



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала: <http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 519.252

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОСТИКА ДЛЯ ПРЫЖКОВ В БАССЕЙН

¹Калашников В.С., Ткачева Е.Г.

ФГБОУ ВО "МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)", Москва, Россия, (105005, город Москва, 2-Я Бауманская ул, д. 5 стр. 1), e-mail: ¹akm543@mail.ru

В статье рассматривается как найти оптимальные длину и толщину доски, которая будет выполнять функцию мостика для прыжков в бассейн, за счет многокритериальной оптимизации размерных параметров. В качестве условия имеем общедоступный городской бассейн, в котором планируется установить мостик (деревянную доску) в форме параллелепипеда, длина которого колеблется от 225 до 275 сантиметров. Материал доски – дуб. В зависимости от характера действующего усилия максимальное допустимое напряжение для данного типа древесины колеблется от 4 до 12 МПа. Максимальная нагрузка на доску равняется 1500 Н.

Ключевые слова: Многокритериальная оптимизация, ANSYS Workbench, ANSYS DesignXplorer, Метод DOE, поверхность отклика, алгоритм оптимизации MOGA.

MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF A POOL DIVING BRIDGE

¹Kalashnikov V.S., Tkacheva E.G.

BAUMAN MOSCOW STATE TECHNICAL UNIVERSITY (NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY), Moscow, Russia, (105005, Moscow, 2nd Baumanskaya ul, 5 bld. 1), e-mail: ¹akm543@mail.ru

The article discusses how to find the optimal length and thickness of a board that will serve as a diving bridge into a pool, using multi-criteria optimization of dimensional parameters. The condition is a public city pool, in which it is planned to install a bridge (wooden board) in the form of a parallelepiped, the length of which varies from 225 to 275 centimeters. The board material is oak. Depending on the nature of the acting force, the maximum allowable stress for this type of wood varies from 4 to 12 MPa. The maximum load on the board is 1500 N.

Keywords: Multicriteria optimization, ANSYS Workbench, ANSYS DesignX-plorer, DOE method, response surface, MOGA optimization algorithm.

Допущения компьютерной модели

Для создания модели, необходимо учесть следующие допущения:

- в расчетах не будем учитывать влажность, которая должна влиять на максимальное допустимое напряжение;
- дополнительные силовые нагрузки, действующие на доску при многократных прыжках перед главным прыжком в воду и прыжок с разбега;
- деструктивно действующие на деталь параметры при длительной эксплуатации, тоже не будем учитывать с целью упрощения задачи;
- будем считать, что небольшая стойка у бассейна точно выдержит конструкцию.

При помощи модуля *ANSYS DesignXplorer* планируется подобрать оптимальные длину и толщину доски с учетом требований к мере деформации при максимальной нагрузке, максимальным допустимым напряжениям и массе доски. В приоритет поставим легкость конструкции и уменьшение деформаций. В ходе работы необходимо построить модель деревянной доски, приложить к ней силу, провести расчёт модели, использовать алгоритмы оптимизации.

Теоретическая часть

Мостики для прыжков в бассейн бывают различных типов, но в данной работе мостик будет рассматриваться, как трамплин или доска для прыжков в воду. Данная конструкция имеет гибкую площадь для ныряния и соответственно пружинит под собственным весом спортсмена, тем самым давая ему наибольшую амплитуду для задуманного прыжка.[1]

При проектировании сложных конструкций одной из актуальных задач является оптимизация ее элементов. В расчетной среде *ANSYS Workbench* начиная с версии 7.0 присутствует специализированный модуль для решения задач оптимизации — *ANSYS DesignXplorer*.

Важно собрать достаточно информации о текущем варианте конструкции, чтобы ответить на вопросы «что-если» и оценить влияние переменных на характеристики изделия. При этом, основываясь на точной информации, можно принять правильные решения, даже в случае неожиданного изменения конструктивных ограничений. [2] Модуль *ANSYS DesignXplorer* описывает взаимосвязи между параметрами конструкции и характеристиками изделия при помощи метода планирования эксперимента (DOE), объединенного с поверхностями отклика. Метод DOE и поверхности отклика предоставляют всю информацию, которая позволяет в полной мере реализовать преимущества концепции «Проектирование изделий на основе инженерных расчетов». Когда известна зависимость производительности от конструкционных переменных, то легко понять и определить все требуемые изменения, которые нужно внести, чтобы конструкция соответствовала предъявляемым требованиям. После создания поверхностей отклика можно легко обмениваться информацией в удобном для понимания виде: кривые, поверхности, чувствительности и т.д.[3]

ANSYS DesignXplorer содержит ведущие в отрасли алгоритмы, которые анализируют таблицу проектных режимов для создания поверхности отклика. Поверхность отклика может быть использована для мгновенного предсказания производительности устройства без проведения дополнительных вычислений. Эта мета-модель пониженного порядка применяется для исследований чувствительности, оптимизации и б-сигма расчетов.

Практическая часть

Toolbox → Analysis Systems → Static Structural → зажав правой кнопкой мыши, перетаскиваем в область Project Schematic.

Static Structural → Geometry.

Создание геометрической модели

Открываем в Geometry редактор моделей Design Modeler и начинаем строить 3D-модель. Масштаб для создания модели поставим в сантиметрах.

Создаём скетч в плоскости XY.

Sketching → Draw → Rectangle, нарисуем прямоугольное сечение доски.

Sketching → Dimensions → General, зададим ширину (80 см) и толщину (8 см).

При помощи инструмента Extrude зададим длину доски (250 см). Получаем простейшую геометрическую деталь (Рисунок 1).

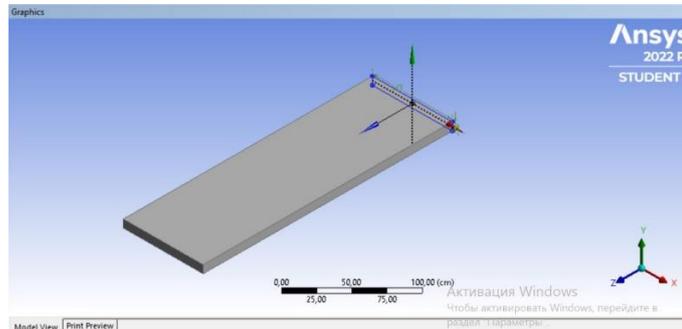


Рисунок 1 – Построение геометрической детали

Добавим длину и толщину в перечень регулируемых параметров, нажав на пустую область слева от наименования переменной, тем самым иницируя появление объекта Parameter Set в Project Schematic.[4]

	Name	Value	Type	Comment
✓	length	250 cm	Length	
✓	thickness	8 cm	Length	

Рисунок 2 – Параметры

Расчет в Mechanical

Возвращаемся в Project Schematic: Project Schematic → Static Structural → Model.
В качестве материала была выбрана древесина Wood, Oak (Рисунок 3).

Wood, Oak	
Oak (quercus spp.) (quercus spp.), longitudinal direction (L)	
Data compiled by the Granta Design team at ANSYS, incorporating various sources including JAHM and MagWeb. ANSYS Inc. provides no warranty for this data.	
Density	935,70 kg/m ³
Structural	
Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2,278e+10 Pa
Poisson's Ratio	0,37420
Bulk Modulus	3,018e+10 Pa
Shear Modulus	8,2885e+09 Pa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	4,69e-06 1/°C
Tensile Ultimate Strength	1,467e+08 Pa
Tensile Yield Strength	4,776e+07 Pa
Thermal	
Isotropic Thermal Conductivity	0,45280 W/m·°C

Рисунок 3 – Материал Wood, Oak

Outline → Mesh → Generate Mesh, генерируем разбиения.

Outline → Static Structural → Insert → Fixed Support, закрепим торец доски.

Outline → Static Structural → Insert → Force, приложим силу 1500 Н относительно оси Y
ко всей перекладине (значение силы взято из постановки задачи) (Рисунок 4).

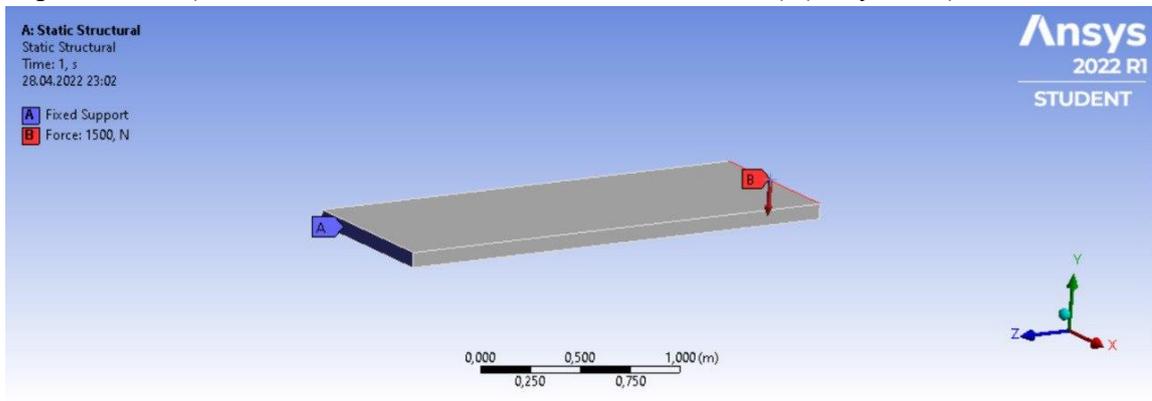


Рисунок 4 – Закреплённый торец и приложенная сила

Outline → Static Structural → Solution → Insert → Total Deformation, добавим измерение на деформацию.

Outline → Static Structural → Solution → Insert → Equivalent Stress, добавим измерение на эквивалентные напряжение, использующиеся для определения предела прочности материала (Рисунок 5-6).

Произведем анализ модели:

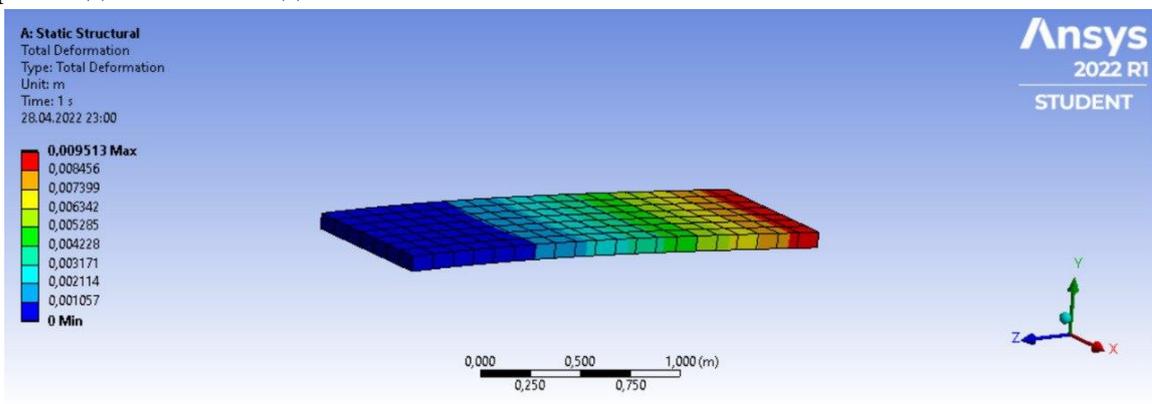


Рисунок 5 – Расчёт измерений на *Total Deformation*

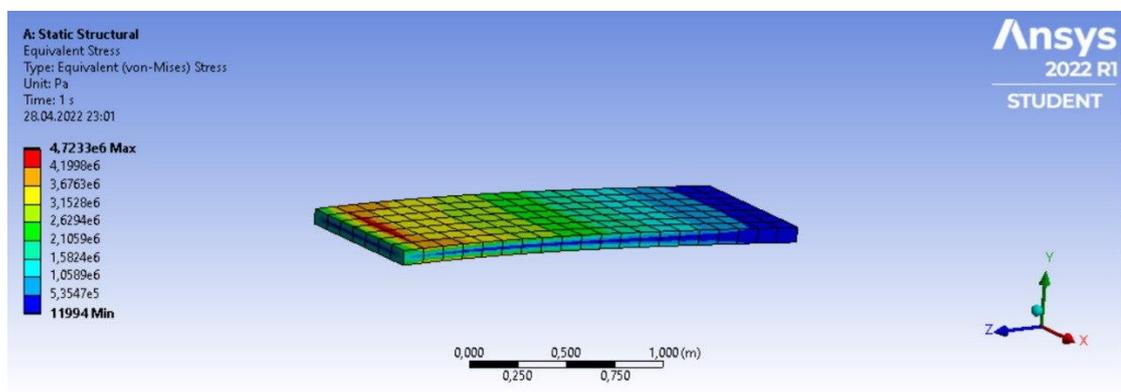


Рисунок 6 – Расчёт измерений на *Equivalent Stress*

Получили максимальную деформацию около 10 мм и максимальное напряжение на нагрузку около 4,72 МПа.

Массу модели, максимальную деформацию и максимальное напряжение обозначим как выходные параметры для будущей многокритериальной оптимизации.[5]

Многокритериальная оптимизация с модулем *DesignXplorer*

Toolbox → Design Exploration → Response Surface Optimization, зажав правой кнопкой мыши, перетаскиваем в область Project Schematic, соединяя с Parameter Set (Рисунок 7).

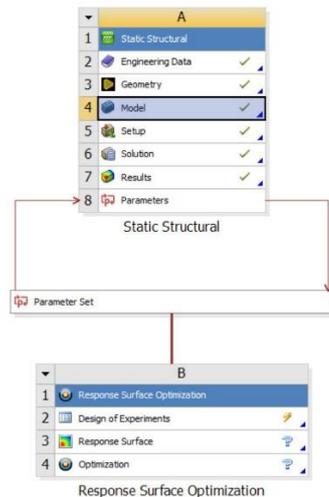


Рисунок 7 – Project Schematic после добавления модуля *DesignXplorer*

Project Schematic → Response Surface Optimization → Design of Experiments.

Зададим область определения входных параметров: пусть, согласно постановке задачи, длина доски колеблется от 225 до 275 см, а толщина сечения соответственно может лежать в диапазоне от 7,2 до 8,8 см.

По области определения при помощи стандартного алгоритма Design of Experiments → Central Composite Design составим набор опорных точек, при этом автоматически произведется расчёт выходных параметров (Рисунок 8).

Table of Schematic B2: Design of Experiments (Central Composite Design : Auto Defined)						
	A	B	C	D	E	F
1	Name	P1 - length (cm)	P2 - thickness (cm)	P3 - Total Deformation Maximum (m)	P4 - Equivalent Stress Maximum (Pa)	P5 - Geometry Mass (kg)
2	1 DP	250	8	0,009513	4,7233E+06	149,71
3	2	225	8	0,0069067	4,2528E+06	134,74
4	3	275	8	0,012698	5,1951E+06	164,68
5	4	250	7,2	0,013037	5,8327E+06	134,74
6	5	250	8,8	0,0071541	3,9019E+06	164,68
7	6	225	7,2	0,0094643	5,2517E+06	121,27
8	7	275	7,2	0,017404	6,4155E+06	148,21
9	8	225	8,8	0,0051946	3,5133E+06	148,21
10	9	275	8,8	0,0095488	4,2916E+06	181,15

Рисунок 8 – Таблица с опорными точками

Можно заметить, что среди опорных точек встречаются крайние случаи, в которых напряжения превышают допустимые пределы, поэтому для поиска оптимального решения

необходимо использовать поверхность отклика Response Surface, построенную на основе данных опорных точек.

Project Schematic → Response Surface Optimization → Response Surface

Выбираем алгоритм построения поверхности отклика – Standard Response Surface.

Также осуществим генерацию 3-х верификационных точек – точек, максимально удаленных от опорных.

Сгенерированная поверхность отклика позволяет проанализировать зависимость любого выходного параметра от входных значений длины и толщины (Рисунки 9-11).

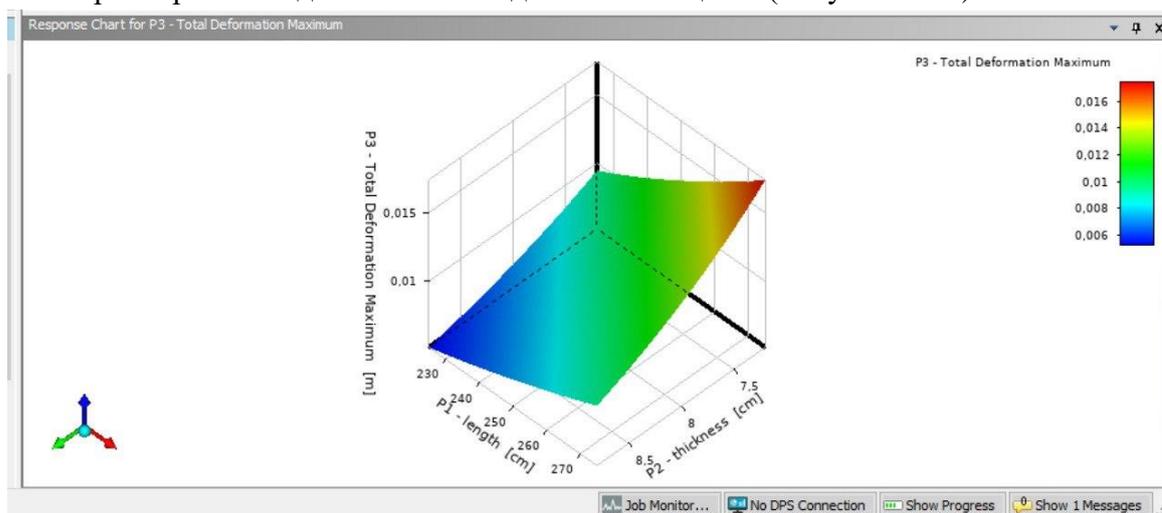


Рисунок 9 – Зависимость максимальной деформации от входных параметров

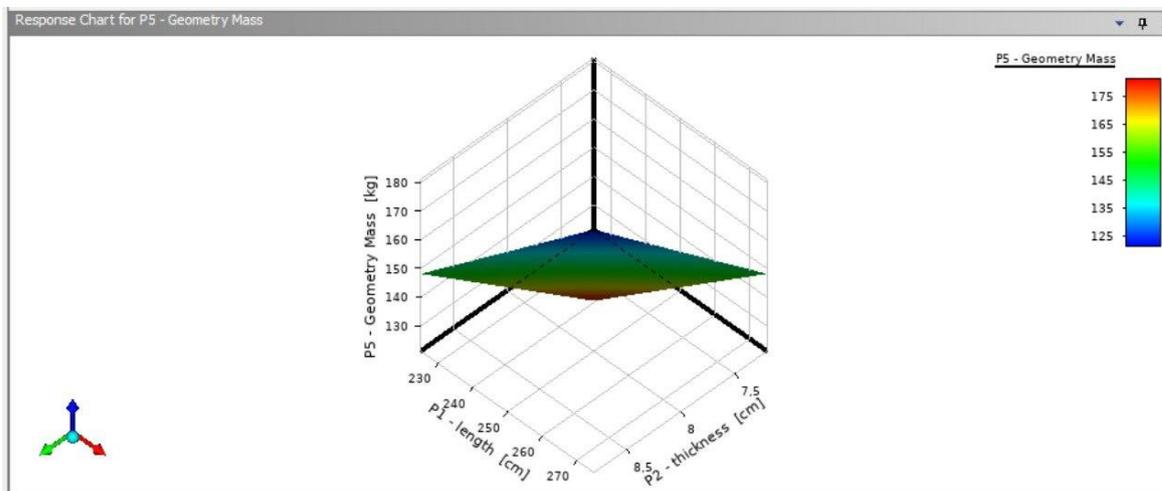


Рисунок 10 – Зависимость массы конструкции от входных параметров

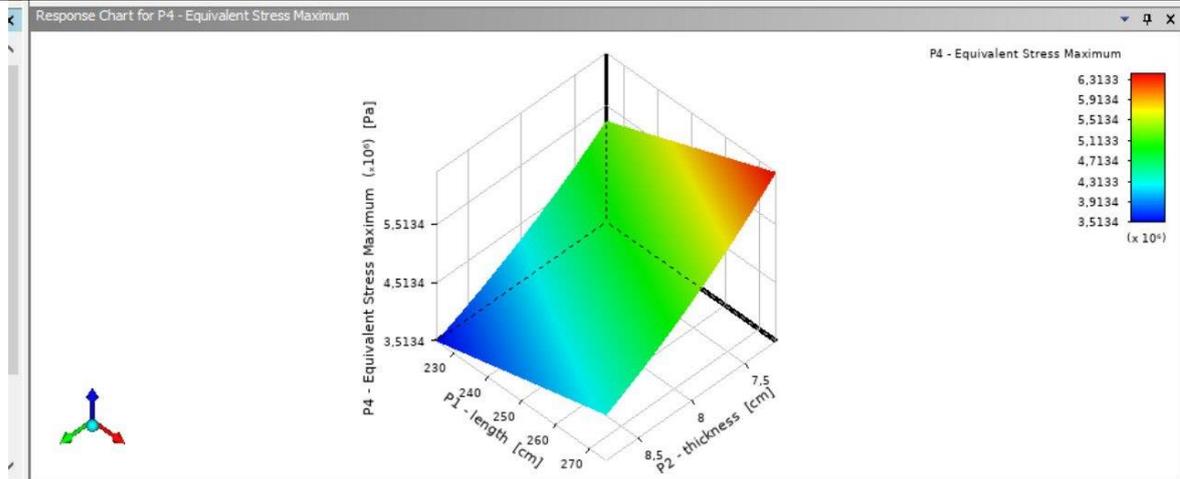


Рисунок 11 – Зависимость максимального напряжения от входных параметров

Также можно проанализировать, в какой степени влияет каждый отдельный входной параметр на величину выходного в разделе Local Sensitivity (Рисунок 12). Можно убедиться, что толщина сечения (– 61,655%) сильнее влияет на максимальное напряжение, чем длина перекладки (33,781%), а относительно максимальной деформации толщина сечения (– 49,753%) и длина (47,925%) уже более соразмерны по влиянию на конечный результат.

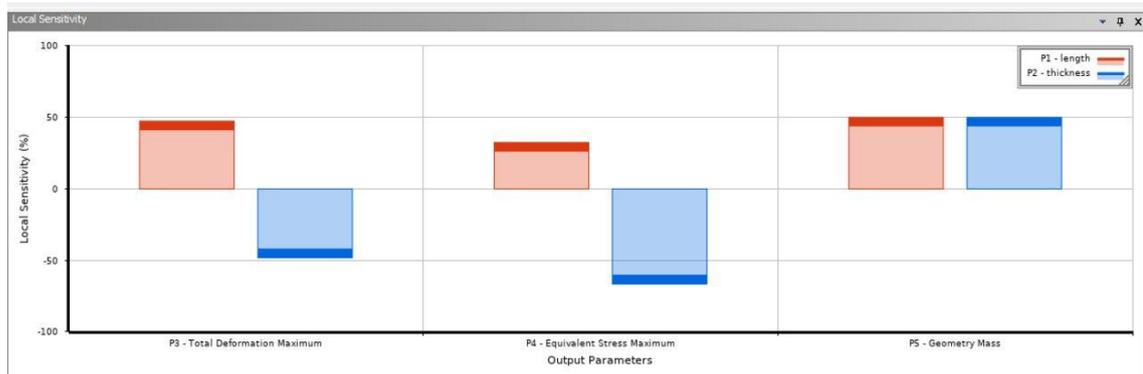


Рисунок 12 – Результат *Local Sensitivity*

Полученные данные уже позволяют вычислить оптимальные размеры конструкции, однако, встроенные в ANSYS DesignXplorer алгоритмы оптимизации дают возможность автоматически подобрать наиболее выгодные параметры с учетом того, какие из них являются для нас более приоритетными.

Project Schematic → Response Surface Optimization → Optimization

В разделе Objectives and Constraints у нас есть возможность выбрать, к чему должен стремиться каждый из параметров (Рисунок 13).

Согласно поставленной задаче, задаём следующие направления оптимизации и их приоритеты (Рисунок 14):

- Минимизация деформаций, приоритет высокий
- Минимизация массы, приоритет стандартный
- Максимальное допустимое напряжение: 5 МПа

Table of Schematic B4: Optimization									
	A	B	Objective			Constraint			
1	Name	Parameter	Type	Target	Tolerance	Type	Lower Bound	Upper Bound	Tolerance
3	P1	P1 - length	No Objective			No Constraint			
4	P2	P2 - thickness	No Objective			No Constraint			
5	Minimize P3	P3 - Total Deformation Maximum	Minimize	0		No Constraint			
6	P4 <= 5E+06 Pa	P4 - Equivalent Stress Maximum	No Objective			Values <= Upper Bound		5E+06	0,001
7	Minimize P5	P5 - Geometry Mass	Minimize	0		No Constraint			
*									

Рисунок 13 – Таблица *Objectives and Constraints*

Table of Schematic B4: Optimization	
A	B
1	Optimization Study
2	Minimize P3 Goal, Minimize P3 (Default importance)
3	Minimize P5 Goal, Minimize P5 (Default importance)
4	P4 <= 5E+06 Pa Strict Constraint, P4 values less than or equals to 5E+06 Pa (Default importance)
5	Optimization Method
6	MOGA The MOGA method (Multi-Objective Genetic Algorithm) is a variant of the popular NSGA-II (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II) based on controlled elitism concepts. It supports multiple objectives and constraints and aims at finding the global optimum.
7	Configuration Generate 100 samples initially, 100 samples per iteration and find 3 candidates in a maximum of 20 iterations.
8	Status

Рисунок 14 – Направление оптимизации и приоритеты

Автоматически был выбран алгоритм оптимизации MOGA – многоцелевой генетический алгоритм (Рисунок 15).

Запускаем алгоритм оптимизации:

9	Candidate Points			
10		Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
11	P1 - length (cm)	225,7	225,67	225,71
12	P2 - thickness (cm)	8,2867	8,2814	8,2789
13	P3 - Total Deformation Maximum (m)	★ 0,0062748	★ 0,0062848	★ 0,0062933
14	P4 - Equivalent Stress Maximum (Pa)	★★★ 3,9731E+06	★★★ 3,9778E+06	★★★ 3,9808E+06
15	P5 - Geometry Mass (kg)	✖✖ 140	✖✖ 139,9	✖✖ 139,88

Рисунок 15 – Результат оптимизации

Таким образом, были подобраны оптимальные характеристики доски:

- Длина доски – 225,7 см
- Толщина доски – 8,2867 см

Минимизация массы позволила сократить значение до 140 кг.

ANSYS предоставляет трехзвездочную систему для оценки соответствия поверхности отклика контрольным точкам. По результатам оптимизации видно, что значение массы отклоняется от поверхности отклика. Это можно объяснить небольшим размером выборки, использованной для построения поверхности.

Модуль оптимизации также дает возможность детальное изучение результатов оптимизации при помощи диаграммы Парето. Из полученной диаграммы можно оценить, потенциал конструкции.

Также можно получить графическое отображение всех сгенерированных samples, изучить глобальную чувствительность выходных параметров к входным.

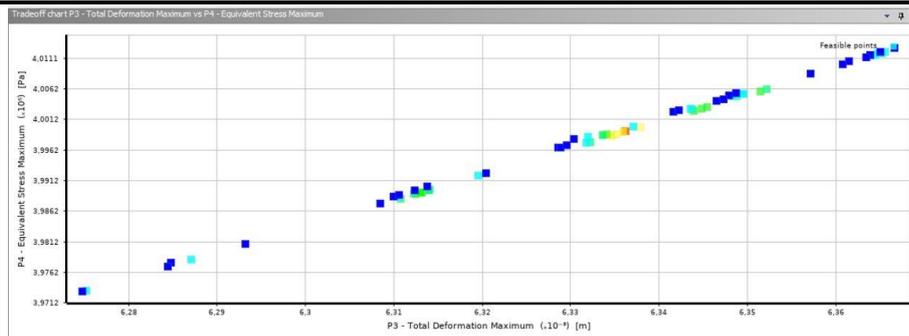


Рисунок 16 – Диаграмма Парето

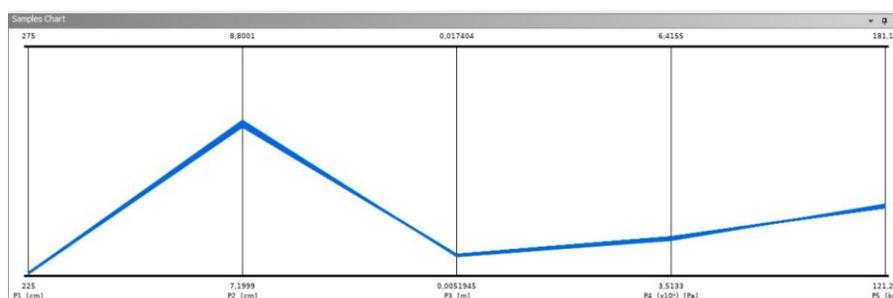


Рисунок 17 – *Samples Chart*

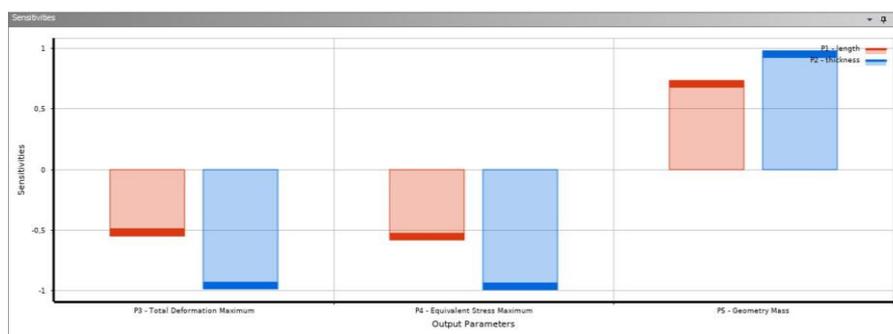


Рисунок 18 – Итоговая чувствительность

Выводы

Были найдены оптимальные решения поставленной задачи с учетом уровней приоритетности отдельных характеристик. Несмотря на то, что минимизация массы и деформаций для одного и того же материала – конкурирующие требования, оптимизирующий модуль позволил найти наиболее подходящее решение, а также избежать ручных вычислений и сэкономить достаточное количество времени при решении поставленной задачи.

Список литературы

1. Решение задач механики сплошной среды в программном комплексе ANSYS: метод. указания / М.В. Мурашов. С.Д. Панин. — М.: Издательство: г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. — 40 с.: ил.
2. Оптимизация конструкций ANSYS DesignXplorer – Текст: электронный // ansysadvantage.ru: [сайт]. [URL: <https://www.ansysadvantage.ru/design-optimization-ansys-designexplorer>] (дата обращения: 13.10.2024)

3. ANSYS Parametric Design Language Guide – Текст: электронный // www.mm.bme.hu: [сайт]. URL: https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/fea/ansys/ans_apdl.pdf (дата обращения: 10.10.2024)
4. Мостик для бассейна – Текст: электронный // [URL: <http://www.bolshoyvopros.ru/questions/3757677-kak-nazyvaetsja-shtuka-s-kotoroj-prygajut-v-bassejn.html>] (дата обращения: 11.10.2024)
5. Основные сведения о программном комплексе ANSYS. Геометрическое моделирование / Е.А. Солдусова – Издательство: г. Самара, Самарский государственный технический университет, 2010. — 54 с.: ил.

References

1. Solving problems of continuum mechanics in the ANSYS software package: method. instructions / M.V., Murashov. S.D. Panin. — М.: Publisher: Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2009. — p.40: ill.
 2. Optimization of structures ANSYS DesignXplorer – Text: electronic // ansysadvantage.ru : [website]. [URL: <https://www.ansysadvantage.ru/design-optimization-ansys-designxplorer>] (accessed: 10/13/2024)
 3. ANSYS Parametric Design Language Guide – Text: electronic // www.mm.bme.hu : [website]. URL: https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/fea/ansys/ans_apdl.pdf (accessed date: 10.10.2024).
 4. Pool bridge – Text: electronic // [URL: <http://www.bolshoyvopros.ru/questions/3757677-kak-nazyvaetsja-shtuka-s-kotoroj-prygajut-v-bassejn.html>] (date of request: 11.10.2024)
 5. Basic information about the ANSYS software package. Geometric modeling / E.A. Soldusova – Publishing house: Samara, Samara State Technical University, 2010. — p.54 ill.
-