



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Презентация к научно исследовательской работе
на тему:

“Расчет накопленной усталостной
поврежденности. Реализация алгоритма расчёта
накопленной усталостной поврежденности”

Студент группы РК5-72Б: Запсельский В.Н.
Научный руководитель: Киселев И.А.

Цели и задачи проекта

Цели проекта: Целью научной исследовательской работы является изучение методов расчёта накопленной поврежденности при воздействии нескольких силовых факторов. Ставится задача реализации собственного программного модуля для численной оценки накопленной усталостной поврежденности и дальнейшее сравнение с расчётом КЭ моделирования, выполненного в Ansys. Также целью научной работы было изучение научных статей и различных методов расчета накопленной поврежденности.

В соответствии с целью работы были поставлены следующие **задачи:**

- Освоить методику и **численный алгоритм** расчета накопленной усталостной поврежденности;
- Реализовать разработанный алгоритм в виде **прикладной программы**;
- **Выполнить проверку** реализованной программы
- Провести анализ полученных результатов, а также проверку **методом конечных элементов** в среде ANSYS;
- Выполнить **обзор литературных источников** по данной теме;

Блок-схема алгоритма расчета накопленной усталостной поврежденности

Ниже представлена блок-схема алгоритма, по которой производились все дальнейшие расчеты для моделей:

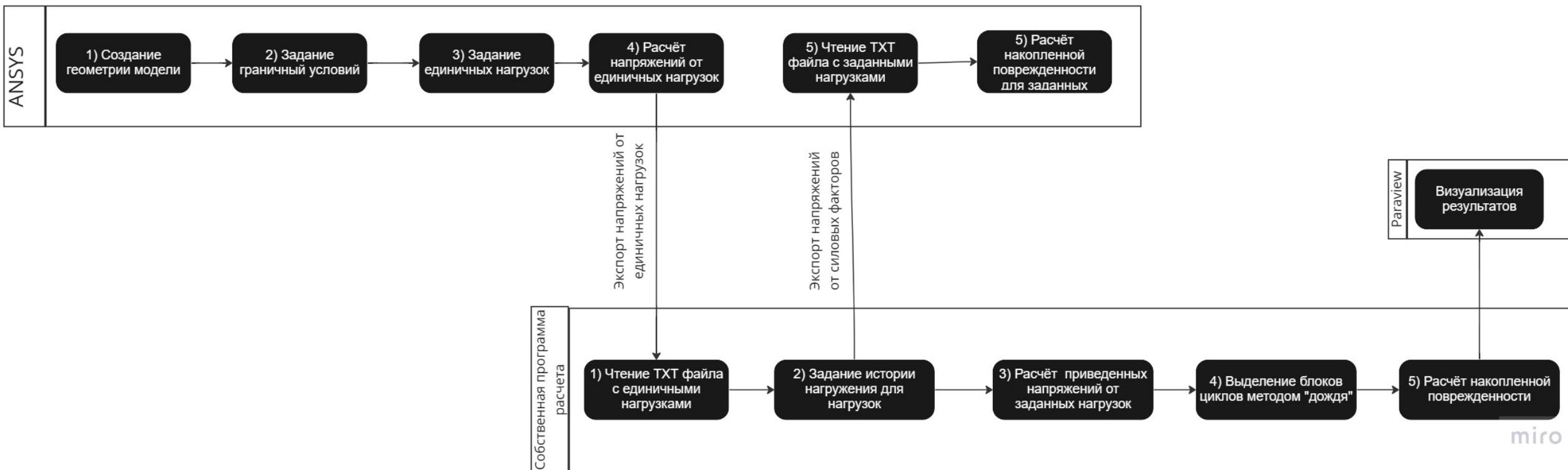


Рисунок 1 – Блок схема алгоритма расчета накопленной усталостной поврежденности

Описание математической модели

1. Расчёт приведенных напряжений:

Для каждого силового фактора выполняется расчет эквивалентных напряжений по теории Мизеса.

Ниже представлена формула, по которой производится расчет:

$$\sigma_{\text{экв.}ij} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{1ij} - \sigma_{2ij})^2 + (\sigma_{2ij} - \sigma_{3ij})^2 + (\sigma_{3ij} - \sigma_{1ij})^2} \quad (1)$$

Где: i — порядковый номер элемента; j — номер временного отрезка; $\sigma_{1,2,3}$ — значения главных напряжений

2. Расчет напряжений от заданной истории нагружения:

Расчет напряжений от заданной нагрузки в каждом элементе в конкретный момент времени выполняется по следующей формуле:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{1ij} * F_{ij} \quad (2)$$

Где: i — порядковый номер элемента; — номер временного отрезка; σ_{1ij} — значение напряжения от единичной нагрузки;

F_{ij} — значение силового фактора в элементе i в момент времени j

Описание математической модели

3. Суммирование напряжений от всех силовых факторов:

Пункт 2 повторяется нужное количество раз для всех силовых факторов. После чего производится суммирование полученных результатов:

$$\sigma_{\Sigma ij} = \sigma_{1ij} + \sigma_{2ij} + \dots + \sigma_{nij} \quad (3)$$

Где: i – порядковый номер элемента; j – номер временного отрезка;

$\sigma_{1ij}, \sigma_{2ij}, \dots, \sigma_{nij}$ – значения напряжений от силовых факторов; $\sigma_{\Sigma ij}$ – суммарное напряжение от n силовых факторов;

Таким образом получаем поле приведенных напряжений от нескольких силовых факторов.

4. Дискретизация случайных процессов: метод "дождя"

Алгоритм:

- 1) Поток, начавшийся в точке максимума, прерывается в тот момент, когда встретится максимум больший, чем исходный.
- 2) Поток, начавшийся в точке минимума, прерывается, когда встретится минимум меньший, чем исходный.
- 3) При встрече нескольких потоков движение продолжает тот, который берет начало в экстремуме с меньшим номером, а остальные прерываются
- 4) Поток, не встретивший препятствий, продолжает свой путь.

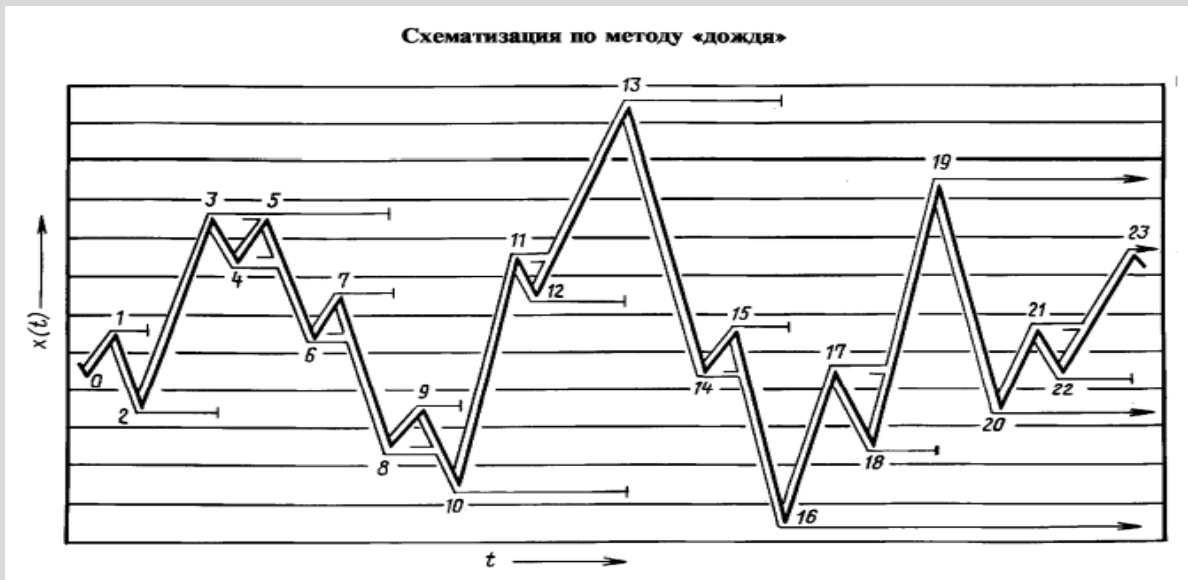


Рисунок 2 – Графическое изображение метода "дождя"

Описание математической модели

5. Расчёт накопленной усталостной поврежденности: линейная теория суммирования накопленной поврежденности

Линейная теория суммирования накопленной усталостной поврежденности описывается следующей формулой:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (4)$$

Где:

D - накопленное усталостное повреждение, рассчитанное по линейной теории суммирования

n_i - количество циклов приложенной нагрузки при заданном уровне напряжения σ_i

N_i - количество циклов до разрушения при заданном уровне напряжения σ_i

Для оценки количества циклов приложенной нагрузки при заданном уровне напряжения используют кривые Веллера:

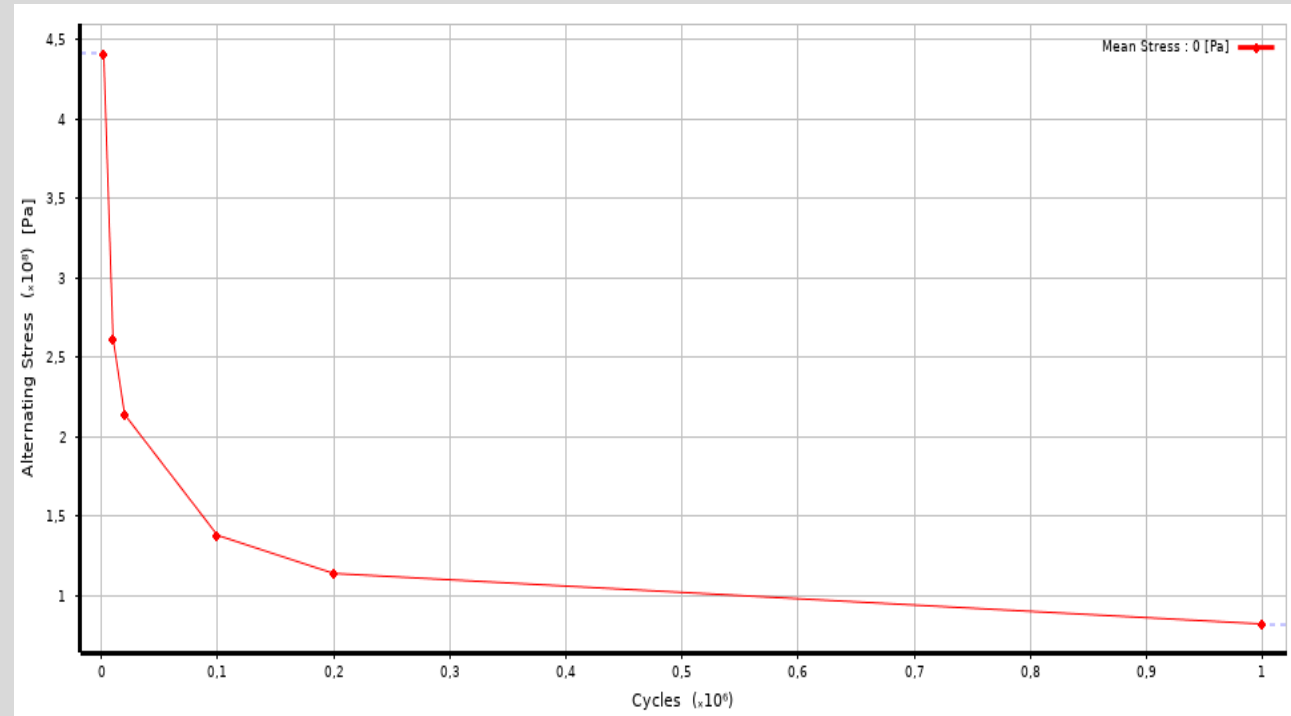


Рисунок 3 – Кривая Веллера для конструкционной стали в Ansys

Тестовая задача №1

Идея: проверка корректности суммирования полей напряжений от нескольких силовых факторов при многоосном напряженно-деформированном состоянии.

Нагрузка: сила и момент на правом торце стержня

Граничные условия: заделка на левом торце стержня

1.Результат накопленной поврежденности от действия силы:

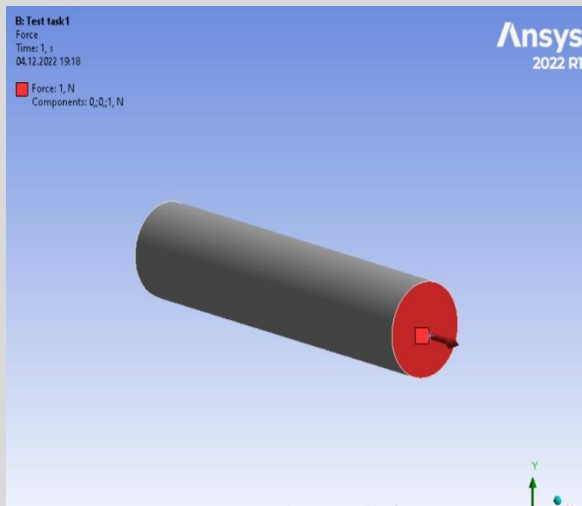


Рисунок 4 – Реализация нагрузки на стержень в виде силового фактора

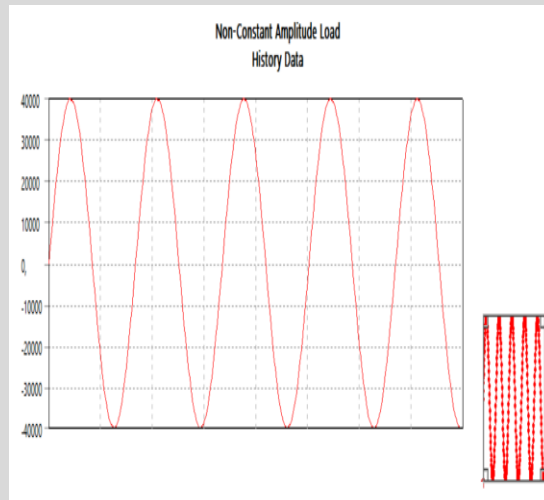


Рисунок 5– График истории нагружения от силового фактора

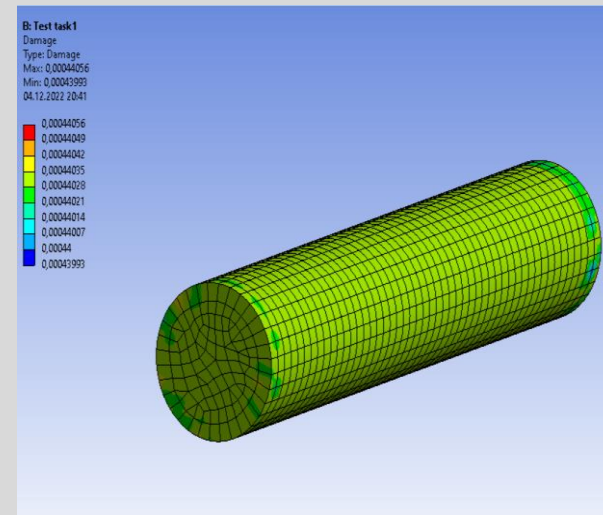


Рисунок 6– Визуализация результата расчета накопленной усталости от действия силового фактора (Ansys)

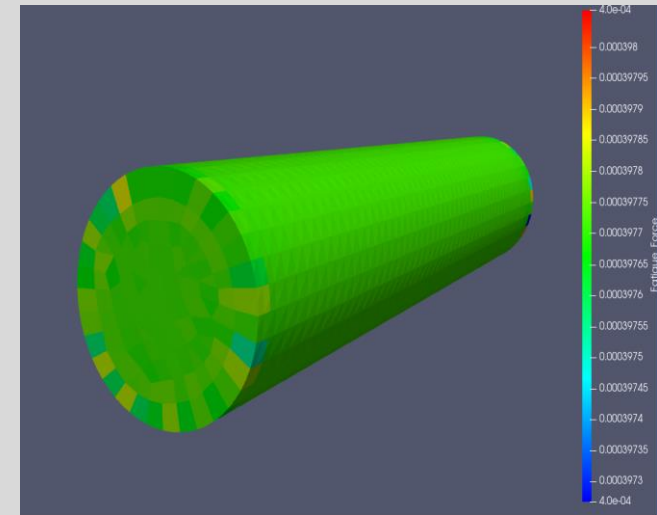


Рисунок 7– Визуализация результата расчета накопленной усталости от действия силового фактора (численный расчет)

Относительная погрешность: 8%

2.Результат накопленной поврежденности от действия момента:

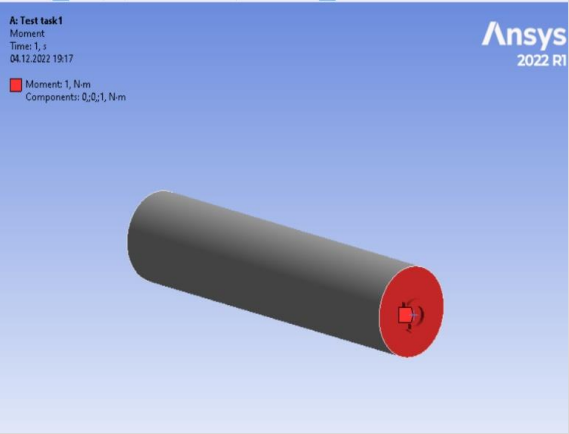


Рисунок 8— Реализация нагрузки на стержень в виде момента

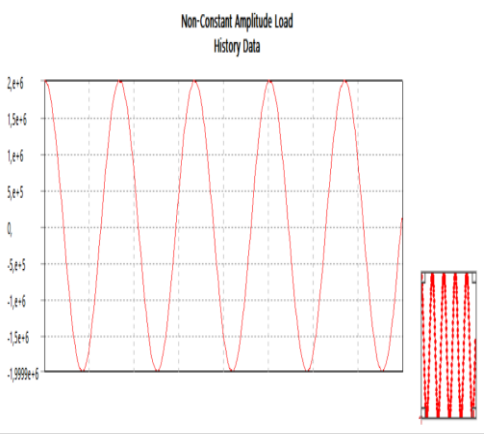


Рисунок 9— График истории нагружения от момента

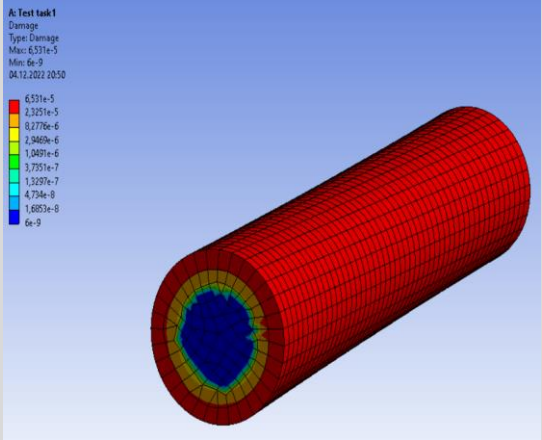


Рисунок 10 – Визуализация результата расчета накопленной усталости от действия момента (Ansys)

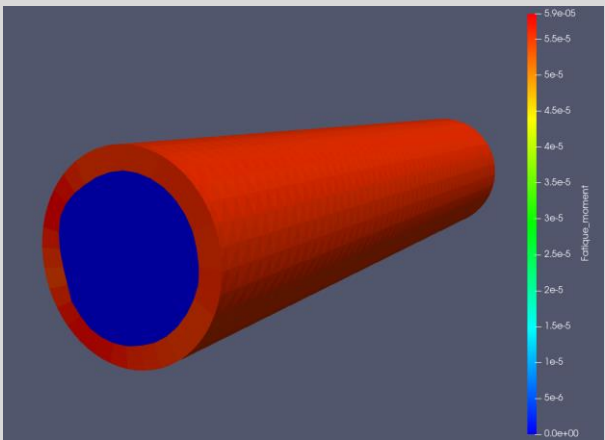


Рисунок 11— Визуализация результата расчета накопленной усталости от действия момента (численный расчет)

Относительная погрешность: 9%

3. Итоговый результат накопленной усталостной поврежденности от действия силы и момента:

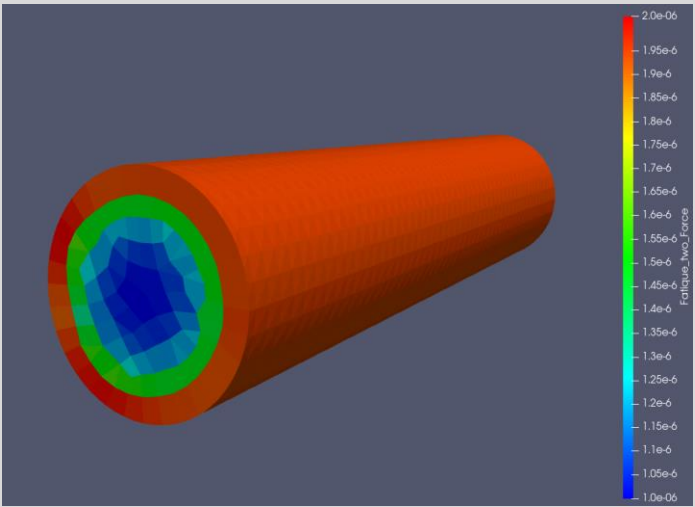
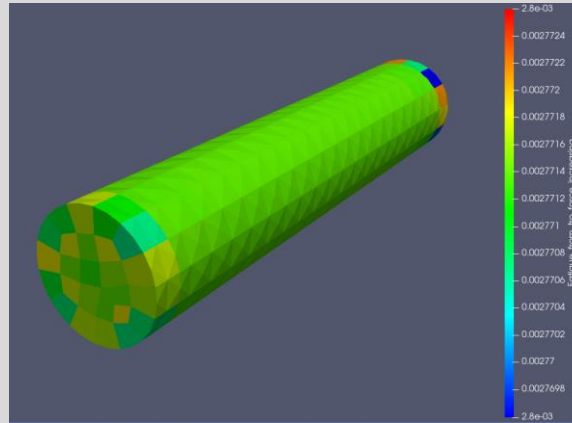
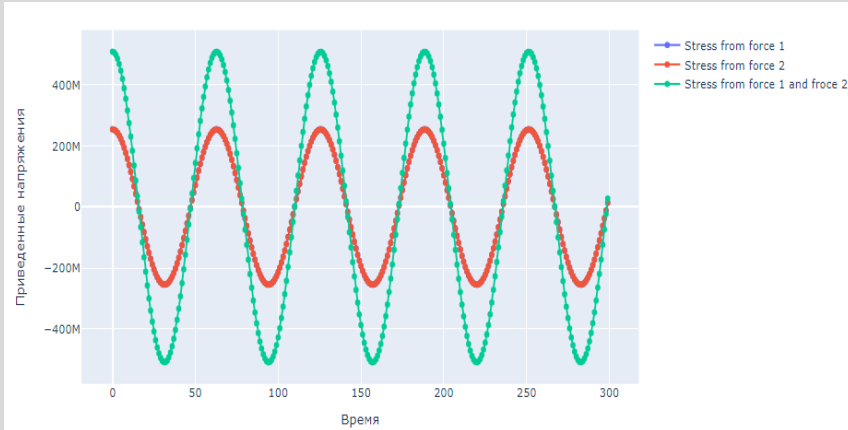


Рисунок 12 – Визуализация результата расчета накопленной усталости от действия момента и силы (численный расчет)

Тестовая задача №2

Идея: проверка корректности алгоритма суммирования накопленной поврежденности (часть алгоритма с кривой Веллера)

1. История нагружений от двух сил совпадает по фазе, **суммарная нагрузка – усиливающая:**



Из алгоритма выделений блоков циклов:

Размах напряжений: $\sigma = 1020 \text{ Мпа} \Rightarrow \sigma_A = \frac{\sigma}{2} = 510 \text{ Мпа}$

Количество циклов при данном уровне напряжения: $n = 5$.

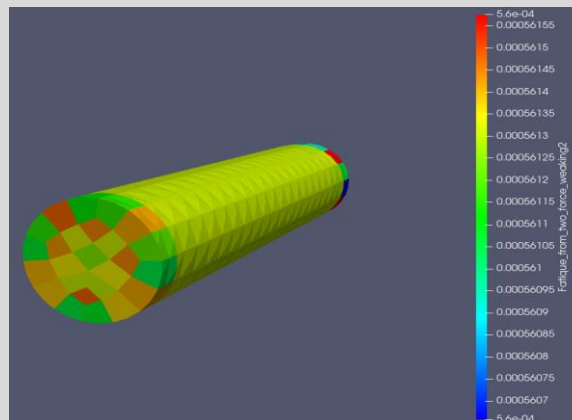
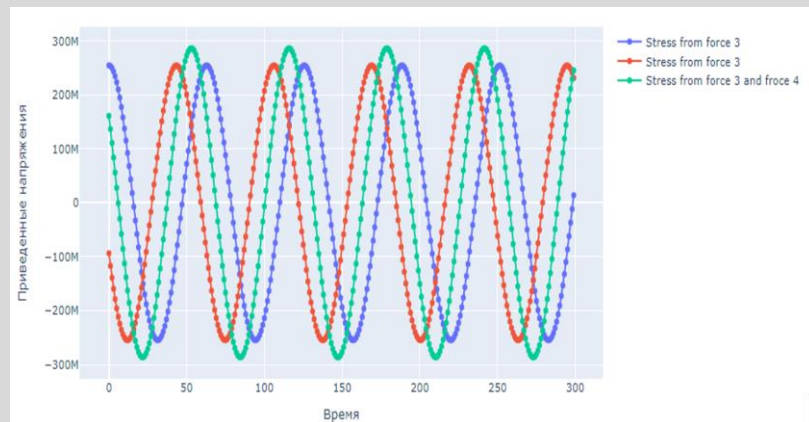
Из кривой Веллера: $N = 1800$.

Тогда, накопленная усталостная поврежденность:

$$D = \frac{n}{N} = \frac{5}{1800} = 0.0027, \text{ Относительная погрешность: } 2,5\%$$

Рисунок 13 –График зависимости напряжений. Рисунок 14 –Визуализация результата
Нагрузки совпадают по фазе. (силы совпадают по фазе)

2. История нагружений от двух сил не совпадает по фазе, **суммарная нагрузка – ослабляющая:**



Из алгоритма выделений блоков циклов:

Размах напряжений: $\sigma = 570 \text{ Мпа} \Rightarrow \sigma_A = \frac{\sigma}{2} = 285 \text{ Мпа}$

Количество циклов при данном уровне напряжения: $n = 5$.

Из кривой Веллера: $N = 9000$.

Тогда, накопленная усталостная поврежденность:

$$D = \frac{n}{N} = \frac{5}{9000} = 0.00055, \text{ Относительная погрешность: } 1,8\%$$

Рисунок 15 – График зависимости напряжений.
Нагрузки не совпадают по фазе.

Рисунок 16–Визуализация результата
(силы совпадают по фазе)

Тестовая задача №3

Идея: проверка корректности работы алгоритма выделения циклов методом “дождя”

1. Решение тестовой задачи для дискретной функции:

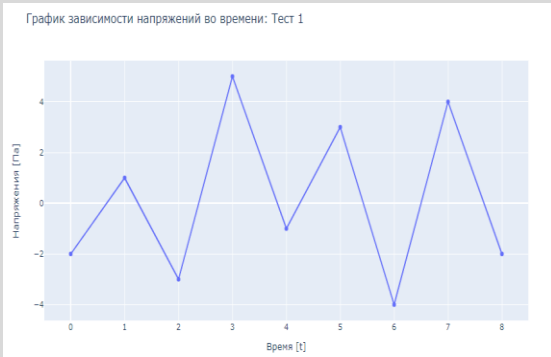


Рисунок 17 – График зависимости напряжений во времени для теста №1



Рисунок 18 – Анализ выступающих вершин для теста №1

Размах	Кол-во циклов
3	0,5
4	1,5
6	0,5
8	1
9	0,5

Таблица 1 – Результаты теста №1 (расчет руками)

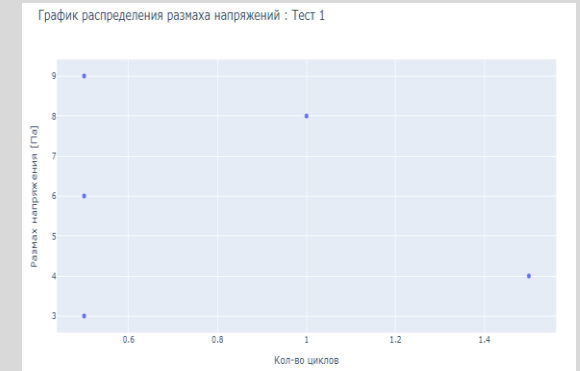


Рисунок 19 – Результаты теста №1 (расчет с помощью программы)

2. Решение тестовой задачи для непрерывной функции:

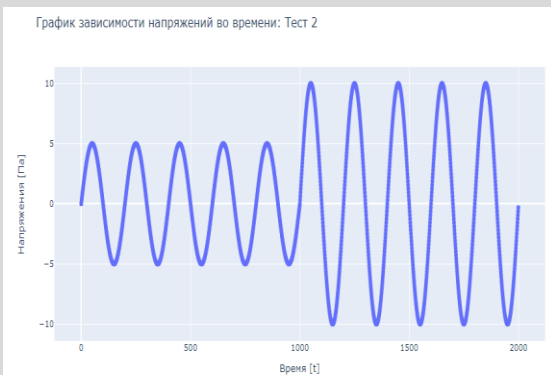


Рисунок 20 – График зависимости напряжений во времени для теста №2

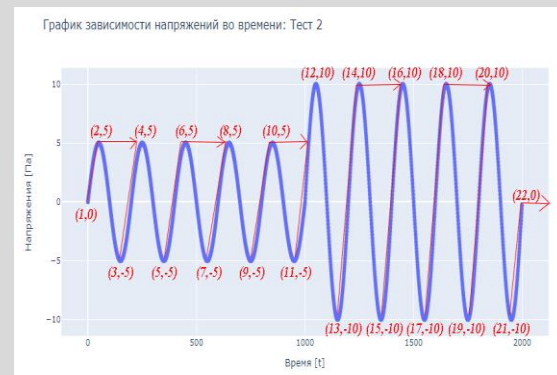


Рисунок 21 – Анализ выступающих вершин для теста №2

Размах	Кол-во циклов
5	0,5
10	5
15	0,5
20	4,5

Таблица 2 – Результаты теста №2 (расчет руками)



Рисунок 22 – Результаты теста №2 (расчет с помощью программы)

Решение модельной задачи о расчете накопления усталостных повреждений в диске газотурбинного двигателя при циклическом термомеханическом нагружении

1. Создание геометрии детали и КЭ модели:

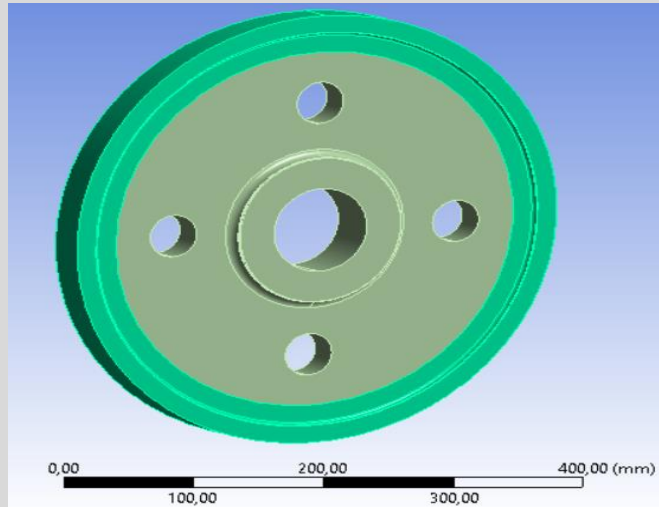


Рисунок 23 – Внешний обод диска

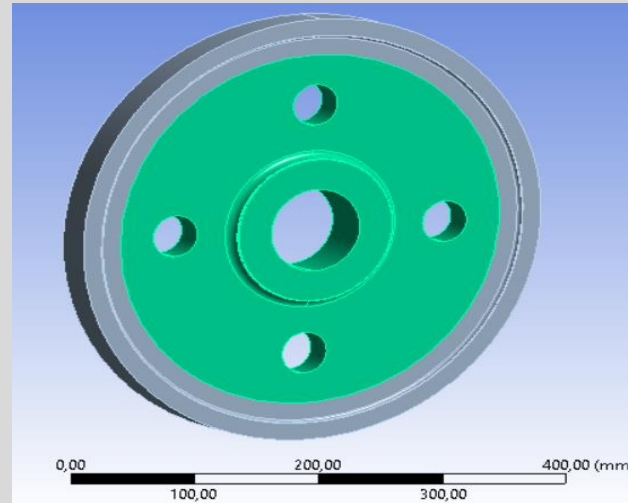


Рисунок 24 – Внутренняя часть диска

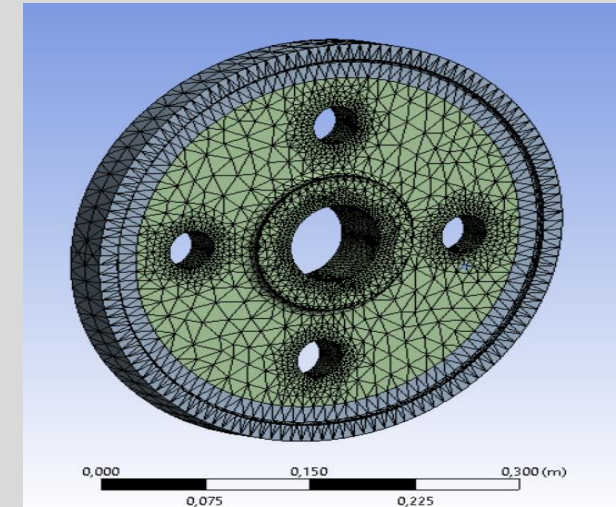


Рисунок 25 – Конечно-элементная сетка диска

2. Задание граничных условий:

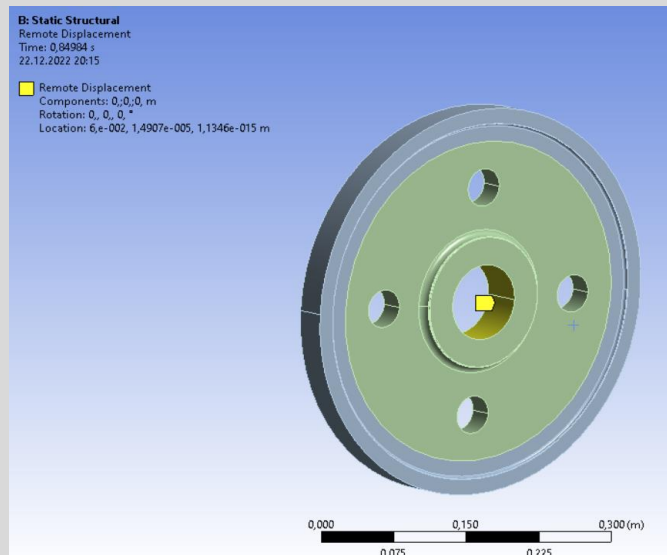


Рисунок 26 – Закрепление диска

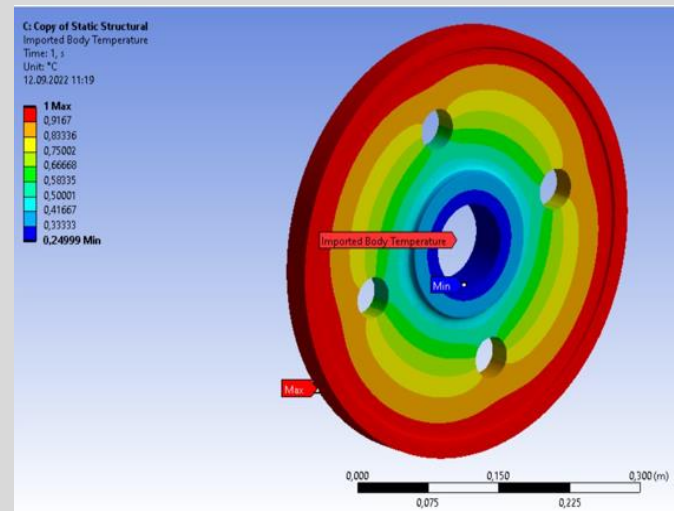


Рисунок 27 – Распределение температуры по диску

2. Расчёт усталостных повреждений от угловой скорости:

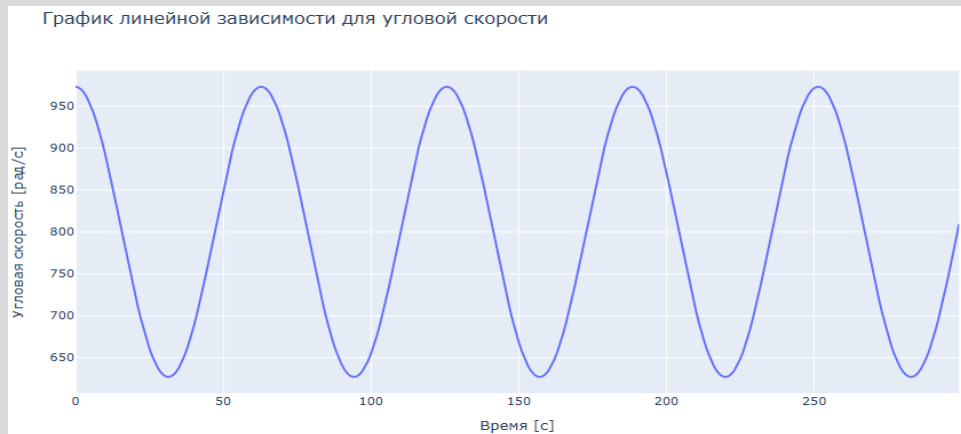


Рисунок 28 – Линейная зависимость истории нагружения для угл. скорости

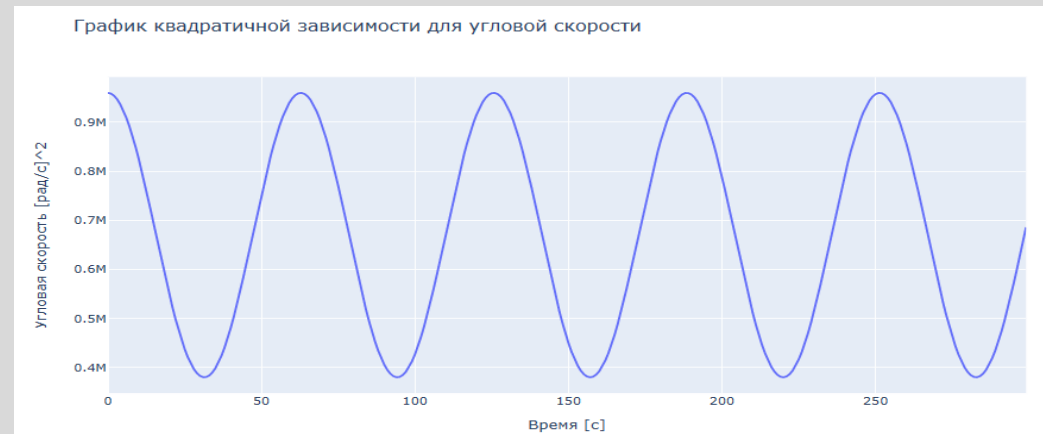


Рисунок 29 – Квадратичная зависимость истории нагружения для угл. скорости

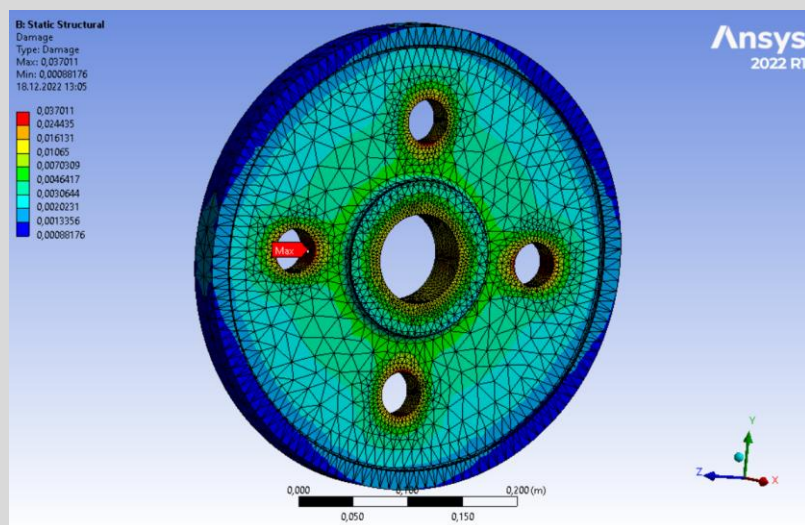


Рисунок 30 - Распределение накопленной усталостной поврежденности от угловой скорости (ANSYS)

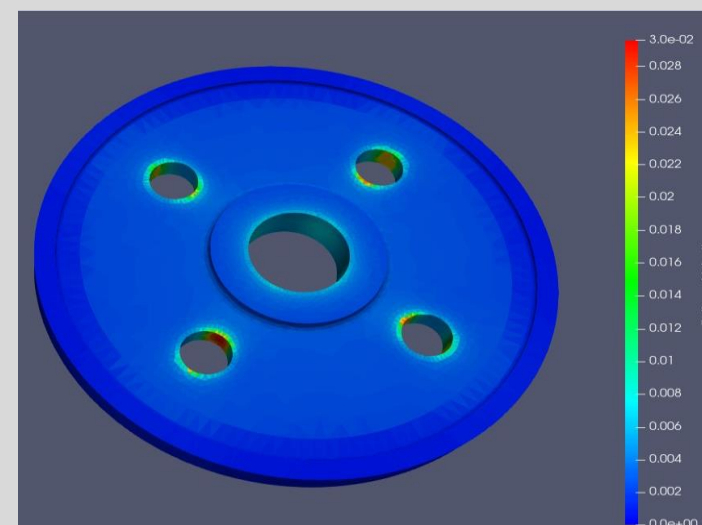


Рисунок 31 - Распределение накопленной усталостной поврежденности от угловой скорости (численный расчет)

Относительная погрешность: 5,5%

3. Расчёт усталостных повреждений от температуры:

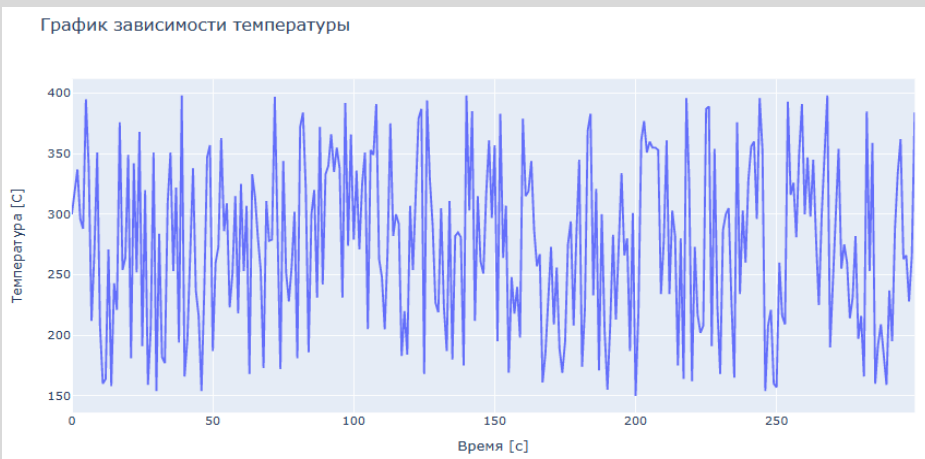


Рисунок 32 - История нагружения для температуры

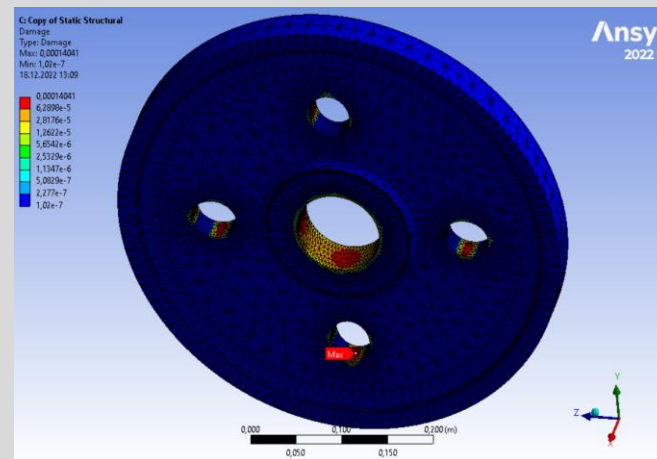


Рисунок 33 - Распределение накопленной усталостной поврежденности от температуры (ANSYS)

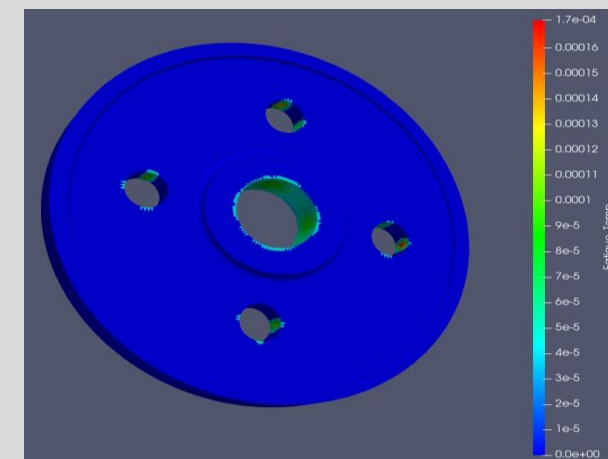


Рисунок 34 - Распределение накопленной усталостной поврежденности от температуры (численный расчет)

4. Расчёт усталостных повреждений от действия угловой скорости и температуры:

Относительная погрешность: 5,2%

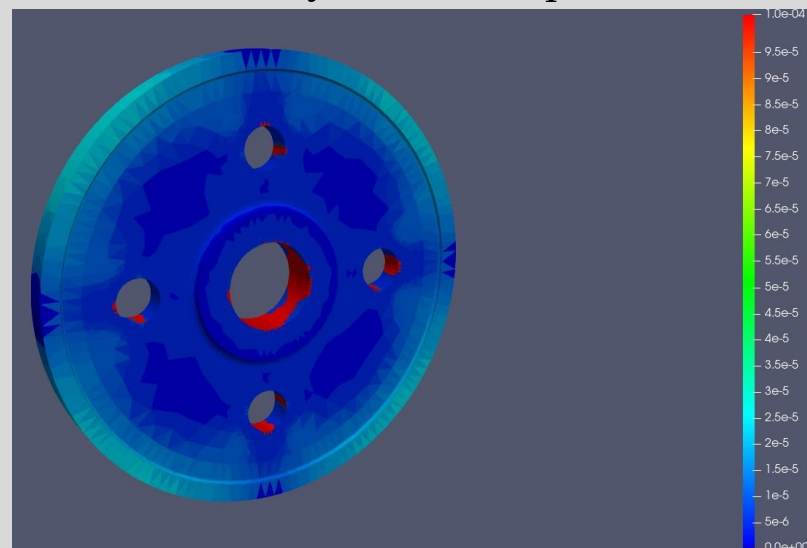


Рисунок 35 - Распределение накопленной усталостной поврежденности от температуры и угловой скорости (численный расчет)

Выводы по работе, дальнейшее направление работы:

В ходе научной работы было:

- 1) Успешно реализована программа, позволяющая находить поля накопленной усталостной поврежденности от действия нескольких силовых факторов.
- 2) Успешно выполнена проверка данной программы на трёх тестовых задачах.
- 3) Выполнен расчет диска при термомеханическом нагружении от 2-ух силовых факторов. Выполнена проверка данного расчета в программном комплексе Ansys Static Structural.
- 4) Выполнен обзор литературных источников и изучены различные подходы к оценка накопленной усталостной поврежденности

Дальнейшие направления работы:

- 1) Более точная интерпретация с физической стороны полей накопленной усталостной поврежденности, полученной с помощью собственной программы
- 2) Дополнительная проверка алгоритма расчета накопленной усталостной поврежденности
- 3) Выполнение расчета более сложной детали/составной конструкции с помощью реализованной программы