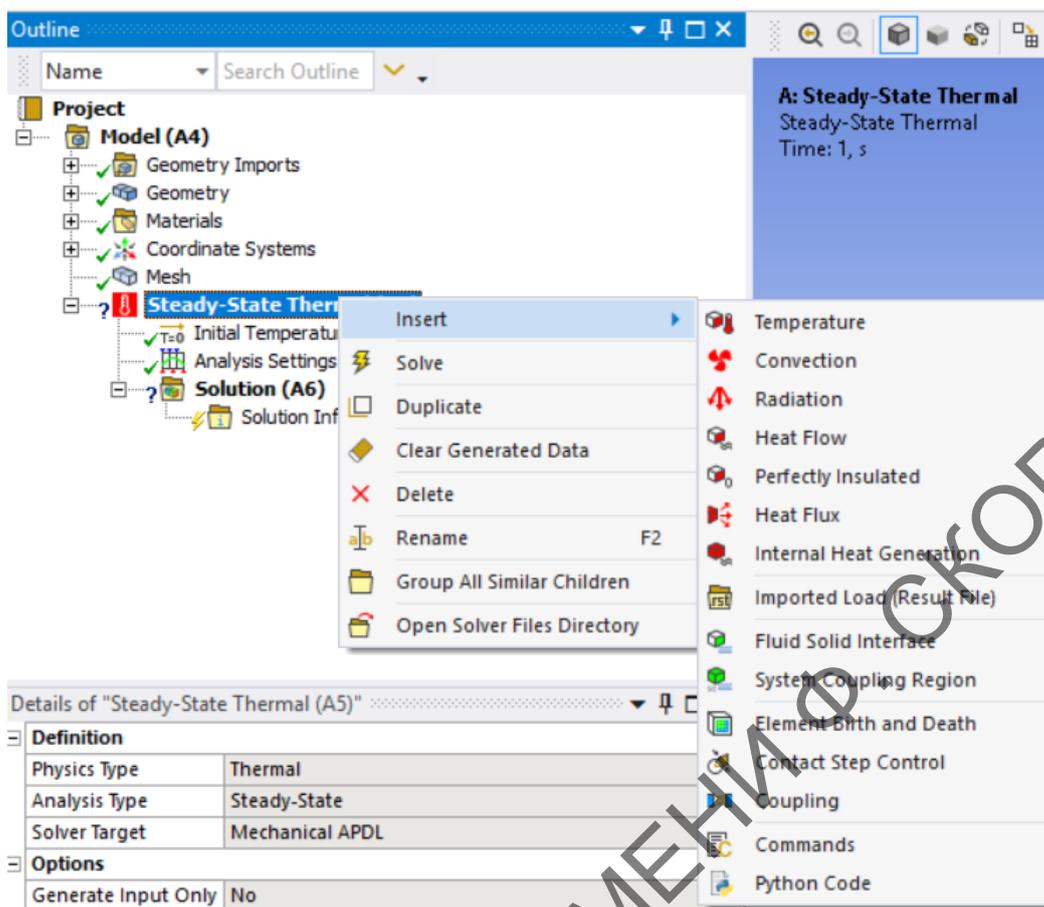


Рисунок 32 – Контекстное меню раздела Insert

При выполнении теплового анализа могут быть заданы следующие граничные условия:

- температура (**Temperature**);
- конвективный теплообмен с окружающей средой (**Convection**);
- излучение (**Radiation**);
- тепловой поток (**Heat Flow**);
- плотность теплового потока (**Heat Flux**);
- внутренний источник тепла (**Internal Heat Generation**);
- отсутствие тепловых потоков (**Perfectly Insulated**).

Практически у всех нагрузок есть параметр **Geometry**, который указывает на объект приложения: точку, ребро, грань, тело. Для задания этого параметра нужно выделить необходимый(-е) объект(-ы) и, щелкнув мышью на его поле в окне детализации, подтвердить свой выбор нажатием кнопки **Apply**. Возможна и обратная последовательность: сначала выполняется щелчок мышью в поле параметра **Geometry**, а затем – выделение объектов и подтверждение выбора нажатием кнопки **Apply**.

Для большинства типов нагрузок значение может задаваться тремя способами:

- в виде фиксированного значения (**Constant**);
- в табличной форме (**Tabular**);
- в виде функциональной зависимости (**Function**).

По умолчанию задается фиксированное значение величины. Выбор способа задания нагрузки осуществляется щелчком мыши по стрелке в правой части окна ввода численного значения и последующим выбором одного из вариантов (рисунок 33).

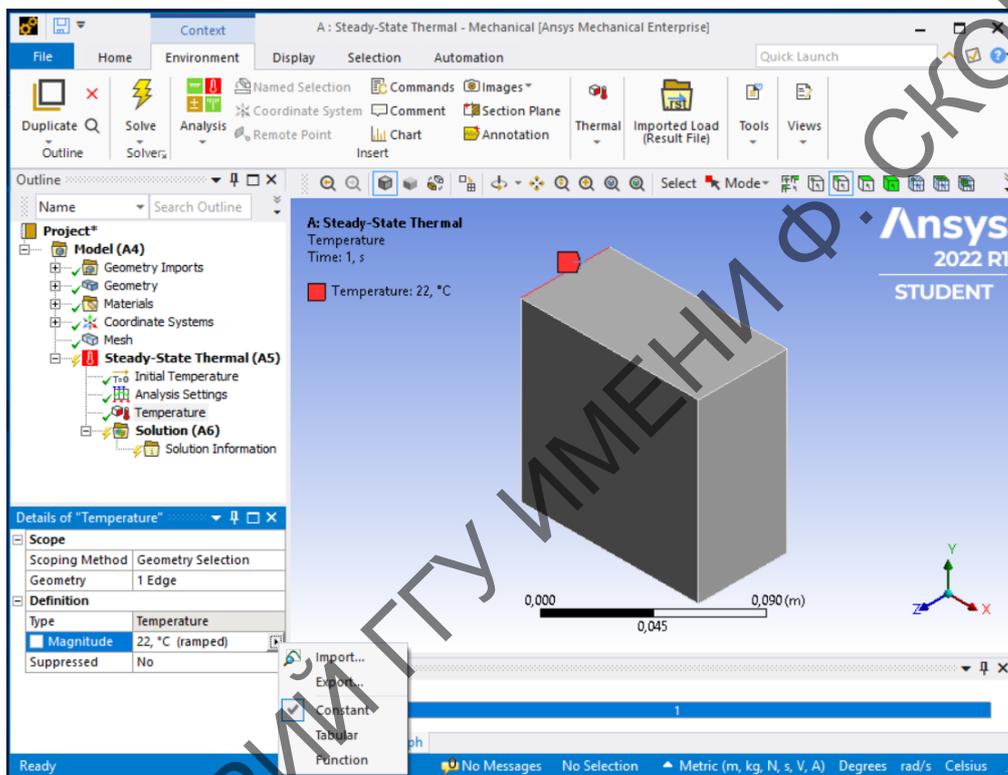


Рисунок 33 – Выбор способа задания нагрузки

3.5 Выполнение расчета и вывод результатов

Параметры и опции решателя устанавливаются в разделе дерева проекта. Все они разделены на группы, количество и состав которых зависит от типа текущего инженерного анализа. Для стационарного теплового анализа (Steady-State Thermal) настройки решателя представлены на рисунке 34.

Запуск решателя в WORKBENCH выполняется нажатием кнопки с символом молнии на панели инструментов.

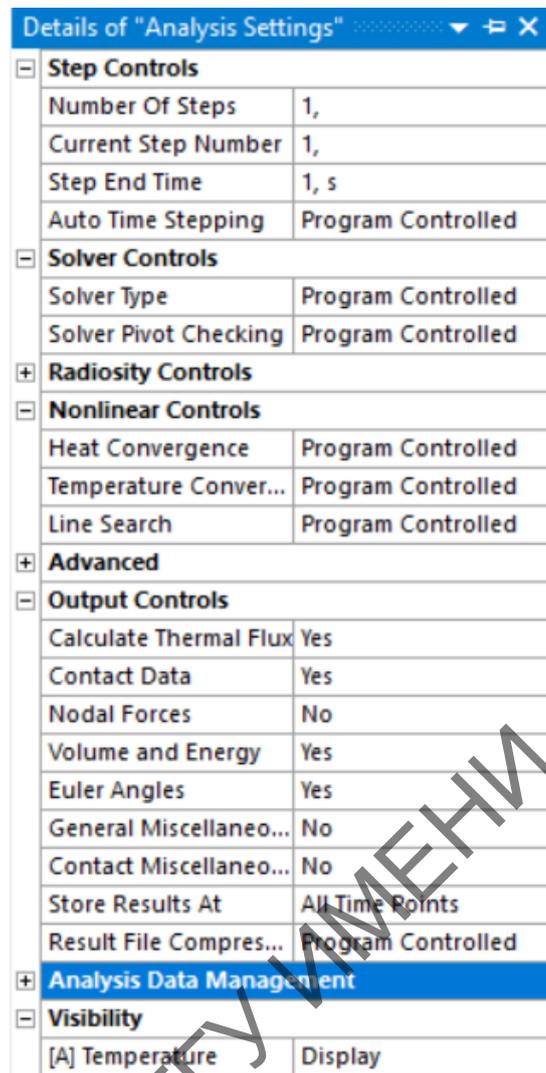


Рисунок 34 – Настройки решателя

После этого выводится окно, в котором отображается общий ход процесса вычислений.

Кнопки в указанном окне позволяют при необходимости остановить работу решателя (Stop Solution) или прервать вычисления с сохранением возможности продолжения расчетов (Interrupt Solution).

В ANSYS WORKBENCH все результаты вычисляются в группе Solution. Это могут быть как распределения полей исследуемых величин по всей модели или ее части, так и графики зависимости каких-либо параметров от времени или координаты.

Вставка результатов может быть выполнена двумя способами: через контекстное меню, вызываемое нажатием левой кнопки мыши на группе Solution в дереве проекта (рисунок 35), или путем выбора нужного элемента на панели инструментов в верхней части рабочего окна. Эта операция может быть выполнена как до запуска решателя, так и после.

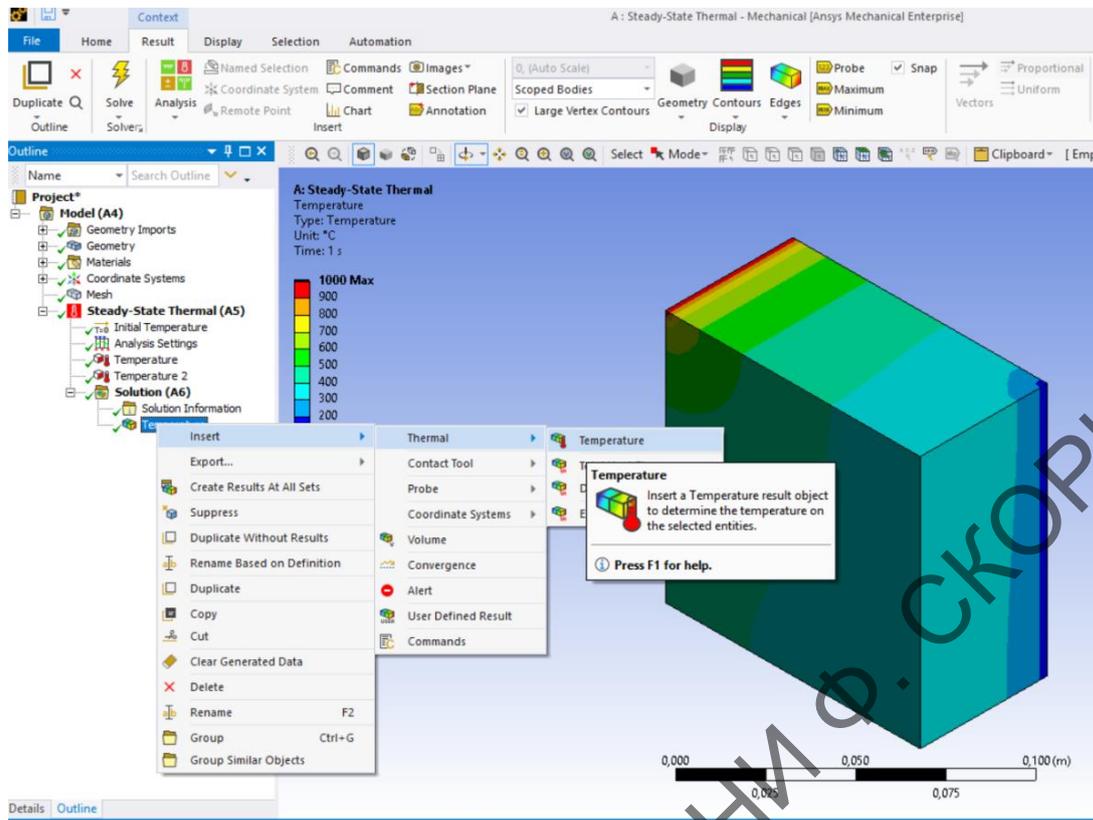


Рисунок 35 – Вставка результатов расчета

В ANSYS WORKBENCH есть встроенные возможности для формирования отчета о проведенном моделировании. Чтобы перейти к формированию отчета, необходимо найти вкладку **Report Preview** и активировать ее (рисунок 36).

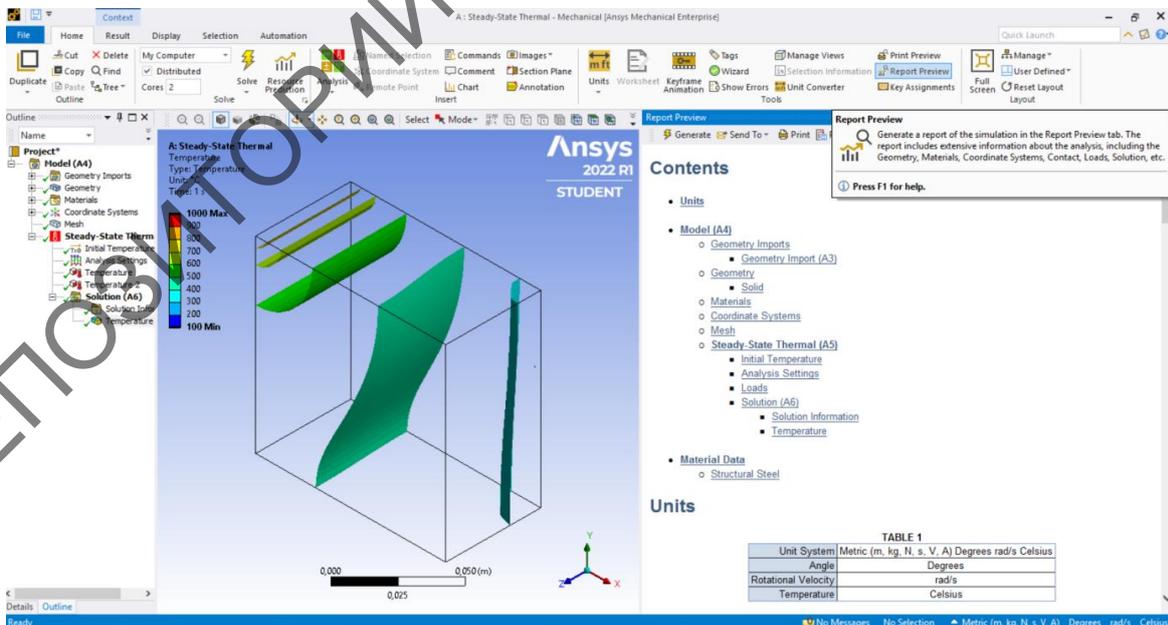


Рисунок 36 – Формирование отчета

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите основные модули и приложения, используемые в ANSYS WORKBENCH для работы с проектом.
2. Какие файлы формируются при работе с комплексом?
3. Опишите структуру проекта статического прочностного анализа Steady-State Thermal.
4. Каковы основные задачи можно решать с использованием LOG-файла?

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова [и др.]. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 210 с.
2. Оконечников, А. С. Прочностные и динамические расчеты в программном комплексе ANSYS WORKBENCH : учебное пособие / А. С. Оконечников, Д. О. Сердюк, Г. В. Федотенков. – М. : Изд-во МАИ, 2021. – 104 с.
3. Chen, X. Finite element modeling and simulation with ANSYS WORKBENCH / X. Chen, Y. Liu. – CRC press, 2018. – 473 p.
4. Инженерный анализ в ANSYS WORKBENCH : учебное пособие / В. А. Бруйка [и др.]. – Самара : СамГТУ, 2010. – 271 с.
5. Алексеев, В. Ф. Программное обеспечение инженерного моделирования физических процессов. Лабораторный практикум: в 2 ч. Ч. 1 : Тепловые режимы работы и защиты конструкций РЭС от механических воздействий : пособие / В. Ф. Алексеев, И. Н. Богатко, Г. А. Пискун. – Минск : БГУИР, 2017. – 124 с.
6. Пронин, В. А. Введение в расчетную платформу ANSYS WORKBENCH : лабораторные работы : Ч. 1 / В. А. Пронин, Д. В. Жигновская, В. А. Цветков. – СПб. : Университет ИТМО, 2019. – 46 с.
7. Елисеев, К. В. Вычислительный практикум в современных САЕ-системах : учебное пособие / К. В. Елисеев, Т. В. Зиновьева. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 112 с.
8. Введение в технологии компьютерного моделирования. Оболочка ANSYS WORKBENCH : практическое пособие / сост. Ю. В. Никитюк. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2020. – 34 с.
9. Иванов, Д. В. Введение в ANSYS WORKBENCH : учебно.-методическое пособие / Д. В. Иванов, А. В. Доль. – Саратов : Амирит, 2016. – 56 с.
10. Компьютерное конечно-элементное моделирование : пособие: в 2 ч. / В. В. Напрасников [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – Ч. 2. – 79 с.

Производственно-практическое издание

Никитюк Юрий Валерьевич,
Прохоренко Владислав Александрович,
Серда Андрей Александрович

**ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИИ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.
ANSYS WORKBENCH**

Практическое руководство

Редактор А. А. Банчук
Корректор В. В. Калугина

Подписано в печать 23.10.2023. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,8.

Тираж 15 экз. Заказ 546.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования

«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.

Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.

Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.