

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

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

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
2024

УДК 004.94(076)
ББК 32.818я73
В24

Авторы:

Ю. В. Никитюк, А. А. Середа,
Г. А. Баевич, А. В. Максименко

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»

Введение в технологии компьютерного моделирования.
В24 **Ansys DesignXplorer : практическое руководство / Ю. В. Никитюк**
[и др.] ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ
им. Ф. Скорины, 2024. – 36 с.
ISBN 978-985-32-0046-1

В практическом руководстве рассмотрены примеры реализации в модуле Ansys DesignXplorer программного комплекса Ansys 2021R1 Academic задачи многокритериальной оптимизации. Издание может быть использовано при выполнении лабораторных работ. Также оно позволит получить навыки работы в Ansys DesignXplorer при самостоятельном изучении.

Адресовано студентам 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)».

УДК 004.94(076)
ББК 32.818я73

ISBN 978-985-32-0046-1

© Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Задача 1. Проведение параметрического исследования «Что, если?» в Ansys Workbench.....	5
1.1 Постановка задачи.....	5
1.2 Реализация задачи при помощи графического интерфейса Ansys Workbench.....	6
Задача 2. Проведение оптимизации в Ansys DesignXplorer.....	18
2.1 Введение.....	18
2.2 Постановка задачи.....	19
2.3 Реализация задачи при помощи графического интерфейса Ansys Workbench.....	20
Литература.....	36

ВВЕДЕНИЕ

В ходе изучения дисциплины «Введение в технологии компьютерного моделирования» студенты получают навыки компьютерного моделирования физических процессов с использованием современных программных средств.

В настоящее время широко применяются компьютерные модели для анализа сложных систем в процессе проектирования современных изделий и технологий. Однако для реализации таких моделей, использующих численные методы, например, метод конечных элементов, требуется значительное количество времени на вычисления. Одним из способов сокращения времени моделирования является использование суррогатных моделей, которые также известны как метамодел. Эти модели могут заменить вычислительно затратные конечно-элементные модели. Одним из современных программных средств для реализации технологии метамоделирования является модуль Design Exploration программного комплекса Ansys.

Приобретение навыков работы с данным программным продуктом осуществляется посредством выполнения студентами лабораторных работ. Практическое пособие содержит пример реализации задачи оптимизации в Ansys DesignXplorer.

Пособие может быть использовано при выполнении лабораторных работ, а также оно позволит получить навыки работы в Ansys DesignXplorer при самостоятельном изучении.

ЗАДАЧА 1

ПРОВЕДЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ «ЧТО, ЕСЛИ?» В ANSYS WORKBENCH

1.1 Постановка задачи

Данный пример позволяет познакомиться с возможностями пакета Ansys Workbench для проведения параметрического исследования «Что, если?» Исследование «Что, если?» выполняется по списку заданных вручную расчётных точек. Для проведения таких исследований модуль DesignXplorer не нужен. При этом исследование «Что, если?» позволяет получить предварительную информацию, которую затем можно использовать в модуле DesignXplorer для проведения дальнейших исследований.

Прицепное устройство, созданное в ANSYS DesignModeler, состоит из трех частей (рисунок 1). На рисунке 1 также показаны нагрузки и ограничения, приложенные к прицепному устройству.

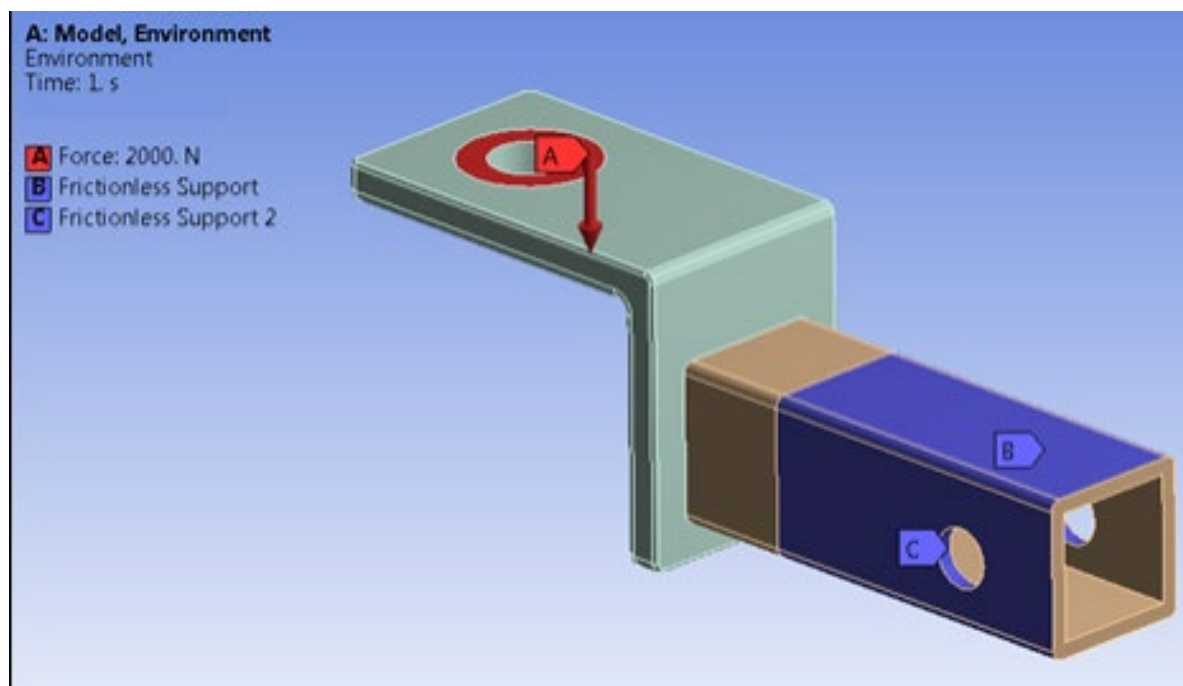


Рисунок 1 – Прицепное устройство

На рисунке 2 показаны геометрические размеры прицепного устройства, которые при выполнении работы будут использованы в ка-

честве входных параметров. При этом значения массы прицепного устройства, напряжений и деформаций, формируемых при приложении нагрузки, будут использоваться в качестве выходных параметров.

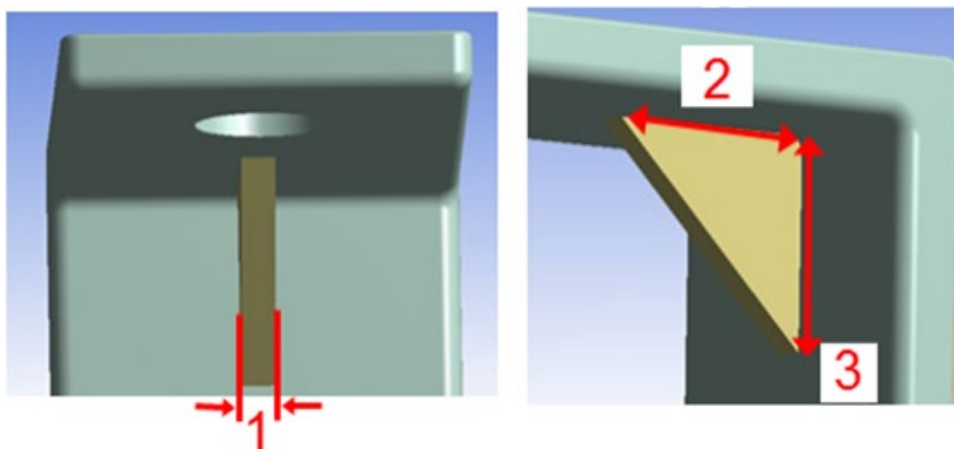


Рисунок 2 – Геометрические параметры прицепного устройства, используемые в качестве входных параметров модели

1.2 Реализация задачи при помощи графического интерфейса Ansys Workbench

1. Решение задачи начинается с запуска Ansys Workbench, который выполняется из основного меню Пуск → Программы → Ansys 2020R1 → Workbench 2020R1.

2. Выбираем File → Open. Затем в появившемся окне выбираем файл с именем receiver.wbpz. Сохраняем проект с именем receiver и расширением wbpj. В результате в окне Project Schematic появится аналитический блок, который будем использовать в качестве заготовки для нашей модели (рисунок 3).

3. Дважды нажимаем на ячейку Geometry. В открывшемся окне DesignModeler появится модель прицепного устройства. В окне Tree Outline выбираем Gusset. Далее в Details View устанавливаем флажок на FD1, Depth, чтобы сделать его входным параметром. После этого появится диалоговое окно для указания имени параметра. Укажите имя thick_ds (рисунок 4).

4. В окне Tree Outline выбираем YZPlane. В YZPlane выбираем Sketch4, в разделе Dimensions, как и в пункте 3, устанавливаем флажки на H6 (name – horiz_ds) и V7 (name – vert_ds) (рисунки 5,6). Закрываем DesignModeler.

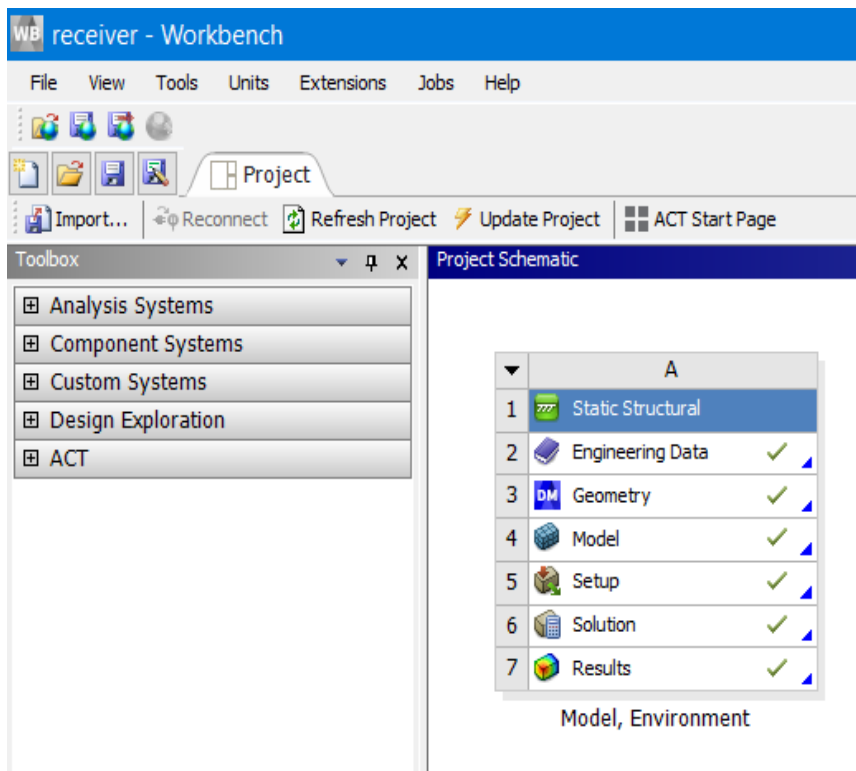


Рисунок 3 – Результаты импорта модели

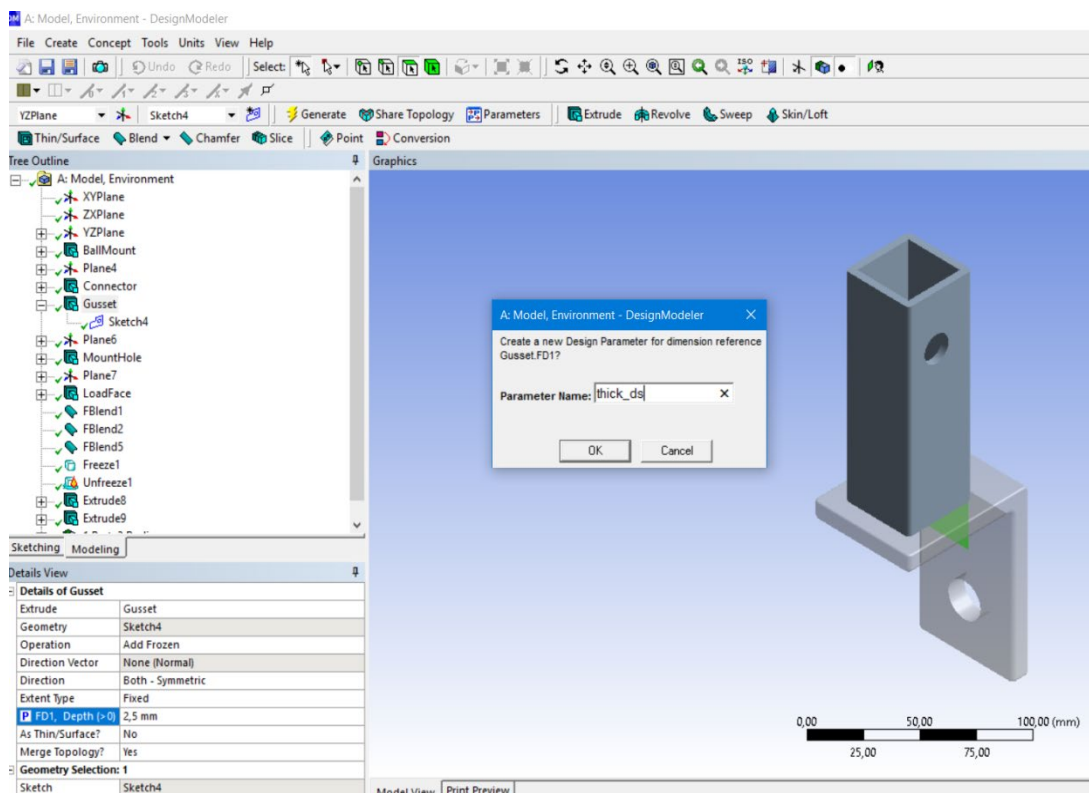


Рисунок 4 – Задание параметра thick_ds

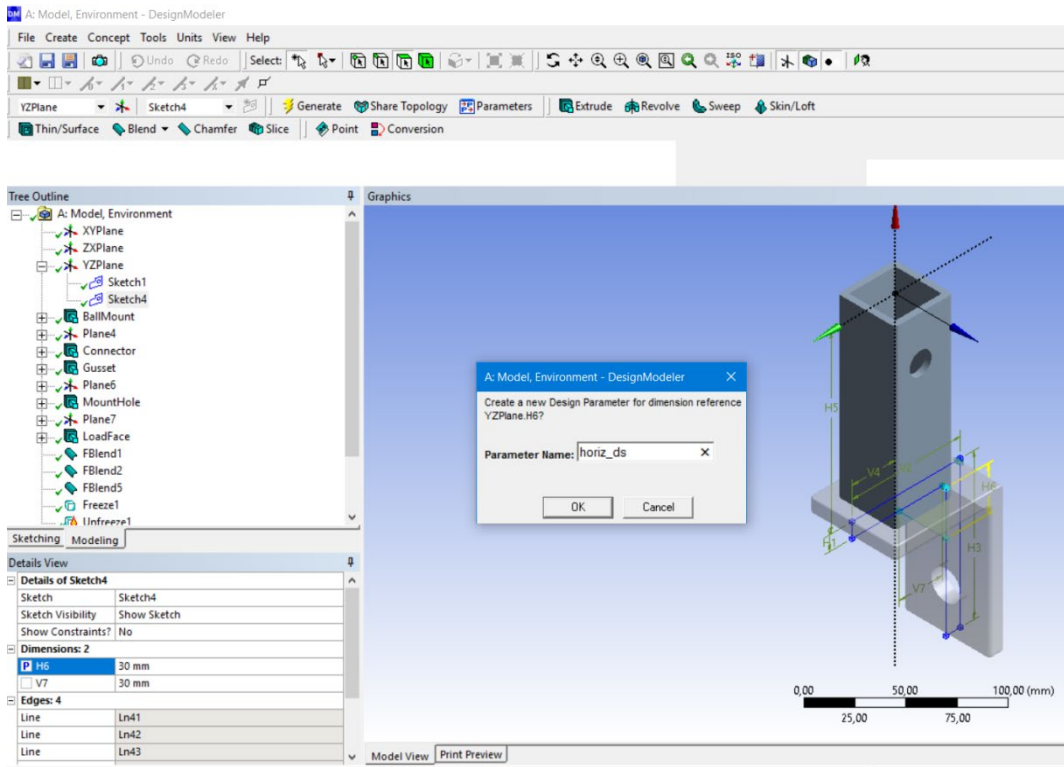


Рисунок 5 – Задание параметра horiz_ds

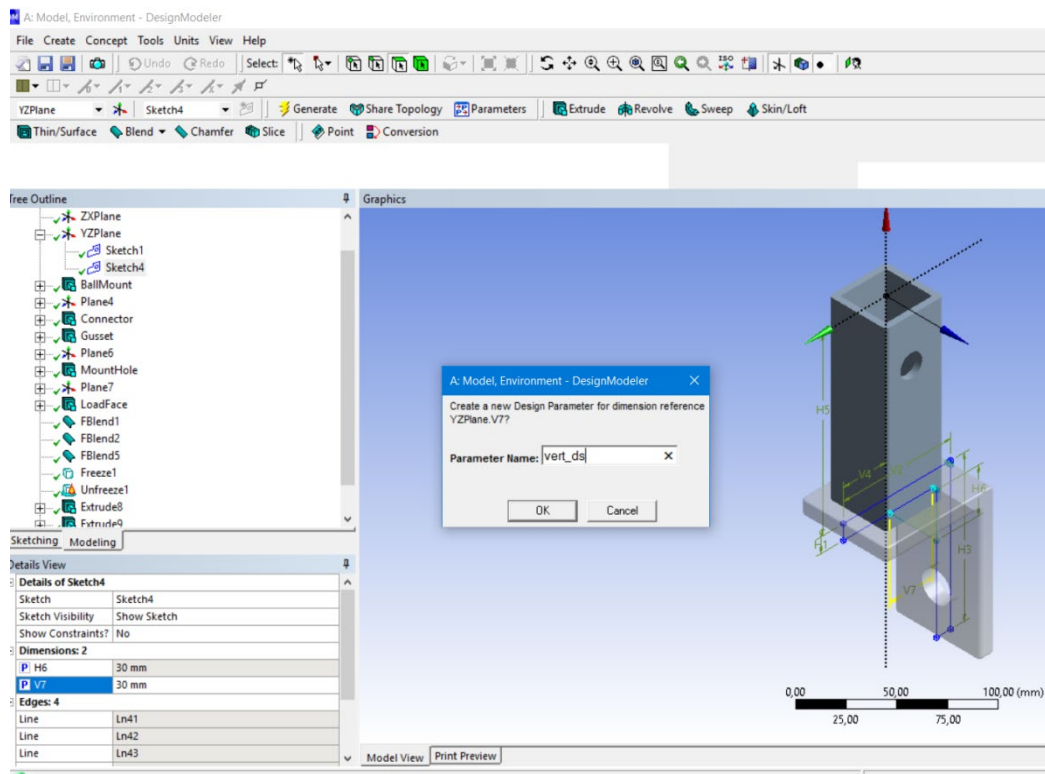


Рисунок 6 – Задание параметра vert_ds

5. Схема проекта (Project Schematics) теперь включает панель параметров (Parameter Set). Стрелка, выходящая из Parameter Set и соединяющаяся с ячейкой Parameters в Static Structural, указывает, что определены входные параметры (рисунок 7). Дважды нажимаем на ячейку Parameters и открываем соответствующее окно, в котором видны заданные входные параметры проекта (рисунок 8).

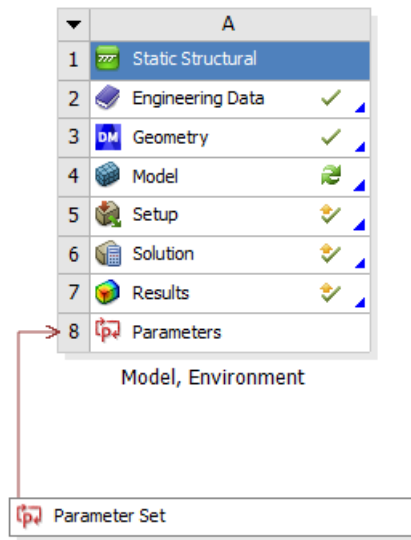


Рисунок 7 – Схема проекта с панелью параметров

Outline of Schematic A8: Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	[-] Input Parameters			
3	[-] [Icon] Model, Environment (A1)			
4	[Icon] P1	thick_ds	2,5	mm [Dropdown]
5	[Icon] P2	horiz_ds	30	mm [Dropdown]
6	[Icon] P3	vert_ds	30	mm [Dropdown]
*	[Icon] New input parameter	New name	New expression	
8	[-] Output Parameters			
*	[Icon] New output parameter		New expression	
10	Charts			

Рисунок 8 – Входные параметры проекта

6. Дважды нажимаем на Setup (Project Schematic) (рисунок 7). В зависимости от версии ANSYS может появиться или не появиться диалоговое окно, указывающее, что вышестоящие данные должны быть прочитаны повторно. Если данное окно появилось, то нажимаем Yes для открытия окна Mechanical. Если окно для подтверждения не появилось, то окно Mechanical открывается автоматически (рисунок 9).

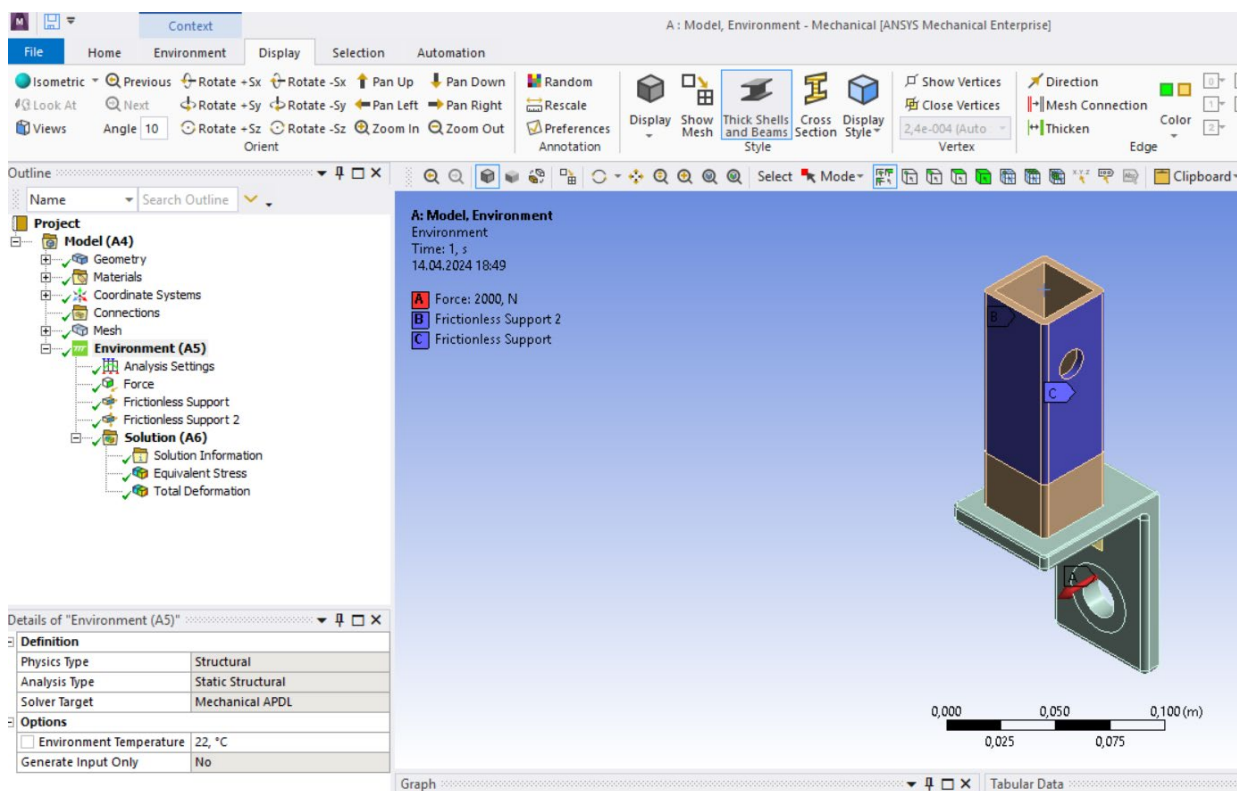


Рисунок 9 – Графический интерфейс Workbench Mechanical

7. Далее в окне Outline графического интерфейса Workbench Mechanical выберем пункт Model → Geometry из древовидной структуры расчетной модели. В окне Details of “Geometry” во вкладке Properties ставим флажок на ячейку Mass (рисунок 10).

8. В окне Outline находим Solution (A6) и выбираем Equivalent Stress. Далее в разделе Details под ячейкой Results ставим флажок на Maximum, чтобы определить выходным параметром максимальное эквивалентное напряжение (рисунок 11).

9. В том же разделе Solution выбираем Total Deformation и также ставим флажок на ячейку Maximum, чтобы определить выходным параметром максимальные деформации (рисунок 12).

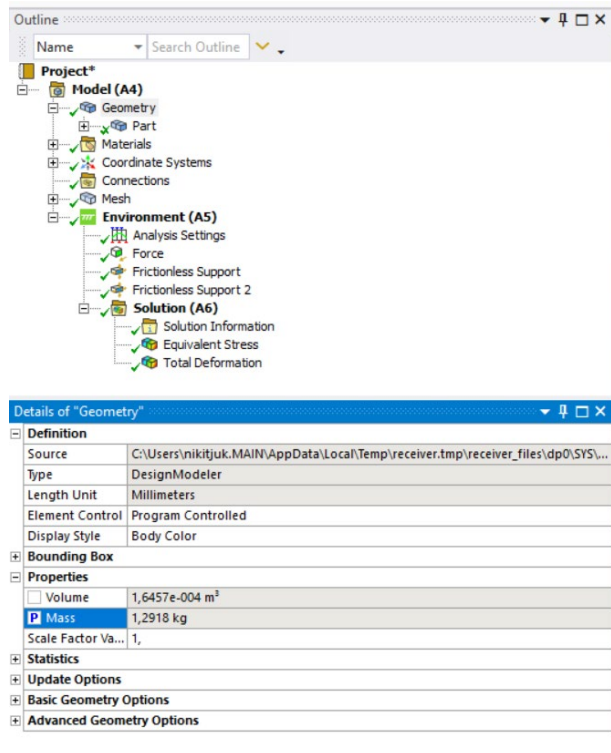


Рисунок 10 – Определение массы в качестве выходного параметра

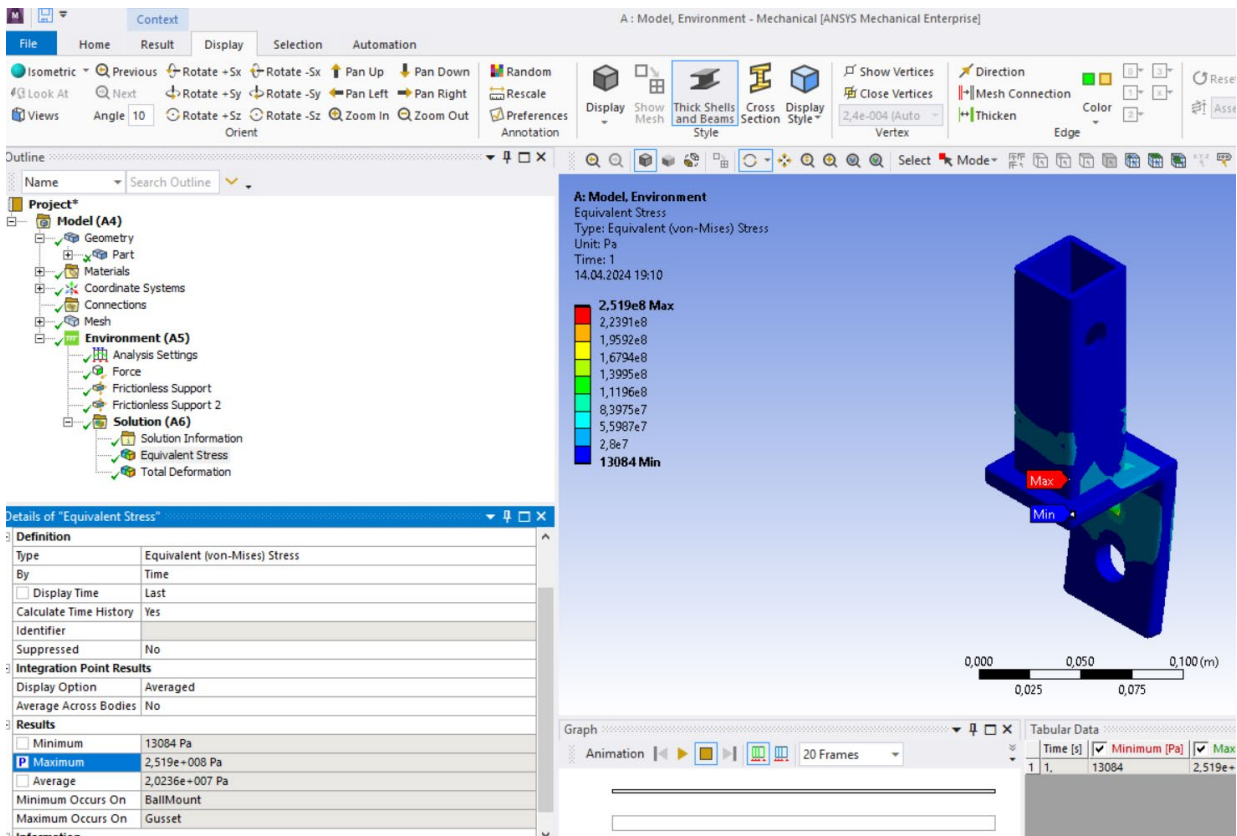


Рисунок 11 – Определение максимальных эквивалентных напряжений в качестве выходного параметра

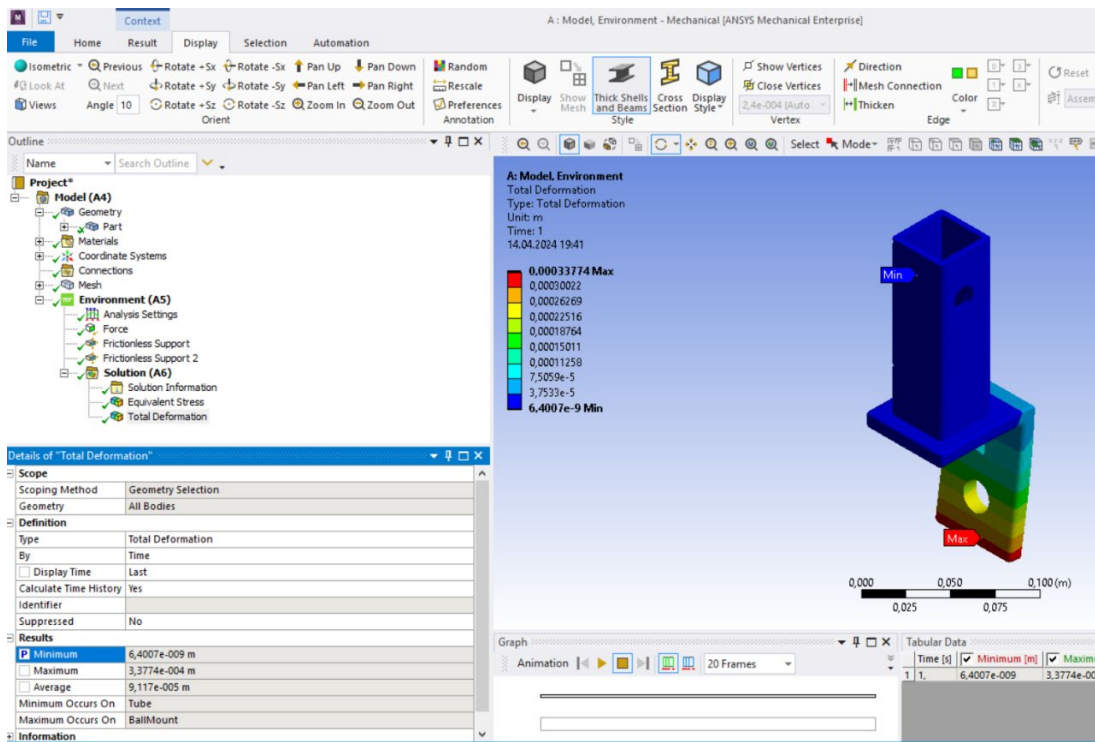


Рисунок 12 – Определение максимальных деформаций в качестве выходного параметра

10. Выходим из Mechanical и в Project Schematic обновляем проект (Update Project). Дважды нажимаем на ячейку Parameters и открываем соответствующее окно, в котором видны заданные входные и выходные параметры проекта и сгенерированная точка проекта (рисунки 13,14).

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
3	Model, Environment (A1)			
4	P1	thick_ds	2,5	mm
5	P2	horiz_ds	30	mm
6	P3	vert_ds	30	mm
*	New input parameter	New name	New expression	
8	Output Parameters			
9	Model, Environment (A1)			
10	P4	Geometry Mass	1,2918	kg
11	P5	Equivalent Stress Maximum	2,519E+08	Pa
12	P7	Total Deformation Maximum	0,00033774	m
*	New output parameter		New expression	
14	Charts			

Рисунок 13 – Входные и выходные параметры проекта

Table of Design Points										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Name	P1 - thick_ds	P2 - horiz_ds	P3 - vert_ds	P4 - Geometry Mass	P5 - Equivalent Stress Maximum	P7 - Total Deformation Maximum	Retain	Retained Data	Note
2	Units	mm	mm	mm	kg	Pa	m			
3	DP 0 (Current)	2,5	30	30	1,2918	2,519E+08	0,00033774	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
*								<input type="checkbox"/>		

Рисунок 14 – Сгенерированная точка проекта

11. Добавляем еще 3 точки (ПКМ → Duplicate Design Point) (рисунок 15).

Table of Design Points							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P1 - thick_ds	P2 - horiz_ds	P3 - vert_ds	P4 - Geometry Mass	P5 - Equivalent Stress Maximum	P7 - Total Deformation Maximum
2	Units	mm	mm	mm	kg	Pa	m
3	DP 0 (Current)	2,5	30	30	1,2918	2,519E+08	0,00033774
4	DP 1	2,25	27	33	⚡	⚡	⚡
5	DP 2	2,75	33	30	⚡	⚡	⚡
6	DP 3	2,5	33	33	⚡	⚡	⚡
*							

Рисунок 15 – Добавление 3 точек проекта

12. На панели инструментов нажимаем Update All Design Points. Когда обновление закончится, в таблице появятся результаты расчетов (рисунок 16).

Table of Design Points							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P1 - thick_ds	P2 - horiz_ds	P3 - vert_ds	P4 - Geometry Mass	P5 - Equivalent Stress Maximum	P7 - Total Deformation Maximum
2	Units	mm	mm	mm	kg	Pa	m
3	DP 0 (Current)	2,5	30	30	1,2918	2,519E+08	0,00033774
4	DP 1	2,25	27	33	1,2896	2,9768E+08	0,00034848
5	DP 2	2,75	33	30	1,296	2,6407E+08	0,00031457
6	DP 3	2,5	33	33	1,2958	2,2366E+08	0,00030356
*							

Рисунок 16 – Результаты расчетов

13. Добавим диаграмму, которая отображает отношения между выбранным параметром и каждой точкой проекта. Если вы не видите на экране панель диаграммы Chart в нижнем правом углу рабочего окна, то надо выбрать View → Chart. На панели Outline под Output Parameters, выбираем P7 – Total Deformation (может быть другой номер). В данный момент ниже в разделе Charts нет никаких диаграмм.

14. Если Toolbox не открыта в рабочем окне, то выбираем View → Toolbox и открываем его.

В Toolbox дважды нажимаем на Design Points vs P7, чтобы добавить соответствующую диаграмму.

15. В окне Outline под Charts выбираем Parameter Chart 0. На панели свойств Properties X-Axis (Bottom) устанавливаем Design Points и Y-Axis (Left), выбираем P7 – Total Deformation Maximum (рисунок 17).

	A	B
1	Property	Value
2	Parameter Chart: General	
3	Exclude Current Design point	<input type="checkbox"/>
4	X-Axis (Bottom)	Design Points
5	X-Axis (Top)	
6	Y-Axis (Left)	P7 - Total Deformation Maximum
7	Y-Axis (Right)	

Рисунок 17 – Настройка параметров диаграммы

Панель Graph теперь будет отображать диаграмму. Точки проекта расположены по оси X в нижней части диаграммы, а значение максимальных деформаций отображается по оси Y в левой части диаграммы (рисунок 18).

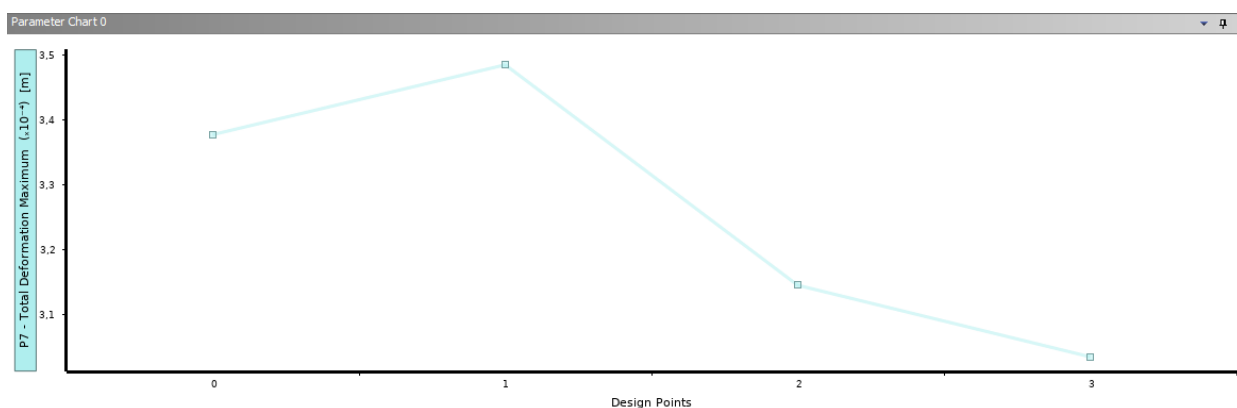


Рисунок 18 – Отображение панели Graph

Выбрав дополнительно на панели свойств Properties Y-Axis (Right) P4 – Geometry Mass, отобразим значения массы детали по оси Y в правой части диаграммы (рисунок 19).

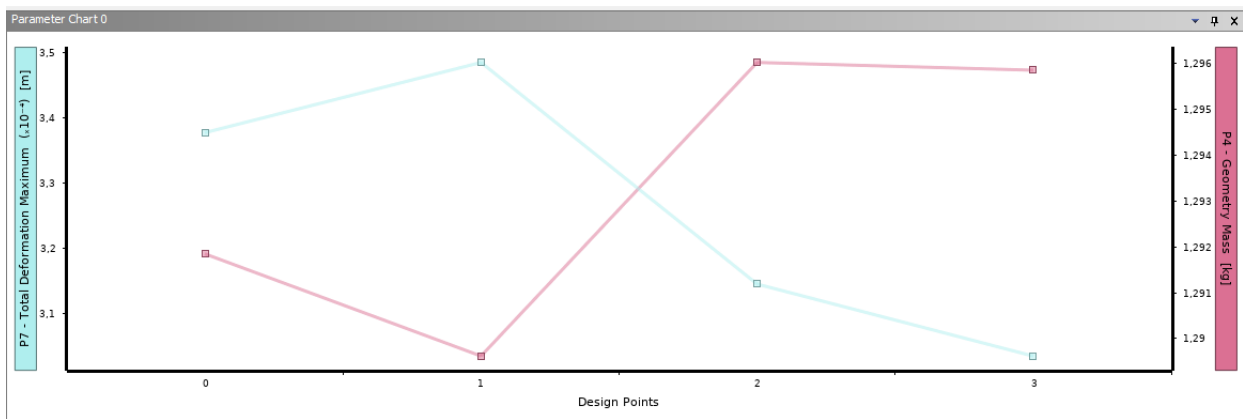


Рисунок 19 – Отображение панели Graph

16. Добавим диаграмму Parameters Parallel Chart, которая показывает отношения между всеми параметрами и каждой точкой проекта. В Toolbox дважды нажимаем на Parameter Parallel Chart, чтобы добавить эту диаграмму. Далее в Outline таблице под Charts выбираем Parameter Parallel Chart 0. В результате появится соответствующая диаграмма в окне справа внизу. Значения сверху и внизу показывают разброс, относящийся к каждому параметру. Каждая цветная линия на диаграмме отражает соответствующую точку проекта (рисунок 20).

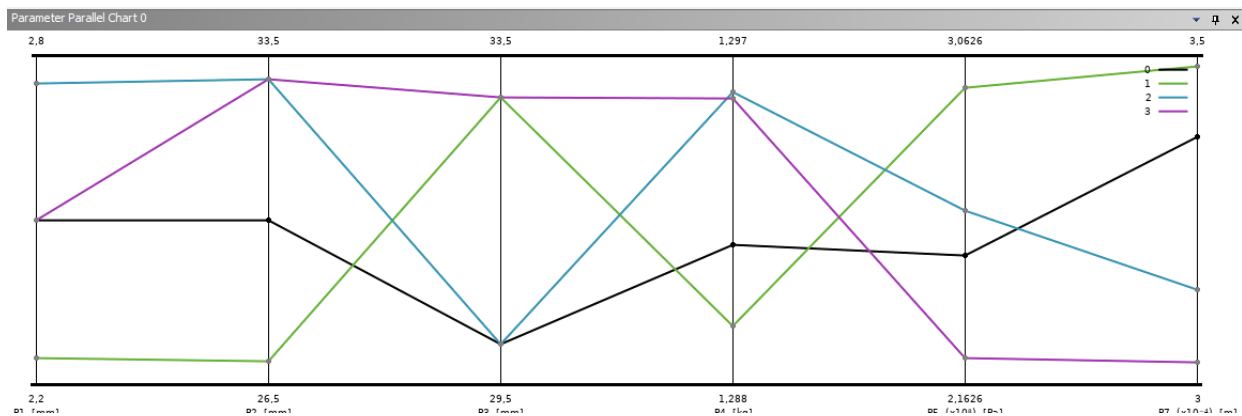


Рисунок 20 – Отображение панели Parameters Parallel Chart

17. Решение генерируется для проектной точки, обозначенной как Current на панели Table. Если, основываясь на изучении проекта, вы решите, что предпочтительнее использовать другую точку проектирования, вы можете определить ее как текущую точку проектирования. В Table of Design Points нажимаем ПКМ на DP 2 (если вы считаете проектной точку 2 предпочтительной) и выбираем Copy inputs to Current (рисунок 21).

Table of Design Points							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P1 - thick_ds	P2 - horiz_ds	P3 - vert_ds	P4 - Geometry Mass	P5 - Equivalent Stress Maximum	P7 - Total Deformation Maximum
2	Units	mm	mm	mm	kg	Pa	m
3	DP 0 (Current)	2,5	30	30	1,2918	2,519E+08	0,00033774
4	DP 1	2,25	27	33	1,2896	2,9768E+08	0,00034848
5	DP 2				1,296	2,6407E+08	0,00031457
6	DP 3				1,2958	2,2366E+08	0,00030356
*							

Рисунок 21 – Определение новой текущей точки проекта

Затем нажимаем ПКМ на DP 0 и выбираем Update Selected Design Points. Когда обновление закончится, результаты для DP 0 теперь совпадают с DP 1 в таблице (рисунок 22).

Table of Design Points							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P1 - thick_ds	P2 - horiz_ds	P3 - vert_ds	P4 - Geometry Mass	P5 - Equivalent Stress Maximum	P7 - Total Deformation Maximum
2	Units	mm	mm	mm	kg	Pa	m
3	DP 0 (Current)	2,75	33	30			0,00033774
4	DP 1	2,25	27	33	1,2		0,00034848
5	DP 2	2,75	33	30	1,2		0,00031457
6	DP 3	2,5	33	33	1,2		0,00030356
*							

Рисунок 22 – Обновление текущей точки проекта

18. Запускается Mechanical. В древе проекта Outline → Environment (A5) → Solution выбираем Equivalent Stress и получаем решение для выбранной текущей точки проекта (рисунок 23).

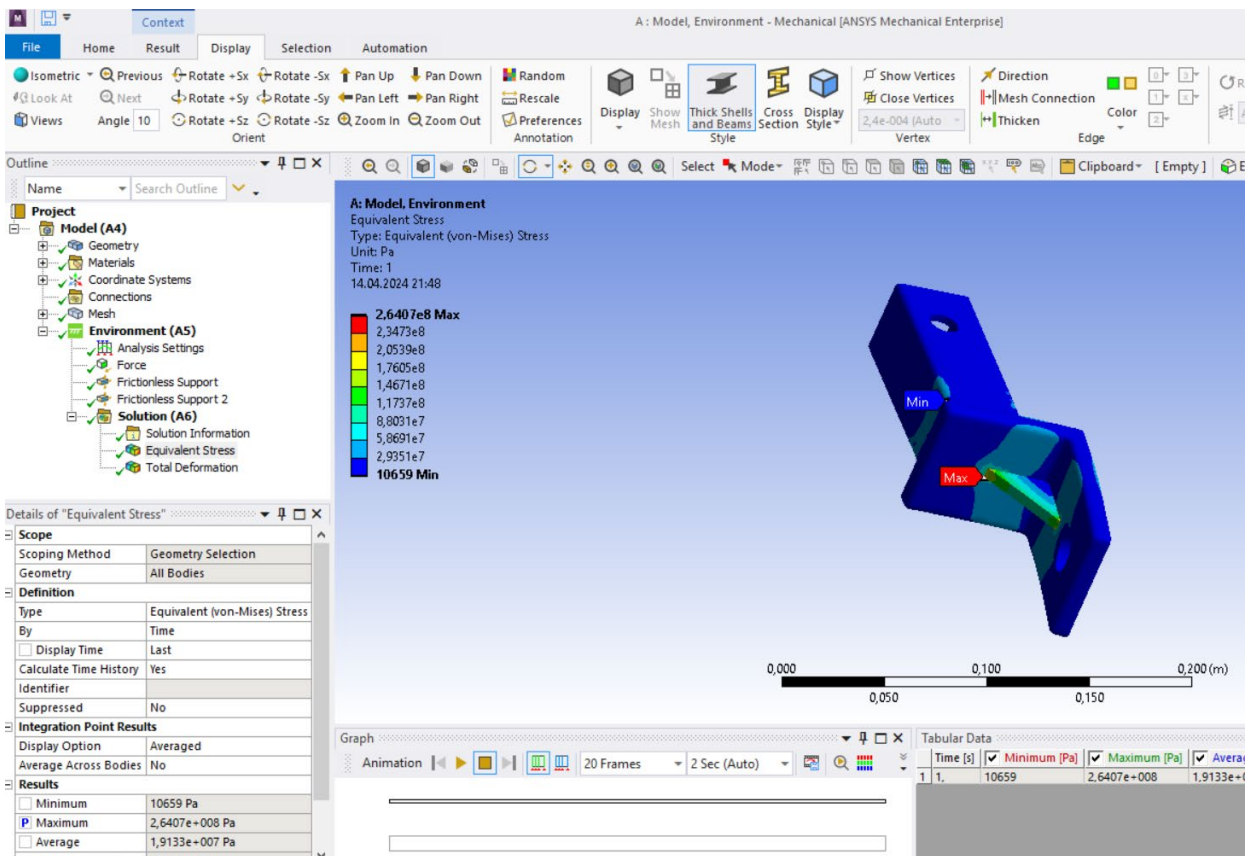


Рисунок 23 – Эквивалентные напряжения для текущей точки проекта

ЗАДАЧА 2

ПРОВЕДЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИИ В ANSYS DESIGNXPLORER

2.1 Введение

Явные аналитические зависимости характеристик объекта от параметров проектирования сложно получить для реальных объектов моделирования. В подобных случаях компьютерное моделирование применяется для сокращения количества дорогостоящих экспериментов. При этом использование сложных моделей для конечно-элементного анализа делает время моделирования очень большим. Если выполнение одного эксперимента с моделью требует более часа, то проведение сотен экспериментов при решении задач оптимизации становится нецелесообразным. Решение данной проблемы целесообразно с применением суррогатного моделирования, в рамках которого математические предсказательные модели для сложных систем строятся по результатам вычислительных экспериментов с компьютерными моделями. Формирование таких моделей основано на идеях машинного обучения, где модели «обучаются» на множестве входных и выходных данных – результатах экспериментов. Построенные суррогатные модели заменяют собой источники получения данных. Как правило, такие модели имеют существенно более высокую вычислительную эффективность по сравнению с исходными моделями. Таким образом, цель построения суррогатных моделей – предоставление приближенных значений выходных параметров на основе входных параметров без проведения полных расчётов. Достижение данной цели обеспечивается в результате применения метода планирования вычислительных экспериментов. Другой целью суррогатного моделирования является использование созданных моделей при оптимизации параметров конструкций и технологических процессов.

В программной среде Ansys Workbench оптимизация моделей проводится в модуле DesignXplorer. DesignXplorer использует входные и выходные параметры, которыми могут служить параметры DesignModeler или из различных систем автоматизированного проектирования. Входными параметрами могут быть значения толщины, длины, механические нагрузки, свойства материалов и т. д. Выходными параметрами, как правило, выступают масса, напряжение и др.

После настройки входных и выходных параметров могут быть запущены следующие виды анализов в DesignXplorer:

- планирование эксперимента (Design of Experiments – DOE);
- поверхность отклика (Response Surface);
- оптимизация.

Планирование эксперимента является основой DesignXplorer. Техника планирования эксперимента позволяет определить количество запусков расчетной задачи с учетом получения максимально точной поверхности отклика настолько это возможно. Каждая комбинация параметров, которая решается, именуется Design Point (точка конструирования или проектирования).

После того, как планирование эксперимента выполнено, создается поверхность отклика на основе рассчитанных результатов. Поверхность отклика создается для каждого выходного параметра. Исходными данными для построения поверхности отклика служат численные данные, представленные в таблице результатов Design Point. В общем случае поверхность отклика помогает провести анализ результатов расчета.

Для того, чтобы обеспечить прочностные показатели детали с меньшей массой или габаритами, в частности, необходимо использовать модуль оптимизации. Этот модуль позволит подобрать нужные входные параметры с учетом заданных пользователем ограничений на выходные параметры. Например, задав показатель массы и уровень напряжений, программа подберет значения каких-либо размеров детали.

2.2 Постановка задачи

Целью проведения оптимизационного исследования является минимизация массы детали с сохранением безопасного уровня напряжений. Входными параметрами выступают геометрические размеры детали.

Как и в работе «Проведение параметрического исследования “Что, если?” в Ansys Workbench», в данной работе используется прицепное устройство, созданное в ANSYS DesignModeler (рисунок 1). На рисунке 1 представлены нагрузки и ограничения, приложенные к прицепному устройству.

При выполнении работы будут использованы в качестве входных параметров геометрические размеры прицепного устройства, представленные на рисунках 2, 24.

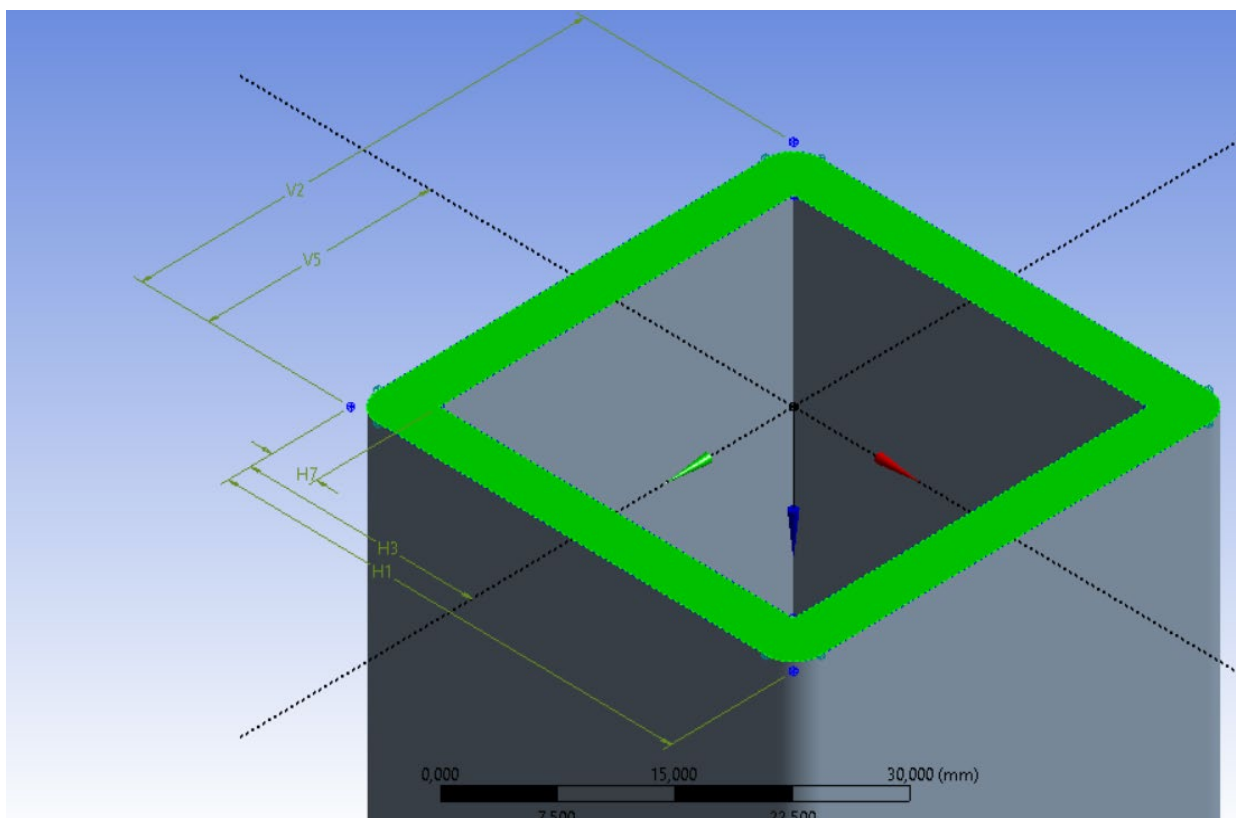


Рисунок 24 – Геометрический параметр H7 (толщина квадратной трубы), используемый в качестве входного параметра модели

2.3 Реализация задачи при помощи графического интерфейса Ansys Workbench

1. Решение задачи начинается с запуска Ansys Workbench, который выполняется из основного меню Пуск → Программы → Ansys 2020R1 → Workbench 2020R1.

2. Выбираем File → Open. Затем в появившемся окне выбираем файл с именем receiver.wbpz. Сохраняем проект с именем receiver и расширением wbpj. В результате в окне Project Schematic появится аналитический блок, который будем использовать в качестве заготовки для нашей модели (рисунок 3).

3. Дважды нажимаем на ячейку Geometry. В открывшемся окне DesignModeler появится модель прицепа. В окне Tree Outline выбираем Gusset. Далее в Details View устанавливаем флажок на FD1, Depth, чтобы сделать его входным параметром. После этого появится диалоговое окно для указания имени параметра. Укажите имя thick_ds (рисунок 4).

4. В окне Tree Outline выбираем YZPlane. В YZPlane выбираем Sketch4, в разделе Dimensions, как и в пункте 3, устанавливаем флажки на H6 (name – horiz_ds) и V7 (name – vert_ds) (рисунки 5, 6).

5. В окне Tree Outline выбираем Plane4. В Plane4 выбираем Sketch2, в разделе Dimensions, как и в пунктах 2–3, устанавливаем флажок на H7 (name – horiz_ds) и V7 (name – thick_tube) (рисунок 25). Закрываем DesignModeler.

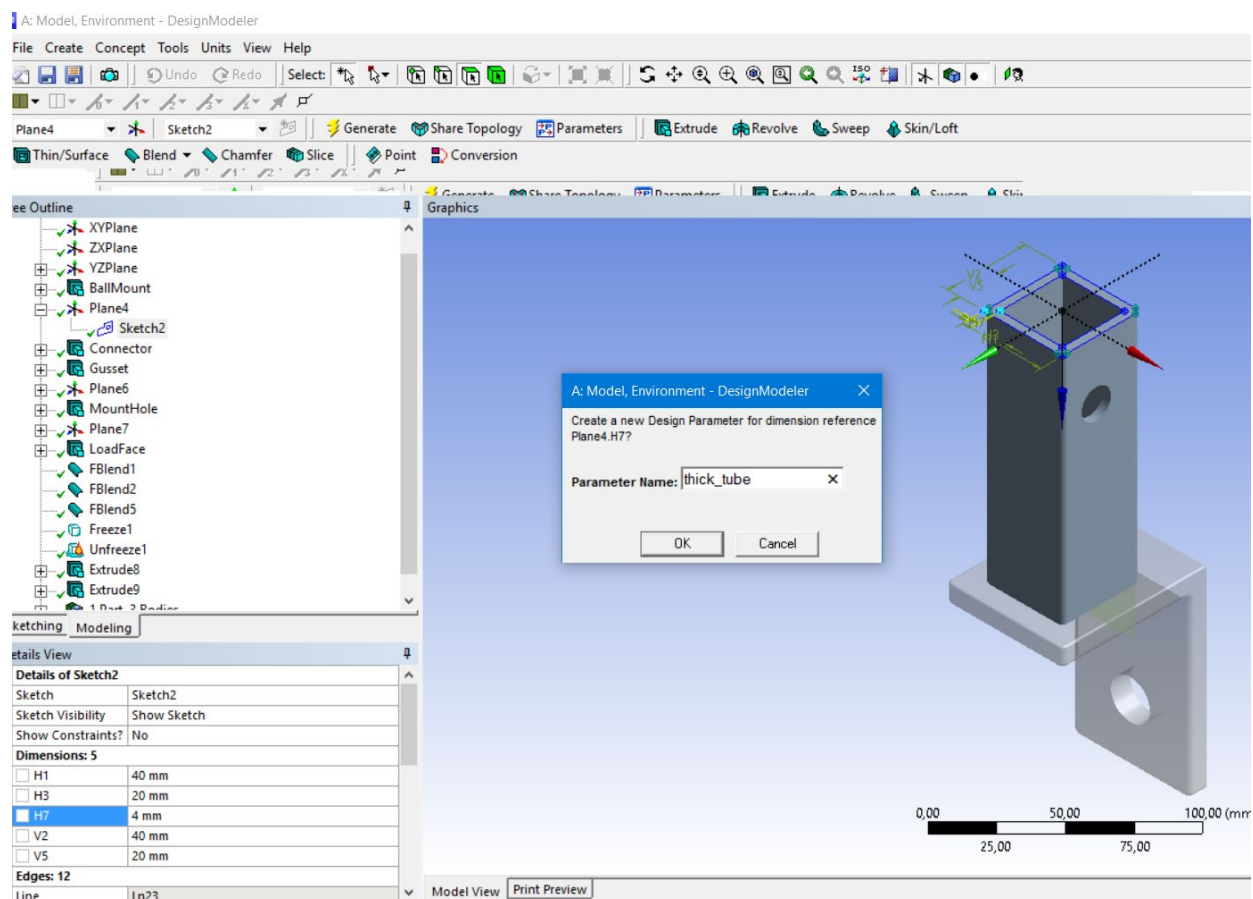


Рисунок 25 – Задание параметра thick_tube

6. Дважды нажимаем на ячейку Parameters и открываем соответствующее окно, в котором видны заданные входные параметры проекта (рисунок 26).

7. Дважды нажимаем на Setup (Project Schematic) и открываем окно Mechanical (рисунок 9).

8. Далее в окне Outline графического интерфейса Workbench Mechanical выберем пункт Model → Geometry из древовидной структуры расчетной модели. В окне Details of “Geometry” во вкладке Properties ставим флажок на ячейку Mass (рисунок 10).

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	[-] Input Parameters			
3	[-] Model, Environment (A1)			
4	P1	thick_ds	2,5	mm ▾
5	P2	horiz_ds	30	mm ▾
6	P3	vert_ds	30	mm ▾
7	P8	thick_tube	4	mm ▾
*	New input parameter	New name	New expression	
9	[-] Output Parameters			
*	New output parameter		New expression	
11	[-] Charts			
12	Parameter Parallel Chart 0			
13	Parameter Chart 0			

Рисунок 26 – Входные параметры проекта

9. В окне Outline находим Solution (A6) и выбираем Equivalent Stress. Далее в разделе Details под ячейкой Results ставим флажок на Maximum, чтобы определить максимальное эквивалентное напряжение выходным параметром (рисунок 11).

10. Выходим из Mechanical и в Project Schematic обновляем проект (Update Project). Дважды нажимаем на ячейку Parameters и открываем соответствующее окно, в котором видны заданные входные и выходные параметры проекта и сгенерированная точка проекта (рисунок 27).

Outline of All Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	[-] Input Parameters			
3	[-] Model, Environment (A1)			
4	P1	thick_ds	2,5	mm ▾
5	P2	horiz_ds	30	mm ▾
6	P3	vert_ds	30	mm ▾
7	P8	thick_tube	4	mm ▾
*	New input parameter	New name	New expression	
9	[-] Output Parameters			
10	[-] Model, Environment (A1)			
11	P9	Geometry Mass	1,2918	kg
12	P10	Equivalent Stress Maximum	2,519E+08	Pa
*	New output parameter		New expression	
14	[-] Charts			
15	Parameter Parallel Chart 0			
16	Parameter Chart 0			

Рисунок 27 – Входные и выходные параметры проекта

11. В окне Toolbox → Design Exploration → дважды нажимаем на Response Surface и добавляем новую поверхность отклика к проекту (рисунок 28).

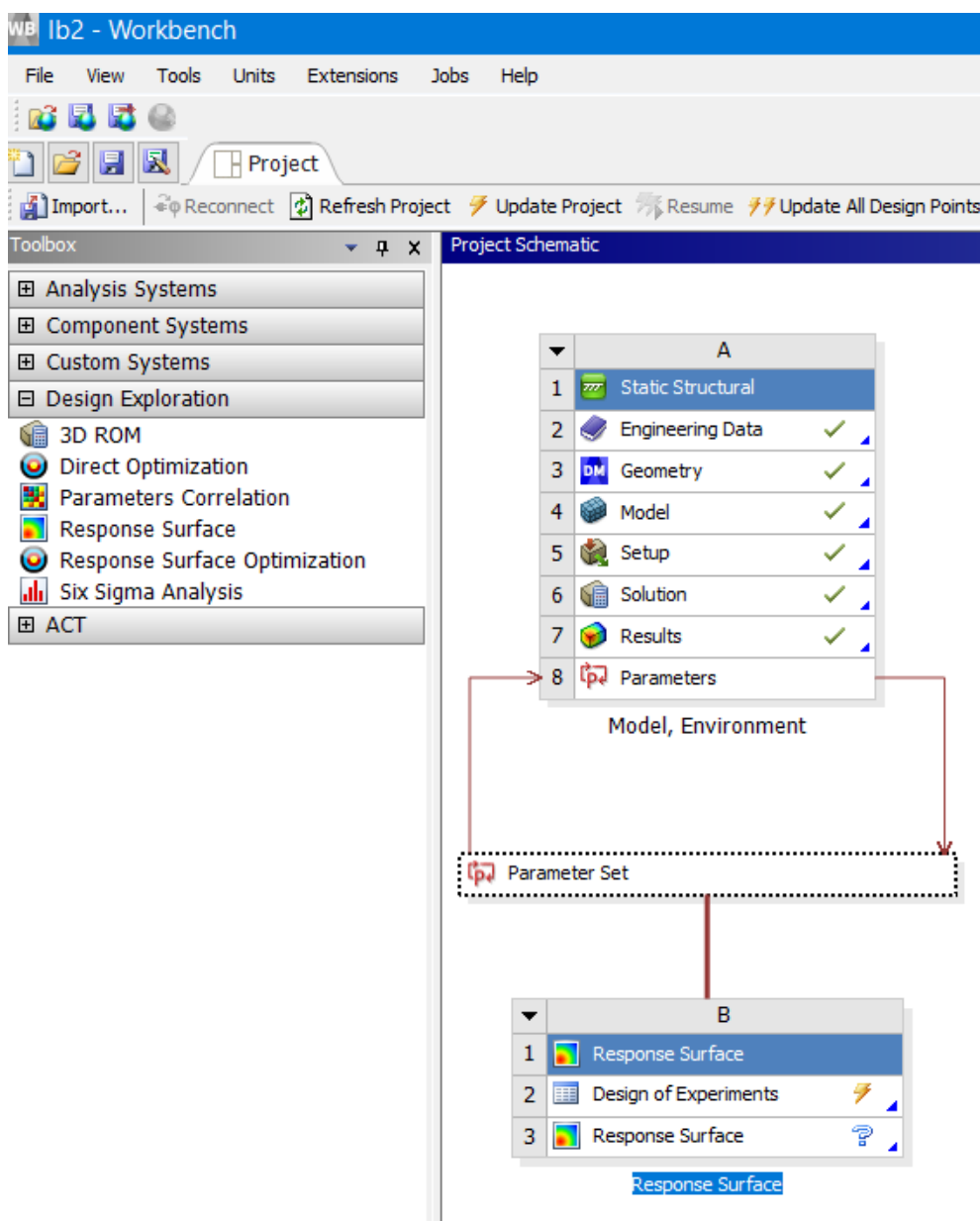


Рисунок 28 – Добавление Response Surface в проект

12. В появившемся новом блоке Response Surface дважды кликаем на Design of Experiments (ячейка с молнией). В открывшемся окне вы увидите ранее определенные входные и выходные параметры в таблице Outline (рисунок 29).

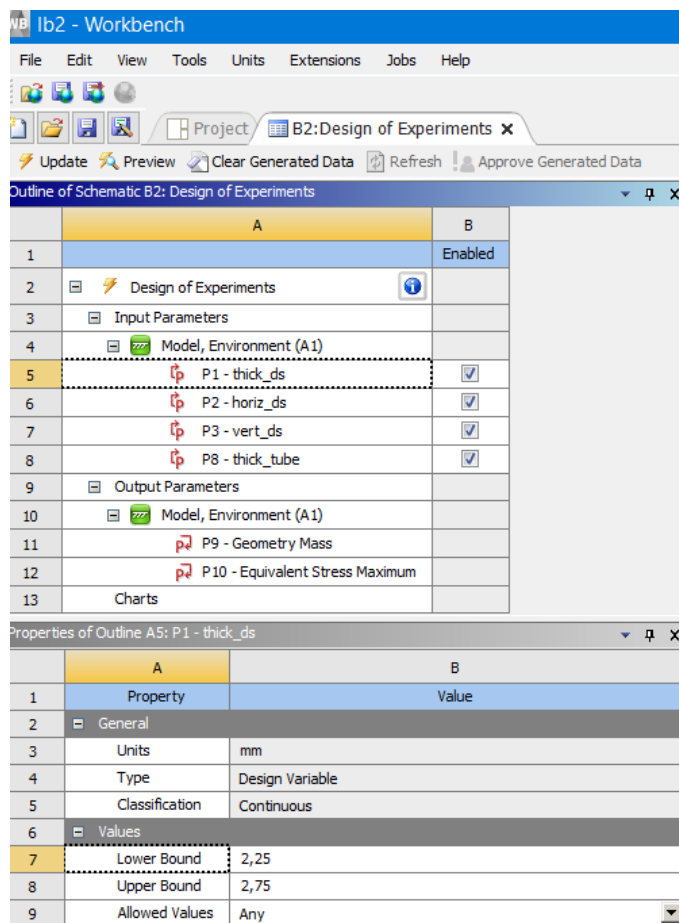


Рисунок 29 – Окно Design of Experiments

13. Выбрав параметры P2 – horiz_ds, P3 – vert_ds, установите верхние и нижние границы, равные 25 мм и 35 мм. Для параметра P8 – thick_tube установите границы, равные 1мм и 5 мм. Отключите параметр P1 – thic_ds из моделирования, сняв соответствующую галочку (рисунок 30).

14. Далее выберите Design of Experiment и в Properties убедитесь, что Design of Experiment Type установлен на Central Composite Design, и выберите гранецентрированный вариант центрального композиционного плана эксперимента (рисунок 31).

В Ansys Workbench существует возможность выбора различных вариантов планирования эксперимента: латинский гиперкуб, центральный композиционный план и др. В свою очередь, каждый из этих типов имеет еще несколько настроек, ознакомиться более подробно с которыми можно из документации к программной среде. Кроме того, пользователь сам может вручную ввести матрицу планирования входных факторов, выбрав тип планирования Custom.

15. На панели инструментов нажмите Preview, чтобы посмотреть какие точки были сгенерированы в плане эксперимента. В таблице Table of Outline представлены пятнадцать точек (рисунок 32). Обновите Design of Experiments (Update). Когда обновление закончится, таблица будет заполнена результатами расчетов (рисунок 33).

Outline of Schematic b2: Design of Experiments	
A	B
1	Enabled
2	Design of Experiments
3	Input Parameters
4	Model, Environment (A1)
5	P1 - thick_ds
6	P2 - horiz_ds
7	P3 - vert_ds
8	P8 - thick_tube
9	Output Parameters
10	Model, Environment (A1)
11	P9 - Geometry Mass
12	P10 - Equivalent Stress Maximum
13	Charts
14	Parameters Parallel
15	Design Points vs Parameter

Properties of Outline A8: P8 - thick_tube	
A	B
Property	Value
General	
Units	mm
Type	Design Variable
Classification	Continuous
Values	
Lower Bound	1
Upper Bound	5
Allowed Values	Any

Рисунок 30 – Изменение диапазона входных параметров

Outline of Schematic b2: Design of Experiments	
A	B
1	Enabled
2	Design of Experiments
3	Input Parameters
4	Model, Environment (A1)
5	P1 - thick_ds
6	P2 - horiz_ds
7	P3 - vert_ds
8	P8 - thick_tube
9	Output Parameters
10	Model, Environment (A1)
11	P9 - Geometry Mass
12	P10 - Equivalent Stress Maximum
13	Charts
14	Parameters Parallel
15	Design Points vs Parameter

Properties of Outline A2: Design of Experiments	
A	B
Property	Value
Design Points	
Preserve Design Points After DX Run	<input type="checkbox"/>
Failed Design Points Management	
Number of Retries	0
Design of Experiments	
Design of Experiments Type	Central Composite Design
Design Type	Face-Centered
Template Type	Face-Centered Rotatable
Design Point Report	
Report Image	VIF-Optimality G-Optimality Auto Defined

Рисунок 31 – Выбор плана эксперимента

Table of Outline A2: Design Points of Design of Experiments						
	A	B	C	D	E	F
1	Name	P2 - horiz_ds (mm)	P3 - vert_ds (mm)	P8 - thick_tube (mm)	P9 - Geometry Mass (kg)	P10 - Equivalent Stress Maximum (Pa)
2	1	30	30	3	⚡	⚡
3	2	25	30	3	⚡	⚡
4	3	35	30	3	⚡	⚡
5	4	30	25	3	⚡	⚡
6	5	30	35	3	⚡	⚡
7	6	30	30	1	⚡	⚡
8	7	30	30	5	⚡	⚡
9	8	25	25	1	⚡	⚡
10	9	35	25	1	⚡	⚡
11	10	25	35	1	⚡	⚡
12	11	35	35	1	⚡	⚡
13	12	25	25	5	⚡	⚡
14	13	35	25	5	⚡	⚡
15	14	25	35	5	⚡	⚡
16	15	35	35	5	⚡	⚡

Рисунок 32 – План численного эксперимента

Table of Outline A12: Design Points of Design of Experiments						
	A	B	C	D	E	F
1	Name	P2 - horiz_ds (mm)	P3 - vert_ds (mm)	P8 - thick_tube (mm)	P9 - Geometry Mass (kg)	P10 - Equivalent Stress Maximum (Pa)
2	1	30	30	3	1,1703	2,677E+08
3	2	25	30	3	1,1671	3,0062E+08
4	3	35	30	3	1,1735	2,8806E+08
5	4	30	25	3	1,1671	3,6382E+08
6	5	30	35	3	1,1735	2,6119E+08
7	6	30	30	1	0,90453	2,9499E+08
8	7	30	30	5	1,4059	2,4931E+08
9	8	25	25	1	0,89864	3,5926E+08
10	9	35	25	1	0,90404	4,1295E+08
11	10	25	35	1	0,90404	3,3006E+08
12	11	35	35	1	0,9114	2,5812E+08
13	12	25	25	5	1,4	3,1737E+08
14	13	35	25	5	1,4054	3,6737E+08
15	14	25	35	5	1,4054	3,3213E+08
16	15	35	35	5	1,4127	2,0592E+08

Рисунок 33 – Результаты расчетов

16. Затем возвращаемся в окно Project Schematic. В блоке Response Surface нажмите дважды на ячейку Response Surface. Затем обновите все в открывшемся окне, выбрав в таблице Outline пункт Response Surface, задайте Full 2nd-Order Polynomial – стандартный алгоритм построения метамоделей в таблице Properties of Outline (рисунок 34).

Для построения метамоделей при использовании модуля ANSYS Design Exploration также доступны следующие алгоритмы: кригинг (Kriging); непараметрическая регрессия (Non-Parametric Regression); искусственная нейронная сеть (Neural Network) и др.

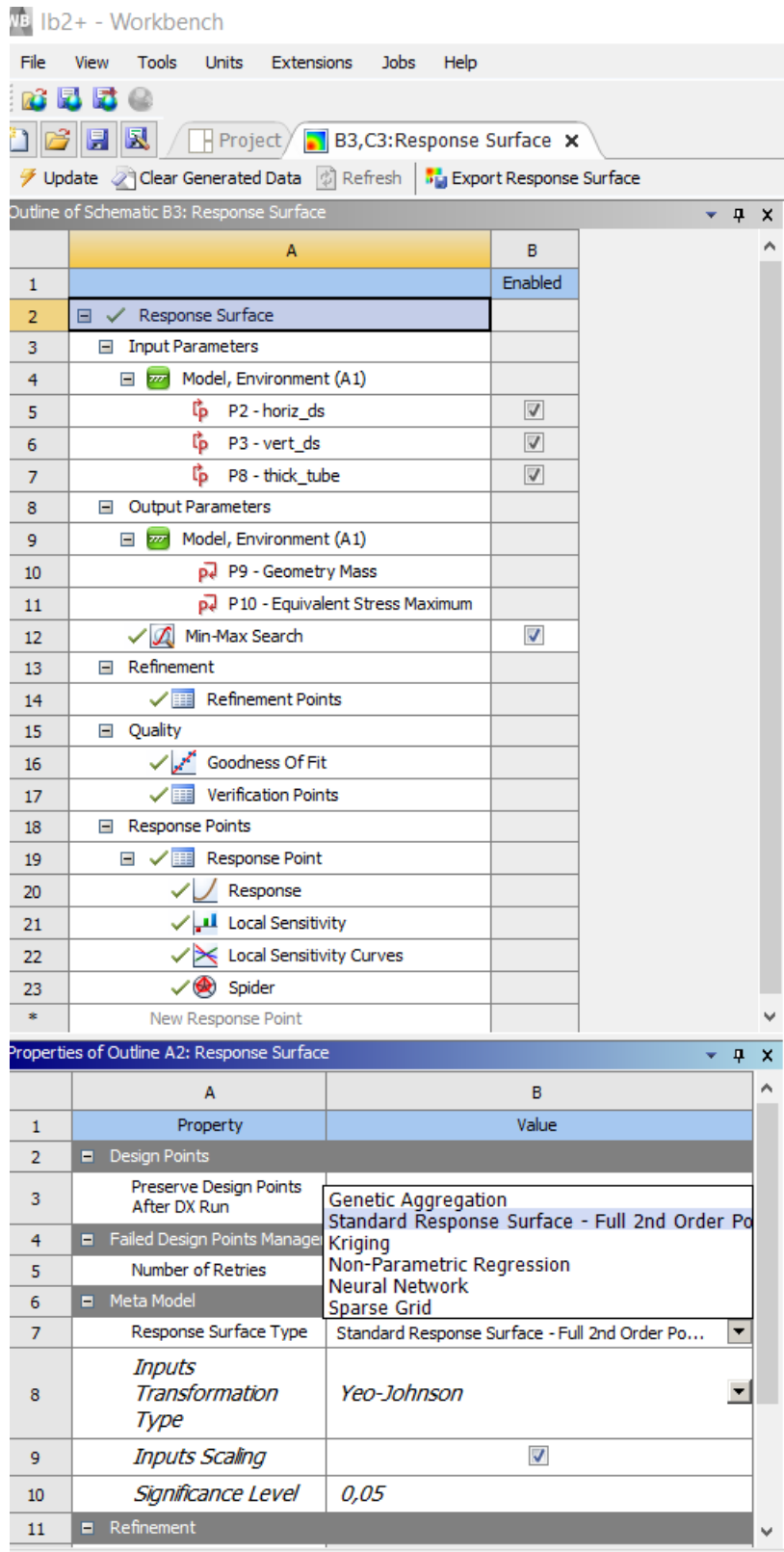


Рисунок 34 – Окно Response Surface

17. На панели Outline в разделе Response Points мы видим, что была сгенерирована одна точка вместе с ее диаграммой (рисунок 34). Выбрав

диаграмму этой точки (Response), посмотрите автоматически сгенерированный график. Изменяя соответствующие параметры, можно увидеть, как изменяются выходные параметры при изменении входных параметров в трех вариантах просмотра: 2D, 3D и 2D Slices (рисунок 35).

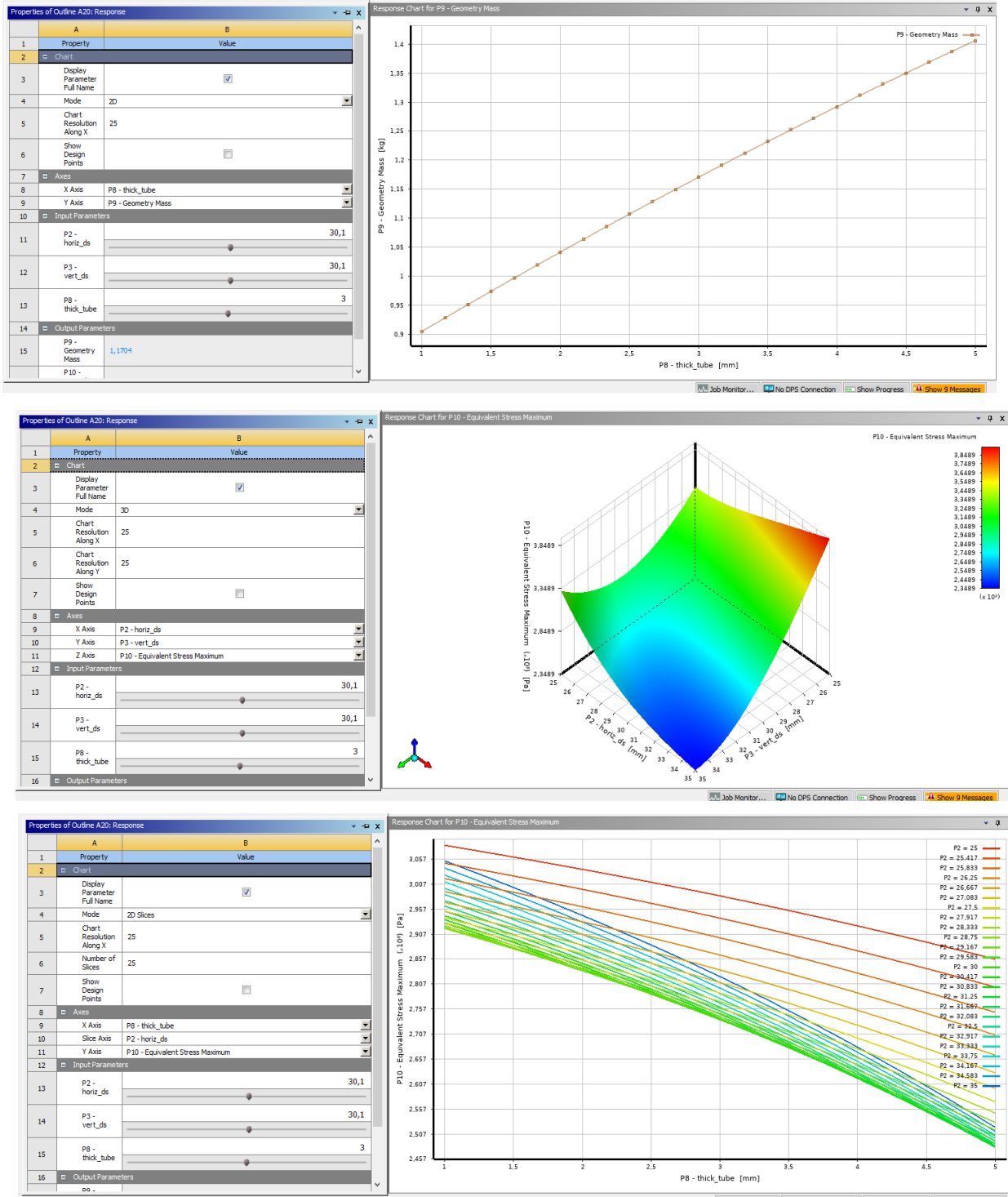


Рисунок 35 – Варианты просмотра поверхности отклика

18. При переходе на панели Outline к разделу Goodness Of Fit формируются данные, позволяющие судить о качестве метамоделей (рисунок 36). На графике по оси абсцисс отложены значения конечно-элементного моделирования, а по оси ординат – значения, полученные при помощи соответствующих регрессионных уравнений. Чем ближе полученные точки находятся к диагонали, тем выше точность модели.

Для оценки полученных моделей также можно использовать критерии, представленные на рисунке 35:

– коэффициент детерминации

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2},$$

– средняя квадратичная ошибка (англ. Root Mean Square Error, RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2},$$

где d_i – значения, определенные методом конечных элементов,
 y_i – значения, определенные с использованием регрессионных моделей.

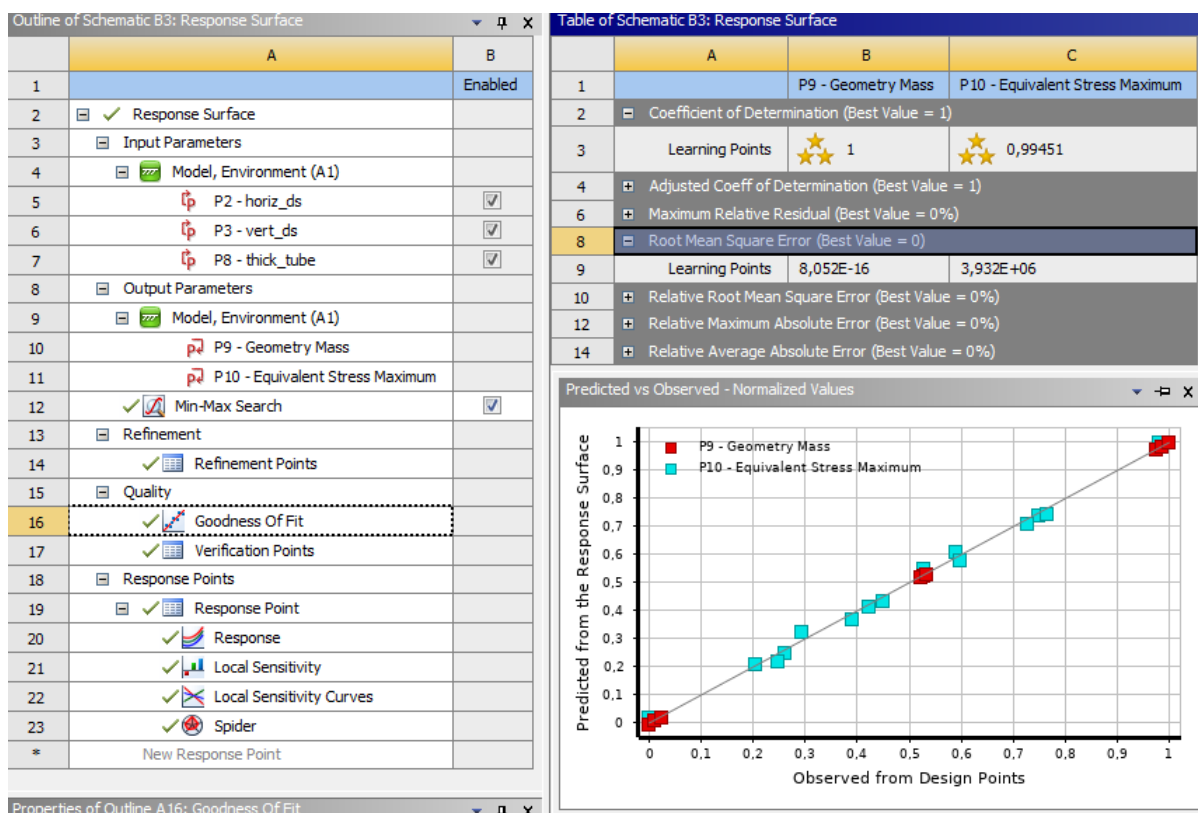


Рисунок 36 – Оценка качества метамоделей

19. При переходе на панели Outline к разделу Local Sensitivity строится диаграмма, отображающая влияние входных параметров на выходные параметры (см. рисунок 37).

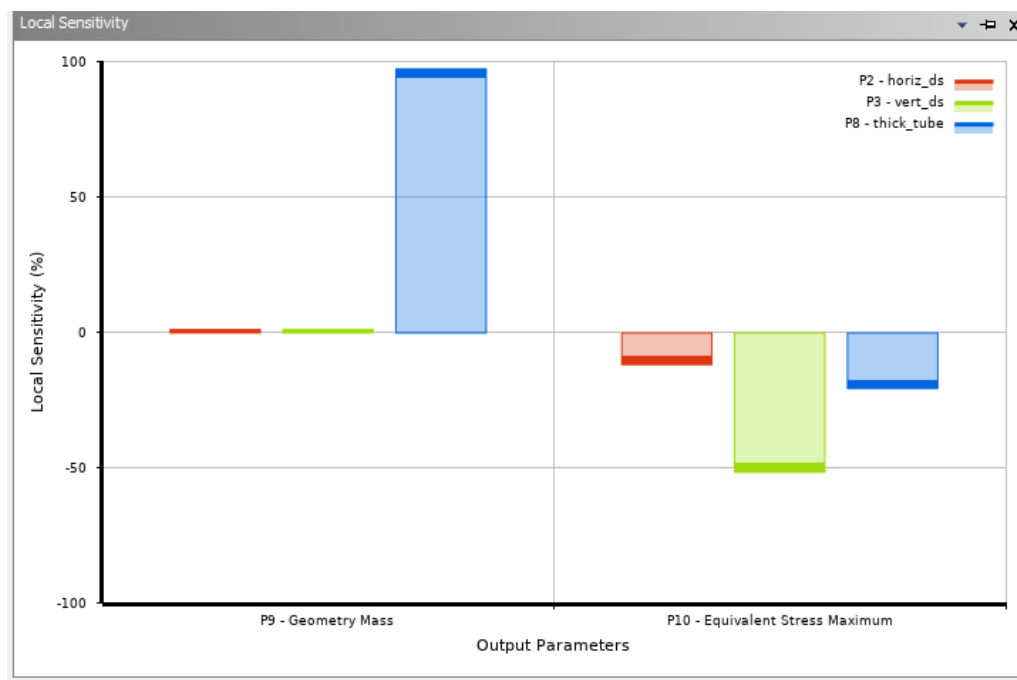


Рисунок 37 – Диаграмма чувствительности оптимизируемых параметров

20. В окне Toolbox → Design Exploration → дважды нажимаем на Response Surface Optimization и добавляем новый блок оптимизации к проекту (рисунок 38).

21. В блоке Response Surface Optimization дважды щелкните ячейку Optimization, чтобы открыть ее (рисунок 39).

22. На панели Outline выберите Optimization. Для проведения многокритериальной оптимизации на панели Properties задайте параметры оптимизации, как показано на рисунке 40, выбрав генетический алгоритм MOGA.

Многокритериальная оптимизация – это одновременная оптимизация двух и более целевых функций. Одним из методов решения таких задач является выявление совокупности оптимальных по Парето решений, которые не доминируют относительно друг друга, а улучшение одного параметра приводит к ухудшению других. Генетические алгоритмы являются частным случаем эволюционных методов и обеспечивают поиск лучших решений при помощи наследования и усиления полезных свойств множества объектов в процессе имитации их эволюции. Одним из эффективных генетических алгоритмов является алгоритм MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm).

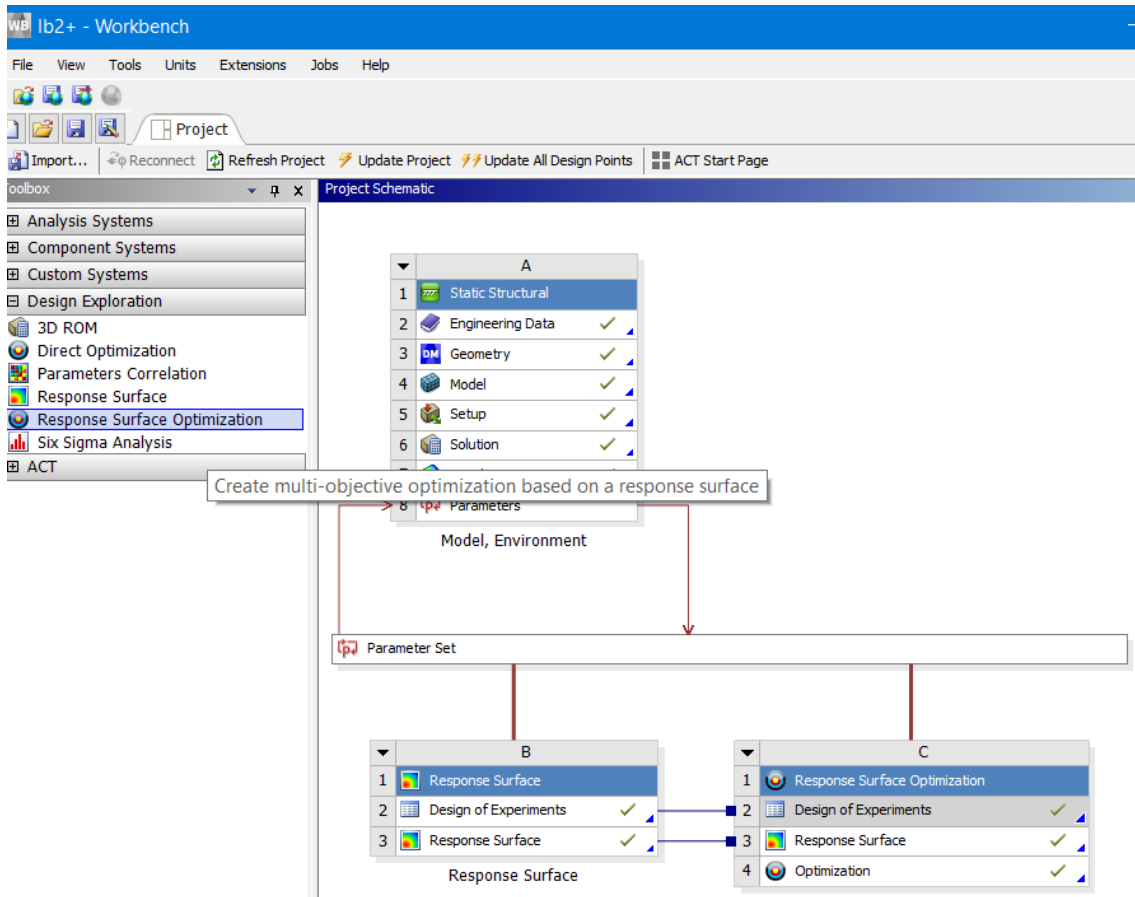


Рисунок 38 – Добавление Response Surface Optimization в проект

The screenshot shows the 'Outline of Schematic C4: Optimization' window. It provides a detailed view of the optimization configuration, including objectives, constraints, and parameter relationships.

	A	B	C
1		Enabled	Monitoring
2	Optimization		
3	Objectives and Constraints		
4	Minimize P9		
5	Minimize P10		
6	Domain		
7	Model, Environment (A1)		
8	P2 - horiz_ds	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	P3 - vert_ds	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	P8 - thick_tube	<input checked="" type="checkbox"/>	
11	Parameter Relationships		
12	Convergence Criteria		
13	Results		
14	Candidate Points		
15	Tradeoff		
16	Samples		
17	Sensitivities		

Рисунок 39 – Окно Response Surface Optimization

Properties of Outline A2: Optimization		
	A	B
1	Property	Value
2	[-] Design Points	
3	Preserve Design Points After DX Run	<input type="checkbox"/>
4	[-] Failed Design Points Management	
5	Number of Retries	0
6	[-] Optimization	
7	Method Selection	Manual
8	Method Name	MOGA
9	Estimated Number of Evaluations	10000
10	Tolerance Settings	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Verify Candidate Points	<input type="checkbox"/>
12	Type of Initial Sampling	Screening
13	Number of Initial Samples	500
14	Number of Samples Per Iteration	500
15	Maximum Allowable Pareto Percentage	70
16	Convergence Stability Percentage	2
17	Maximum Number of Iterations	20
18	Mutation Probability	0,01
19	Crossover Probability	0,98
20	Maximum Number of Candidates	3

Рисунок 40 – Выбор алгоритма оптимизации

23. На панели Outline выберите Objectives and Constraints. В области Table для параметров P9 – Geometry Mass и P10 – Equivalent Stress Maximum укажите цели, как показано на рисунке 41, и обновите ячейку Optimization.

Table of Schematic C4: Optimization									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Parameter	Objective			Constraint			
2			Type	Target	Tolerance	Type	Lower Bound	Upper Bound	Tolerance
3	Minimize P9	P9 - Geometry Mass	Minimize	0		No Constraint			
4	Minimize P10	P10 - Equivalent Stress Maximum	Minimize	0		No Constraint			
*		Select a Parameter							

Рисунок 41 – Постановка оптимизационной задачи

24. Чтобы просмотреть точки-кандидаты, найденные в результате оптимизации, на панели Outline в разделе Results выберите Candidate Points (рисунок 42).

Table of Schematic C4: Optimization , Candidate Points									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Reference	Name	P2 - horiz_ds (mm)	P3 - vert_ds (mm)	P8 - thick_tube (mm)	P9 - Geometry Mass (kg)		P10 - Equivalent Stress Maximum (Pa)	
2						Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
3	○	Candidate Point 1	34,632	34,807	1,018	✗ 0,91351	-0,35%	✗ 2,5412E+08	-0,51%
4	○	Candidate Point 2	34,784	34,531	1,0178	✗ 0,91339	-0,37%	✗ 2,5475E+08	-0,27%
5	⊙	Candidate Point 3	33,792	34,782	1,0457	✗ 0,91676	0,00%	✗ 2,5543E+08	0,00%
*		<i>New Custom Candidate Point</i>	<i>30</i>	<i>30</i>	<i>3</i>				

Рисунок 42 – Результаты оптимизации

25. Чтобы убедиться, что Candidate Point 1 является эффективным вариантом, щелкните его правой кнопкой мыши и выберите Verify by Design Point Update. Когда обновление будет завершено, на панели Table дополнительно появится Candidate Point 1 (verified) (рисунок 43).

Table of Schematic C4: Optimization , Candidate Points									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Reference	Name	P2 - horiz_ds (mm)	P3 - vert_ds (mm)	P8 - thick_tube (mm)	P9 - Geometry Mass (kg)		P10 - Equivalent Stress Maximum (Pa)	
2						Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
3	○	Candidate Point 1	34,632	34,807	1,018	✗ 0,91351	-0,35%	✗ 2,5412E+08	-0,51%
4	○	Candidate Point 1 (verified)				✗ 0,91351	-0,35%	✗ 2,5355E+08	-0,74%
5	○	Candidate Point 2	34,784	34,531	1,0178	✗ 0,91339	-0,37%	✗ 2,5475E+08	-0,27%
6	⊙	Candidate Point 3	33,792	34,782	1,0457	✗ 0,91676	0,00%	✗ 2,5543E+08	0,00%
*		<i>New Custom Candidate Point</i>	<i>30</i>	<i>30</i>	<i>3</i>				

Рисунок 43 – Проверка результатов оптимизации

26. На панели Outline в разделе Results выберите Candidate Points. Щелкните правой кнопкой мыши Candidate Point 1 и выберите Insert as Design Point (см. рисунок 44). Закройте ячейку Optimization.

Table of Schematic C4: Optimization , Candidate Points									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Reference	Name	P2 - horiz_ds (mm)	P3 - vert_ds (mm)	P8 - thick_tube (mm)	P9 - Geometry Mass (kg)		P10 - Equivalent Stress Maximum (Pa)	
2						Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
3	○	Candidate Point 1	34,632	34,807	1,018	✗ 0,91351	-0,35%	✗ 2,5412E+08	-0,51%
4	○	Candidate Point 1 (verified) DP				✗ 0,91351	-0,35%	✗ 2,5355E+08	-0,74%
5	○	Candidate Point 2	34,784	34,531	1,0178	✗ 0,91339	-0,37%	✗ 2,5475E+08	-0,27%
6	⊙	Candidate Point 3	33,792	34,782	1,0457	✗ 0,91676	0,00%	✗ 2,5543E+08	0,00%
*		<i>New Custom Candidate Point</i>	<i>30</i>	<i>30</i>	<i>3</i>				

Рисунок 44 – Выбор Candidate Point 1 в качестве Design Point

27. В основном окне проекта Project Schematic дважды щелкните Parameter Set. Затем на панели Table щелкните правой кнопкой мыши

DP 1 и выберите Copy inputs to Current (рисунок 45). Текущая точка проектирования теперь имеет те же значения входных параметров, что и ваш лучший кандидат. Щелкните правой кнопкой мыши текущую точку проектирования и выберите Update Selected Design Points (рисунок 46).

Table of Design Points							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P1 - thick_ds	P2 - horiz_ds	P3 - vert_ds	P8 - thick_tube	P9 - Geometry Mass	P10 - Equivalent Stress Maximum
2	Units	mm	mm	mm	mm	kg	Pa
3	DP 0 (Current)	2,5	34,632	34,807	1,018	0,91351	2,5355E+08
4	DP 1	2,5	34,632	34,807	1,018	0,91351	2,5355E+08
*							

Рисунок 45 – Выбор DP1 в качестве текущей точки проекта

Table of Design Points							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	P1 - thick_ds	P2 - horiz_ds	P3 - vert_ds	P8 - thick_tube	P9 - Geometry Mass	P10 - Equivalent Stress Maximum
2	Units	mm	mm	mm	mm	kg	Pa
3	DP 0 (Current)	2,5	34,632	34,807	1,018	0,91351	2,5355E+08
4	DP 1	2,5	34,632	34,807	1,018	0,91351	2,5355E+08
*							

Рисунок 46 – Обновление расчетной точки

28. Закройте окно Parameter Set. Дважды щелкните ячейку Solution, чтобы ее открыть (рисунок 47).

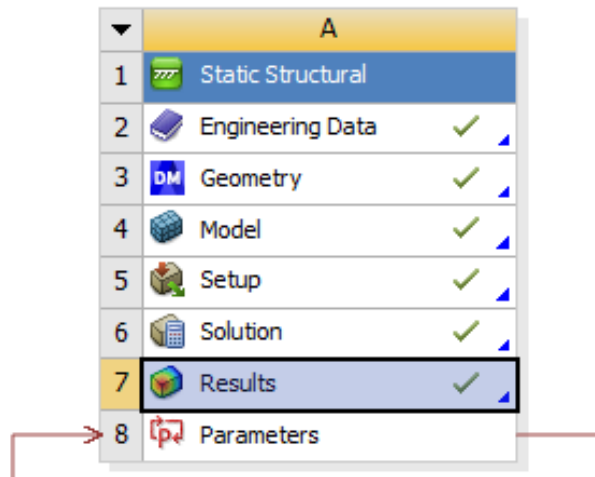


Рисунок 47 – Ячейка Results

29. В Outline в окне выберите EquivalentStress, чтобы просмотреть результаты (рисунок 48).

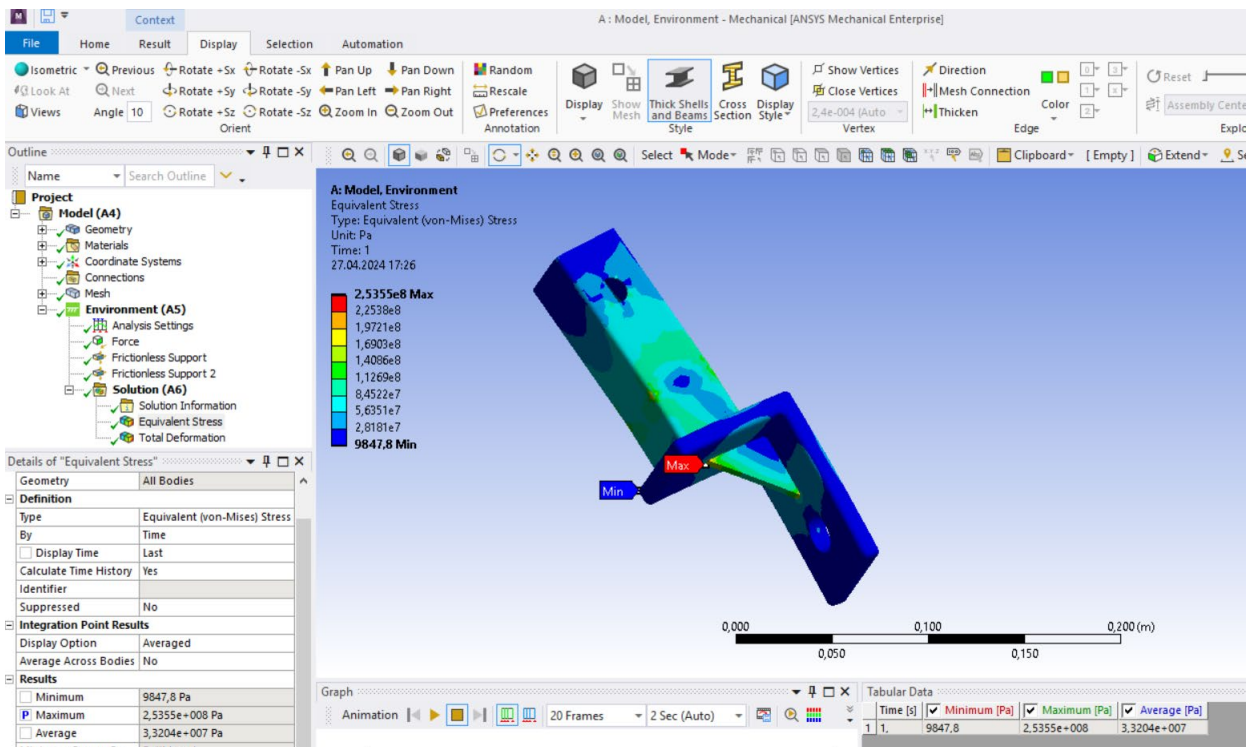


Рисунок 48 – Результаты расчетов

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. 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.
6. Введение в технологии компьютерного моделирования. Оболочка ANSYS WORKBENCH : практическое пособие / сост. Ю. В. Никитюк. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2020. – 34 с.
7. Никитюк, Ю. В. Введение в технологии компьютерного моделирования. ANSYS WORKBENCH : практическое руководство / Ю. В. Никитюк, В. А. Прохоренко, А. А. Серeda. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2023. – 43 с.

Производственно-практическое издание

**Никитюк Юрий Валерьевич,
Середа Андрей Александрович,
Баевич Георгий Александрович,
Максименко Александр Васильевич**

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

Практическое руководство

Редактор Е. С. Балашова
Корректор В. В. Калугина

Подписано в печать 27.06.2024. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд. л. 2,54.
Тираж 10 экз. Заказ 390.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013 г.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий в качестве:
издателя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013 г.;
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017 г.
Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.

