



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ 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)

Кафедра «Космические аппараты и ракеты-носители»

Дисциплина «Основы автоматизированного проектирования»

Домашнее задание №2

Вариант №4

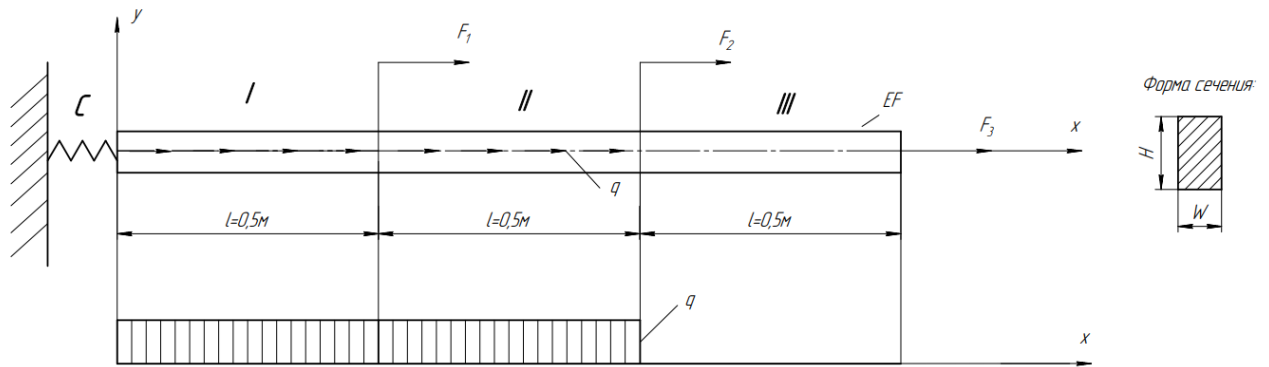
Студентка: Гусева Н. А.

Группа: СМ1-81

Преподаватель: Сдобников А.Н.

Москва, 2023 год.

Рабочая схема и распределение нагрузки



Исходные данные:

$$\frac{cl}{EA} = 5$$

$$\frac{ql}{EA} = 1$$

$$\frac{F_1}{EA} = 0,09$$

$$\frac{F_2}{EA} = 0,3$$

$$\frac{F_3}{EA} = 0,7$$

Материал: сталь

Для данной рабочей схемы необходимо:

Часть 1.

1. Сформулировать краевую задачу
2. Построить точное решение краевой задачи
3. Преобразовать краевую задачу в вариационный принцип
4. Получить решение энергетическим методом на линейной аппроксимации поля перемещений
5. Дать оценку погрешности по энергии между точным и приближенным решением

Часть 2.

6. Записать разрешающую систему уравнений Методом Конечных Элементов (МКЭ), провести ее анализ и получить «вручную» решение для перемещений и напряжений
7. Выполнить расчет конструкции заданной с использованием MSC Patran_Nastran
8. Провести сравнительный анализ результатов, полученных методами, использованными в работе
9. Подготовить отчет по результатам проведенных исследований.

Составим дискретную модель для трех КЭ:

Разобьем систему на конечные элементы:

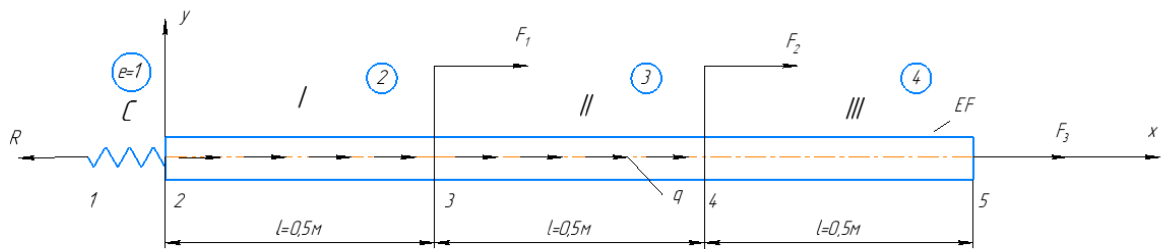


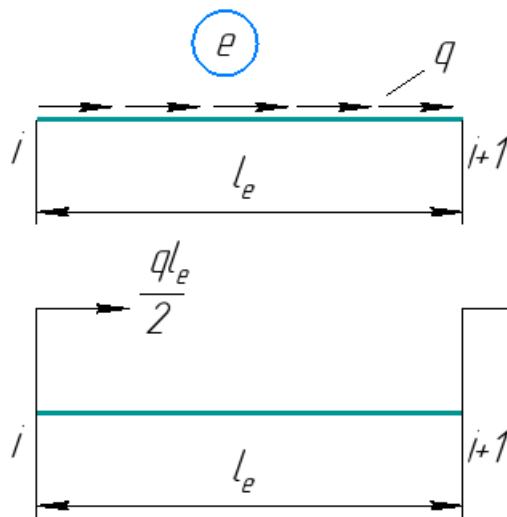
Рис.1. Разбиение стержня на 4 КЭ.

①, ②, ③, ④ – номера КЭ

1, 2, 3, 4, 5 – номера узлов

Пусть $l_e = \frac{L}{NE} = \frac{3l}{3} = l$

Приведение распределенной нагрузки к узлам дискретной модели:



Дано:

$$ql = EA$$

$$F_1 = 0,9EA = 0,9ql$$

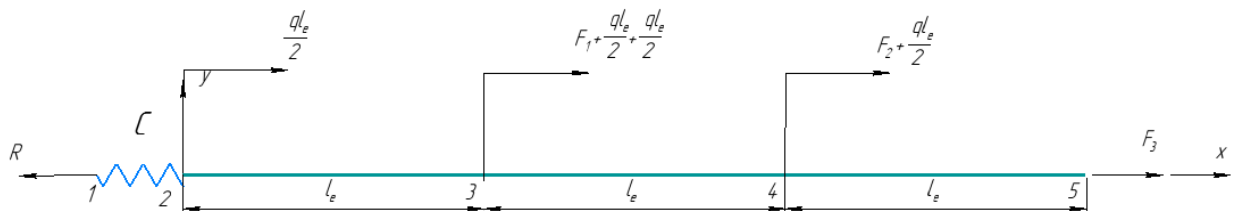
$$F_2 = 0,3EA = 0,3ql$$

$$F_3 = 0,7EA = 0,7ql$$

Рис. 2. Приведение распределенных нагрузок к узлам.

$r = ql_e$ – результирующая сила от q

Приложим все заданные и приведенные нагрузки к КЭ-модели, а также учтем влияние заделки в виде реакции R , как показано на рис.6. А также введем глобальную систему нумерации узлов (1-5). Тогда окончательно получается конечно-элементная модель:



Тогда просуммируем F_i и приведенную к i -ому узлу дискретной модели распределенную нагрузку, где $l_e = \frac{L}{NE} = \frac{3l}{3} = l$

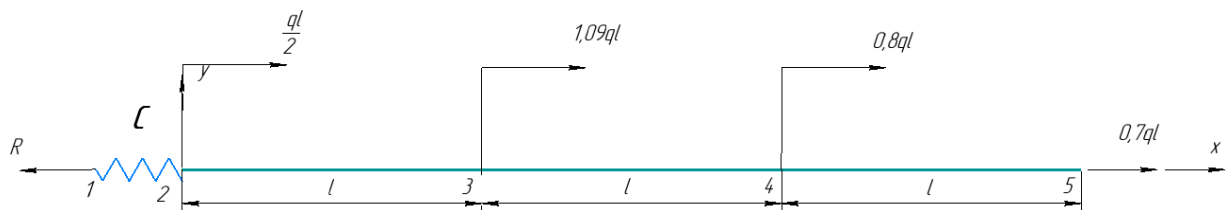
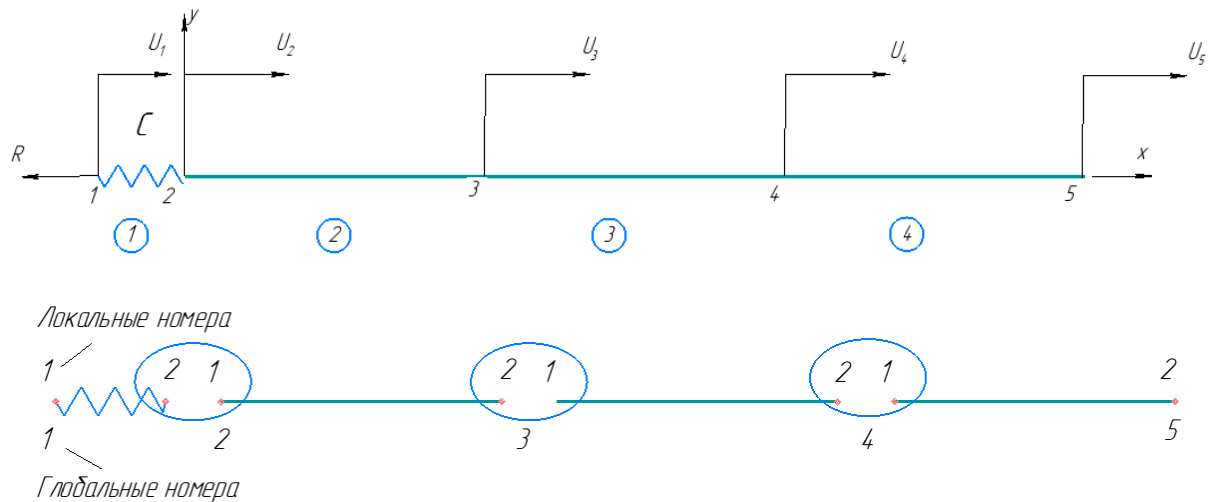


Рис. 3. Расчетная схема задачи МКЭ.

Формирование глобальной матрицы жесткости (МЖ) и вектора узловых сил (ВУС) дискретной модели.



В МКЭ присутствуют глобальная и локальная система нумерации узлов. Локальная система нумерации применяется для конкретного конечного элемента. Глобальная система нумерации узлов используется в целой дискретной модели. Условие равновесия конечного элемента:

$$[K]_e \{U\}_e = \{f\}_e \quad (1)$$

где $[K]_e$ – матрица жесткости КЭ; $\{U\}_e$ – вектор узловых перемещений КЭ; $\{f\}_e$ – вектор узловых сил КЭ.

Условие равновесия для ансамбля КЭ:

$$[K]_{\text{ГЛ}} \{U\}_{\text{ГЛ}} = \{f\}_{\text{ГЛ}} \quad (2)$$

где $[K]_{\text{ГЛ}}$ – глобальная матрица жесткости; $\{U\}_{\text{ГЛ}}$ – вектор узловых перемещений ДМ; $\{f\}_{\text{ГЛ}}$ – вектор узловых сил ДМ.

Посмотрим таблицу соответствия локальных и глобальных номеров системы

№ КЭ	Характеристики КЭ	Локальные № узлов	
		1	2
		Глобальные № узлов	
1	C	1	2
2	E_e, A_e, l_e	2	3
3	E_e, A_e, l_e	3	4
4	E_e, A_e, l_e	4	5

Глобальная матрица жесткости определяет прочностные характеристики всего стержня. Вектор узловых сил ДМ определяет силы, приложенные к каждому узлу. Нужно найти

$\{U\}_{\text{ГЛ}}$ - вектор узловых перемещений, характеризующий перемещения в каждом узле стержня, используя уравнение (2).

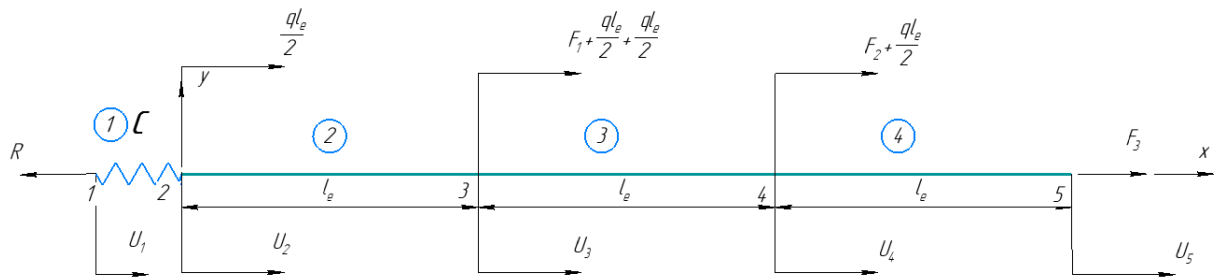
Определим размерность глобальной матрицы жесткости, вектора узловых перемещений и вектора узловых сил исходя из количества узлов – 5:

$$n = N \cdot 1 = 5$$

$n \times n = 5 \times 5$ – размерность МЖ

$$[k]_{n \times n} \cdot \{U\}_{n \times 1} = \{r\}_{n \times 1}, \quad \text{где } \{U\} = \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \end{Bmatrix}$$

Запишем глобальную МЖ и ВУС.



Сформируем глобальную матрицу жесткости:

$$e = 1 \quad [K]_{(1)} = C \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I});$$

$$e = 2 \quad [K]_{(2)} = \frac{E_2 A_2}{l_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II});$$

$$e = 3 \quad [K]_{(3)} = \frac{E_3 A_3}{l_3} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III});$$

$$e = 4 \quad [K]_{(4)} = \frac{E_4 A_4}{l_4} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{IV});$$

Формирование глобальной МЖ происходит на основании условия равновесия узлов дискретной модели. Узловые силы, приложенные к правому концу предыдущего КЭ и к левому концу последующего КЭ суммируются. Также суммируются компоненты локальных матриц жесткости КЭ, имеющие одинаковые глобальные номера.

	1	2	3	4	5
1	C	-C	0	0	0
2	-C	$C + \frac{E_2 A_2}{l_2}$	$-\frac{E_2 A_2}{l_2}$	0	0
3	0	$-\frac{E_2 A_2}{l_2}$	$\frac{E_2 A_2}{l_2} + \frac{E_3 A_3}{l_3}$	$-\frac{E_3 A_3}{l_3}$	0

4	0	0	$-\frac{E_3 A_3}{l_3}$	$\frac{E_3 A_3}{l_3} + \frac{E_4 A_4}{l_4}$	$-\frac{E_4 A_4}{l_4}$
5	0	0	0	$-\frac{E_4 A_4}{l_4}$	$\frac{E_4 A_4}{l_4}$

Пусть: $E_2 = E_3 = E_4 = E$
 $A_2 = A_3 = A_4 = A$
 $l_2 = l_3 = l_4 = l$

$$\begin{pmatrix} C & -C & 0 & 0 & 0 \\ -C & C + \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{EA}{l} & 2\frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 2\frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R \\ \frac{ql}{2} \\ F_1^* + ql \\ F_2^* + \frac{ql}{2} \\ F_3^* \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} R \\ \frac{ql}{2} \\ 0,09ql + ql \\ 0,3ql + \frac{ql}{2} \\ 0,7ql \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{EA}{l} \cdot \begin{pmatrix} \frac{Cl}{EA} & -\frac{Cl}{EA} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{Cl}{EA} & \frac{Cl}{EA} + 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R \\ \frac{ql}{2} \\ 0,09ql + ql \\ 0,3ql + \frac{ql}{2} \\ 0,7ql \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\frac{EA}{l} \cdot \begin{pmatrix} 5 & -5 & 0 & 0 & 0 \\ -5 & 6 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R \\ \frac{ql}{2} \\ 0,09ql + ql \\ 0,3ql + \frac{ql}{2} \\ 0,7ql \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Где R – неизвестная сила реакции консольной заделки, а u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 – неизвестные узловые перемещения, подлежащие определению.

Нахождение перемещений по МКЭ

При раскрытии матричного уравнения (5) получается СЛАУ, состоящая из 5 линейных алгебраических уравнений. При её разрешении в таком виде система будет иметь бесконечное число решений (т.к. дискретная модель не закреплена в пространстве).

Чтобы исключить перемещения узлов КЭ-модели на одну и ту же константу, следует закрепить конструкцию с помощью задания граничного условия в узле №1: $U_1 = 0$

Применяем метод Пиона-Айронса, позволяющий с помощью элементарных преобразований упростить матрицу жесткости таким образом: обнуляется строка и столбец с номером 1 (по номеру компонента u_1), кроме элемента на их пересечении. Таким образом, матричное уравнение имеет вид:

$$\frac{EA}{l} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \frac{ql}{2} \\ 0,09ql + ql \\ 0,3ql + \frac{ql}{2} \\ 0,7ql \end{Bmatrix}$$

В развернутом виде:

$$\begin{cases} U_1 = 0 \\ 6U_2 - U_3 = \frac{ql^2}{2EA} \\ -U_2 + 2U_3 - U_4 = \frac{1,09ql^2}{EA} \\ -U_3 + 2U_4 - U_5 = \frac{0,8ql^2}{EA} \\ -U_4 + U_5 = \frac{0,7ql^2}{EA} \end{cases} \quad (6)$$

После решения системы уравнений получим:

$$\begin{cases} U_1 = 0 \\ U_2 = 0,618l \\ U_3 = 3,208l \\ U_4 = 4,708l \\ U_5 = 5,408l \end{cases}$$

Подставим полученные перемещения в начальное выражение:

$$\begin{cases} 5U_1 - 5U_2 = \frac{Rl}{EA} \\ -5U_1 + 6U_2 - U_3 = \frac{ql^2}{2EA} \\ -U_2 + 2U_3 - U_4 = \frac{1,09ql^2}{EA} \\ -U_3 + 2U_4 - U_5 = \frac{0,8ql^2}{EA} \\ -U_4 + U_5 = \frac{0,7ql^2}{EA} \end{cases}$$

$$R = -\frac{5U_2EA}{l} = -3,09ql$$

Определение напряжений.

Изобразим дискретную модель с учетом полученных выше перемещений в узлах.

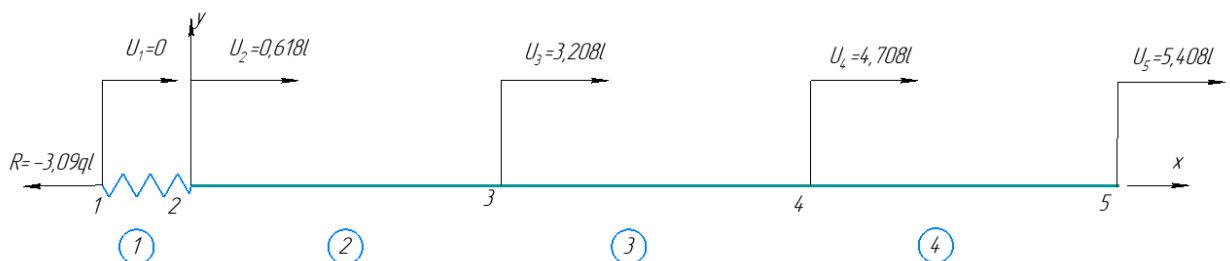


Рис. 4. Схема с учетом перемещений в узлах

Постоянная деформация на КЭ:

Продольная деформация ε_x , стержня, по определению, равна отношению абсолютного удлинения КЭ после деформации к его начальной длине до деформации

$$\varepsilon_{(e)} = \frac{U_{i+1} - U_i}{l_e} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{(1)} = \frac{U_2 - U_1}{l} = 0,618$$

$$\varepsilon_{(2)} = \frac{U_3 - U_2}{l} = 2,59$$

$$\varepsilon_{(3)} = \frac{U_4 - U_3}{l} = 1,5$$

$$\varepsilon_{(4)} = \frac{U_5 - U_4}{l} = 0,7$$

Считаем, что при заданной нагрузке выполняется закон Гука:

$$\sigma_{(e)} = E_e \varepsilon_{(e)} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{(e)} = \frac{\sigma_{(e)}}{E} = \frac{N}{EA}$$

$$\sigma_{(e)} = E \varepsilon_{(e)}$$

$\frac{N_{(e)}}{A} = E \varepsilon_{(e)}$, где E - модуль нормальной упругости (модуль Юнга), константа, характеризующая упругие свойства материала бруса, N – внутренне усилие в стержне. Отметим, что закон Гука справедлив при нормальных напряжениях, не превышающих предела пропорциональности.

Усилия $N_{(e)}$ в МКЭ не зависят от координаты x в пределах конечного элемента, т.е. являются постоянными на каждом КЭ. Определим усилия в элементах, согласно формуле:

$$N_{(e)} = \sigma_{(e)} A_e = E_e A_e \varepsilon_{(e)} \quad (9)$$

$$N_{(1)} = EA \varepsilon_{(2)} = 0,618EA$$

$$N_{(2)} = EA \varepsilon_{(2)} = 2,59EA$$

$$N_{(3)} = EA \varepsilon_{(3)} = 1,5EA$$

$$N_{(4)} = EA \varepsilon_{(4)} = 0,7EA$$

Сравнительный анализ результатов, полученных в работе

Сравним значения перемещений:

Краевая задача	МКЭ
$U(0) = 0,618 \cdot l$	$U_1 = 0,618 \cdot l$
$U(l) = 3,208 \cdot l$	$U_2 = 3,208 \cdot l$
$U(2l) = 4,708 \cdot l$	$U_3 = 4,708$
$U(3l) = 5,408 \cdot l$	$U_4 = 5,408 \cdot l$

Перемещение узлов совпадают для метода конечных элементов и краевой задачи, что позволяет сделать вывод о том, что оба метода пригодны для поиска узловых перемещений.

Сравним значения внутренних сил:

Краевая задача	МКЭ
$N_I(0) = 3,09EA$ $N_I(l) = 2,09EA$	$N_{(2)} = 2,59EA$

$N_{II}(l) = 2EA$ $N_{II}(2l) = 1EA$	$N_{(3)} = 1,5EA$
$N_{III}(2l) = 0,7EA$ $N_{III}(3l) = 0,7EA$	$N_{(4)} = 0,7EA$

Сравним значения нагрузок:

Краевая задача	МКЭ
$\sigma_I(0) = 3,09E$ $\sigma_I(l) = 2,09E$	$\sigma_{(2)} = 2,59E$
$\sigma_{II}(l) = 2E$ $\sigma_{II}(2l) = 1E$	$\sigma_{(3)} = 1,5E$
$\sigma_{III}(2l) = 0,7E$ $\sigma_{III}(3l) = 0,7E$	$\sigma_{(4)} = 0,7E$

Усилия оказались равны только на том участке, где отсутствует распределенная нагрузка, то есть там, где внешняя нагрузка на стержне постоянна. На участке с распределенной нагрузкой график усилия будет линейным, поэтому, решая методом КЭ, мы получаем среднее значение усилия на данном участке. Это происходит потому, что в МКЭ распределенная нагрузка приводится к узлам КЭ, то есть задача сводится к линейным перемещениям, а это значит, к постоянному характеру действия нагрузок на элемент. Для того, чтобы повысить точность МКЭ, необходимо выбрать разбиение с большим количеством КЭ.

Решение задачи в программном пакете MCS.Patran/Nastran

Таб.1. Геометрические и прочностные характеристики стержня

$E, \text{Па}$	ν	$l, \text{м}$	$W, \text{м}$	$H, \text{м}$	$A, \text{м}^2$	Материал
$2 \cdot 10^{11}$	0,3	0,5	0,1	0,15	$1,5 \cdot 10^{-2}$	Сталь

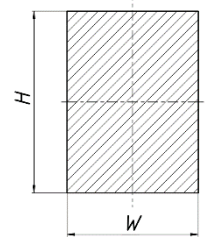


Рис. 7. Поперечное сечение стержня (по условию - №1).

Расчет перемещений и напряжений в программном комплексе MCS.Patran/Nastran.

В качестве согласованной системы единиц будем применять систему, обозначаемую в MCS.Patran/Nastran как «SI (m-N-kg)»: [Н] – [м] – [Па].

Получим численные значения $q, C, F_1^*, F_2^*, F_3^*$ при заданных E, A, l :

Таблица 2. Численные значения $q, C, F_1^*, F_2^*, F_3^*$

$C, \frac{\text{Н}}{\text{м}}$	$q, \frac{\text{Н}}{\text{м}}$	$F_1^*, \text{Н}$	$F_2^*, \text{Н}$	$F_3^*, \text{Н}$
$3 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^9$	$0,27 \cdot 10^9$	$0,9 \cdot 10^9$	$2,1 \cdot 10^9$

Сведем все численные данные в одну таблицу.

Таблица 9. Сводная таблица численных данных

Длина балки, м		1.5
Поперечное сечение	Форма	Прямоугольник
	Высота H, м Ширина W, м	0,15 0,1
Материал <i>Сталь</i>	Модуль упругости $E, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$2 \cdot 10^{11}$
	Коэффициент Пуассона ν	0,3
Распределенная нагрузка $q, \frac{\text{Н}}{\text{м}}$		$6 \cdot 10^9$
Сосредоточенные силы	$F_1^*, \text{Н}$	$0,27 \cdot 10^9$
	$F_2^*, \text{Н}$	$0,9 \cdot 10^9$
	$F_3^*, \text{Н}$	$2,1 \cdot 10^9$
Коэффициент жесткости пружины $C, \frac{\text{Н}}{\text{м}}$		$3 \cdot 10^{10}$

Схема решения задачи:

- Цель решения задачи: Получить перемещения и напряжения Фон Мизеса (Линейная статика);
- База данных модели: модель одномерной балки;
- Тип решателя: MSC.Nastran;

- Метод решения: линейный статический – Structural;
- Геометрия: Curve - создается в MSC.Patran;
- Генерация КЭ сетки: – двухузловые линейные элементы типа Bar2;
- Нагрузки и граничные условия: консольное закрепление, распределенная нагрузка q и сосредоточенные силы F_1^* , F_2^* , F_3^* ;
- Материал: сталь, линейная модель изотропного материала;
- Спецификация элементов: 1D/Beam; 1D/Spring;
- Анализ: линейный статический;
- Результаты: файл результатов *.F06 и графики напряжений и перемещений вдоль оси балки.

Порядок создания КЭ – модели

1. Создание базы данных

[File] → [New] → [Имя файла: dz2.db] → [Параметры анализа: **Tolerance:** Default, **Analysis Code:** MSC.Nastran, **Analysis Type:** Structural] → [Ok].

2. Geometry – Создание геометрии балки

[Geometry] → [Action: Create] → [Object: Curve] → [Method: XYZ] → [Vector Coordinate List: <0.5 0 0>] → [Origin Coordinate List <0 0 0>] → [Apply] → [Vector Coordinate List: <0.5 0 0>] → [Origin Coordinate List <0.5 0 0>] → [Apply] → [Vector Coordinate List: <0.5 0 0>] → [Origin Coordinate List <1 0 0>] → [Apply] → [Vector Coordinate List: <-0.5 0 0>] → [Origin Coordinate List <0 0 0>] → [Apply]

3. Meshing – Создание сетки конечных элементов

[Meshing] → [Action: Create] → [Object: Mesh] → [Type: Curve] → [Topology: Bar2] → [Curve List: Curve 1:4] → [Value: 0.5] → [Apply].

4. Meshing – Сшивание конечных элементов вдоль геометрических границ

[Meshing] → [Action: Equivalence] → [Object: All] → [Method: Tolerance Cube] → [Apply].

5. Properties – задание свойств материала

[Properties] → [Isotropic] → [Action: Create] → [Object: Isotropic] → [Method: Manual Input] → [Material Name: steel] → [Input Properties] → [Elastic Modulus: $2e11$, Poisson's Ratio: 0.3] → [OK] → [Apply].

6. Tools – создание поперечного сечения.

[Tools] → [Beam Library] → [Action: Create] → [Object: Standard Shape] → [Method: Nastran Standard] → [New Section Name: section] → [выбор прямоугольного сечения] → [W=0.1; H=0.15] → [OK].

7. Properties - применение созданного поперечного сечения и материала к элементам.

[Properties] → [1D Properties] → [Beam] → [Action: Create] → [Object: 1D] → [Type: Beam] → [Property Set Name: bar] → [Input Properties] → [Section name: section;

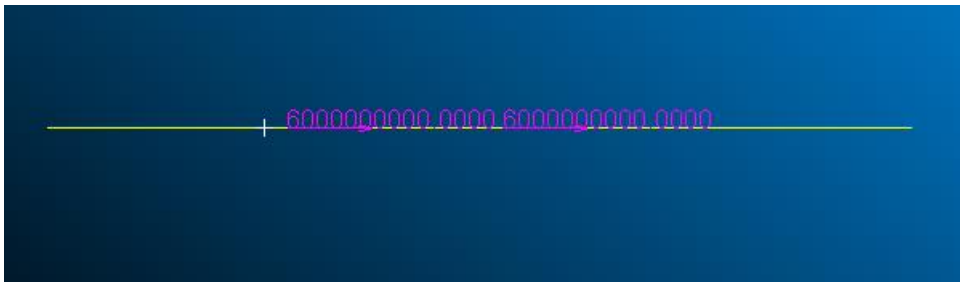
Material Name: steel; **Bar Orientation:** <0 1 0>]→[OK] → [Select Application Region] → [Select: Entities] →[Select members: Curve 1:3]→ [Add]→ [OK] → [Apply].

8. Element Properties – создание пружины

[Properties] → [Action: Create] → [Object: 1D] → [Type: Spring] → [Property Set Name: spring] → [Input Properties] → [Spring constant: 3e10; Dof at Node 1: UX; Dof at Node 2: UX]→[OK] → [Select Application Region] → [Select: Entities] →[Select members: Curve 4]→ [Add]→ [OK] → [Apply].

9. Loads/BCs – задание нагрузок, действующих на балку

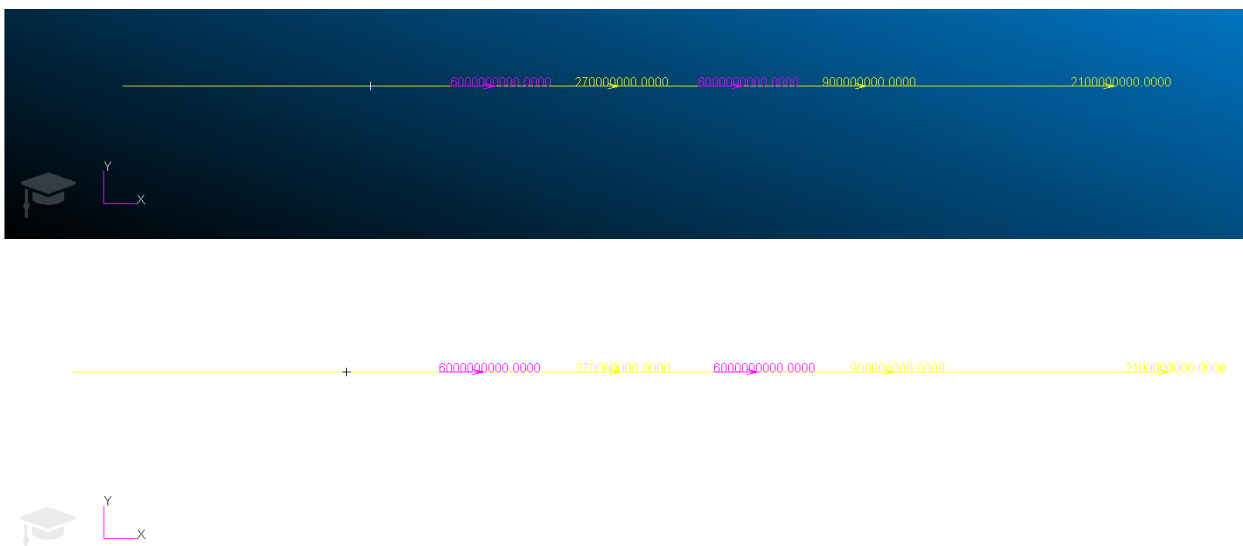
[Loads/BCs]→ [Action: Create] → [Object: Distributed Load] → [Type: Element Uniform] →[New Set Name: raspr1] → [Target Element Type: 1D]→ [Input Data] → [Distr Load: <6e9 0 0>] → [Select Application Region] → [Select: FEM] →[Application Region: Element 1 2]→ [Add] → [OK] → [Apply].



[Action: Create] → [Object: Force] → [Type: Nodal] →[New Set Name: F1] → [Input Data] → [Force: <0.27e9 0 0>] → [Select Application Region] → [Select: FEM] →[Application Region: Node 2]→ [Add] → [OK] → [Apply].

[Action: Create] → [Object: Force] → [Type: Nodal] →[New Set Name: F2] → [Input Data] → [Force: <0.9e9 0 0>] → [Select Application Region] → [Select: FEM] →[Application Region: Node 4]→ [Add] → [OK] → [Apply].

[Action: Create] → [Object: Force] → [Type: Nodal] →[New Set Name: F3] → [Input Data] → [Force: <2.1e9 0 0>] → [Select Application Region] → [Select: FEM] →[Application Region: Node 6]→ [Add] → [OK] → [Apply].

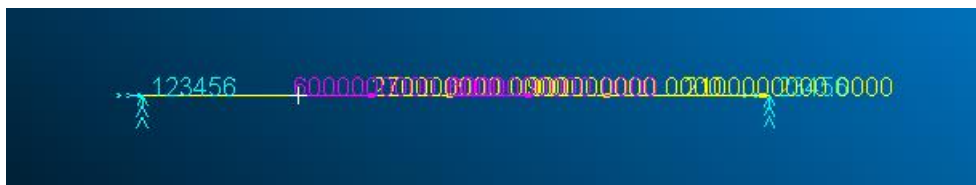


10. Loads/BCs - задание граничных условий

[Loads/BCs]→ [Action: Create] → [Object: Displacement] → [Type: Nodal] → [New Set Name: zadelka] → [Input Data] → [Translations: <0,0,0> Rotations: <0,0,0>] →[OK] → [Select Application Region] → [Select: Geometry] →[Select Geometry Entities: Point 5]→ [Add]→ [OK] → [Apply]



[**Action:** Create] → [**Object:** Displacement] → [**Type:** Nodal] → [**New Set Name:** adfix] → [Input Data] → [**Translations:** <0,0> **Rotations:** <0,0,0>] → [OK] → [Select Application Region] → [**Select:** Geometry] → [**Select Geometry Entities:** Point 4] → [Add] → [OK] → [Apply]. Данное закрепление необходимо, чтобы программа рассчитывала перемещения исключительно вдоль оси X и не считала модель механизмом.



11. Analysis – генерация входного файла для расчета в MSC. Nastran.

[Analysis] → [**Action:** Analyze] → [**Object:** Entire Model] → [**Method:** Full Run] → [**Job Name:** dz2] → [**Solution Type:** Linear Static] → [Apply].

12. Analysis – передача результатов анализа в MSC.Patran.

[**Action:** Access Results] → [**Object:** Attach HDF5 XDB] → [**Method:** Result Entities] → [**Job Name:** dz2] → [**Select Results File:** balka1.h5 xdb] → [OK] → [Apply].

Ниже представлена последовательность операций, которую необходимо выполнить для построения графиков в MSC.Patran.

1) Построение графика перемещений U(x)

[Results] → [**Action:** Create] → [**Object:** Graph] → [**Select Results Cases:** Default, A1] → [**Select Y Result:** Displacement, Translational] → [**Quantity:** X Component] → [**X:** Coordinate] → [**Coordinate Axis:** Coord 0.1] → [нажимаем на вторую иконку слева в ряду из четырех иконок] → [**Target Entity:** Path] → [**Select Path Points:** Point 1:5] → [**Points Per Segment:** 1000] → [**Addtl Display Control:** Points] → [Apply]

2) Построение графика напряжений P(x)

[Results] → [**Action:** Create] → [**Object:** Graph] → [**Select Results Cases:** Default, A1] → [**Select Y Result:** Bar Stress, Axial] → [**Quantity:** X Component] → [**X:** Coordinate] → [**Coordinate Axis:** Coord 0.1] → [нажимаем на вторую иконку слева в ряду из четырех иконок] → [**Target Entity:** Path] → [**Select Path Points:** Point 1 4] → [**Points Per Segment:** 1000] → [**Addtl Display Control:** Points] → [четвертая иконка] → [**Domain:** none] → [**Extrapolation:** Average] → [Apply] Ж

3) Построение графика напряжений P(x) интерполированного

[Results] → [**Action:** Create] → [**Object:** Graph] → [**Select Results Cases:** Default, A1] → [**Select Y Result:** Bar Stress, Axial] → [**Quantity:** X Component] → [**X:** Coordinate] → [**Coordinate Axis:** Coord 0.1] → [нажимаем на вторую иконку слева в ряду из четырех иконок] → [**Target Entity:** Path] → [**Select Path Points:** Point 1 4] → [**Points Per Segment:** 1000] → [**Addtl Display Control:** Points] → [четвертая иконка] → [**Domain:** none] → [**Extrapolation:** Shape Fn] → [Apply]

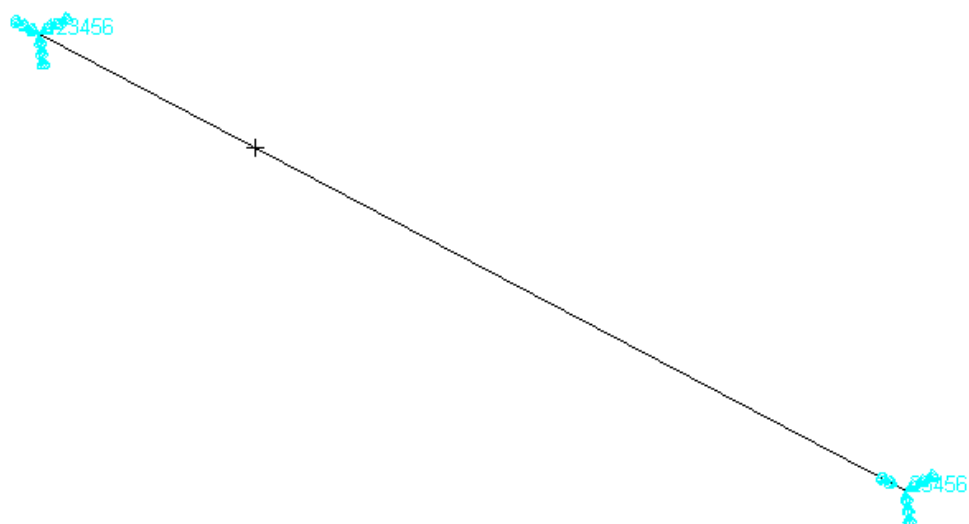


Рис. 7. – Модель (нагрузка скрыта)

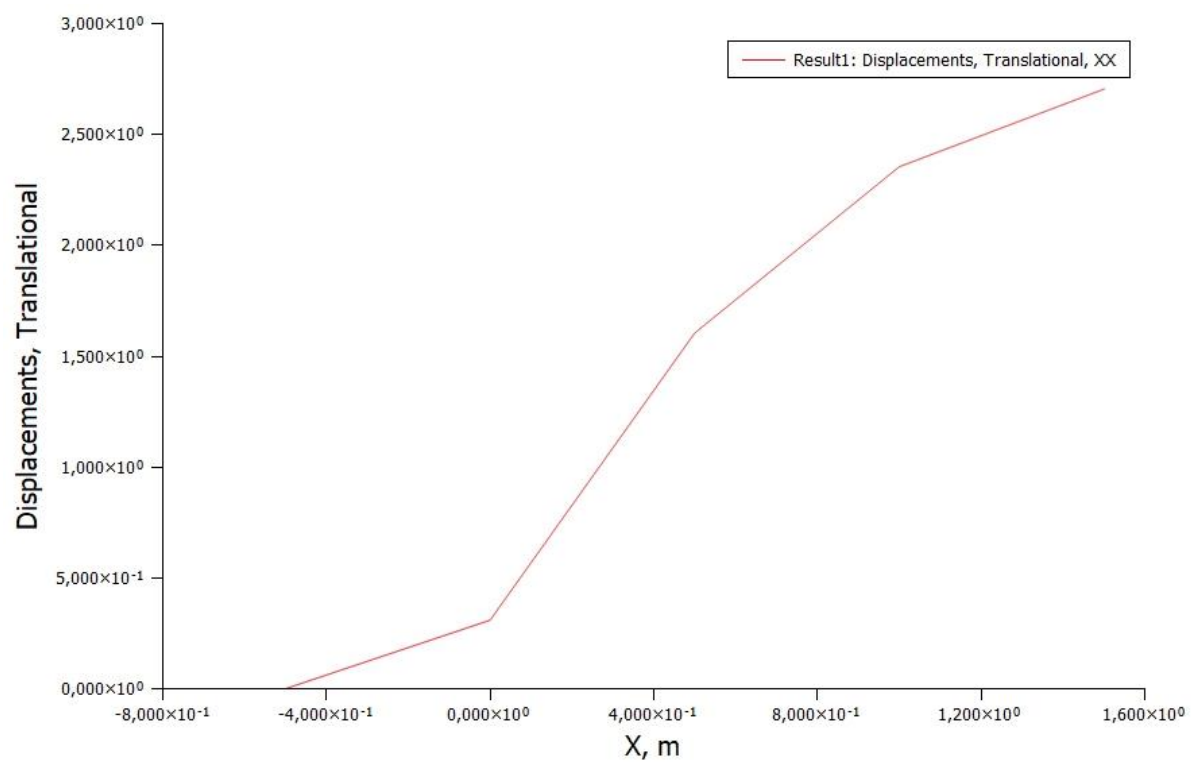


Рис. 8. – График функции перемещений $U(x)$

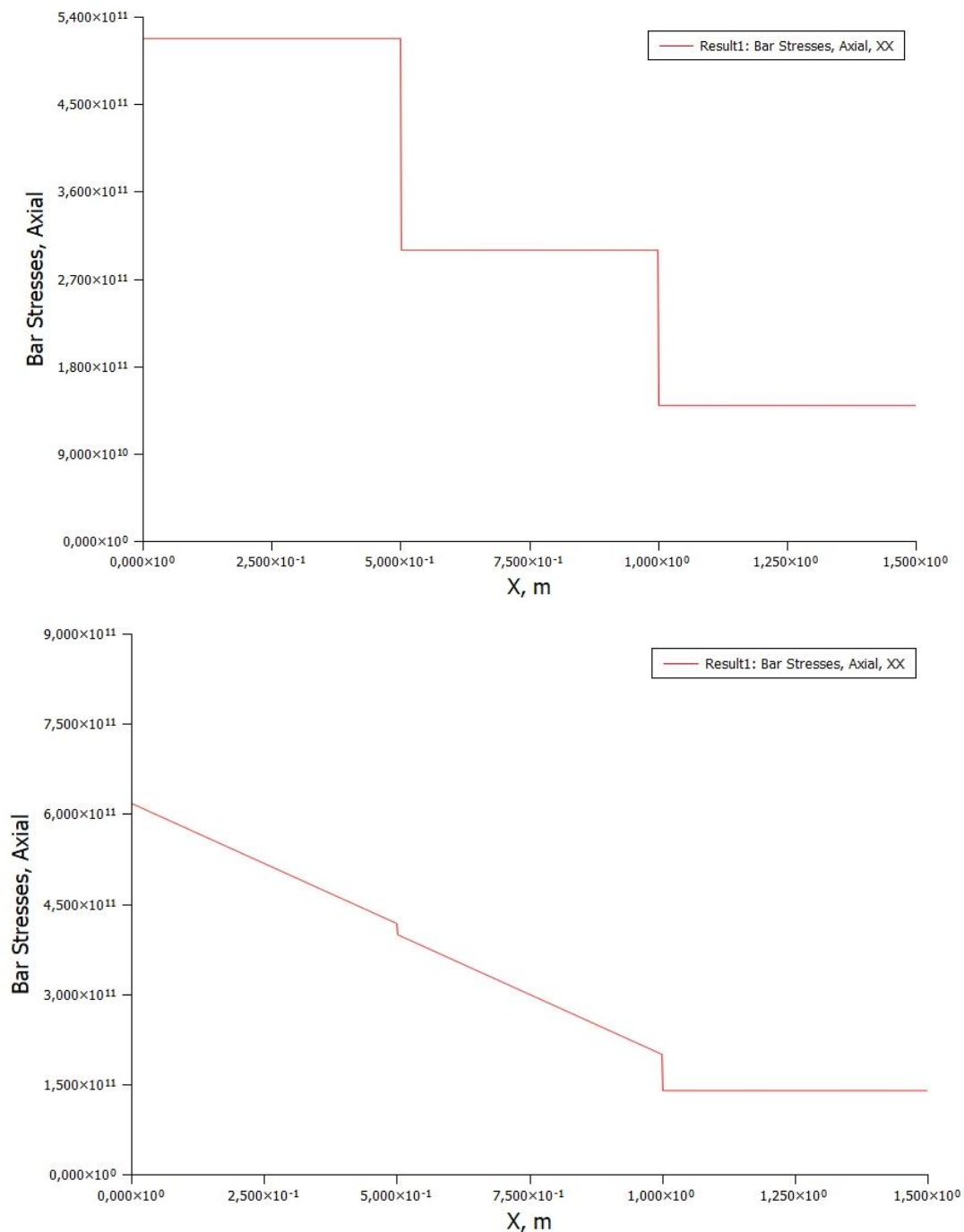


Рис. 9. – График напряжений $\sigma(x)$

Значения файла f06 программы Patran&Nastran.

DISPLACEMENT VECTOR									
POINT ID.	TYPE	T1	T2	T3	R1	R2	R3		
1	G	3.090000E-01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
2	G	1.604000E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
4	G	2.354000E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
6	G	2.704000E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
8	G	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
MSC.NASTRAN JOB CREATED ON 19-MAY-23 AT 02:56:39 **STUDENT EDITION* MAY 19, 2023 MSC Nastran 3/15/22 PAGE 12									
DEFAULT									

STRESS DISTRIBUTION IN BAR ELEMENTS (C BAR)									
ELEMENT ID.	STATION (PCT)	STRESS SXC	DISTRIBUTION SXD	SXE	IN BAR SXF	ELEMENTS AXIAL	S-MAX	S-MIN	M.S.-T M.S.-C
1	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	6.180000E+11	6.180000E+11	6.180000E+11	
1	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	4.180000E+11	4.180000E+11	4.180000E+11	
2	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	4.000000E+11	4.000000E+11	4.000000E+11	
2	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	2.000000E+11	2.000000E+11	2.000000E+11	
3	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	1.400000E+11	1.400000E+11	1.400000E+11	
3	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	1.400000E+11	1.400000E+11	1.400000E+11	
1 MSC.NASTRAN JOB CREATED ON 19-MAY-23 AT 02:56:39 **STUDENT EDITION* MAY 19, 2023 MSC Nastran 3/15/22 PAGE 14									
DEFAULT									

Сравнительные графики.

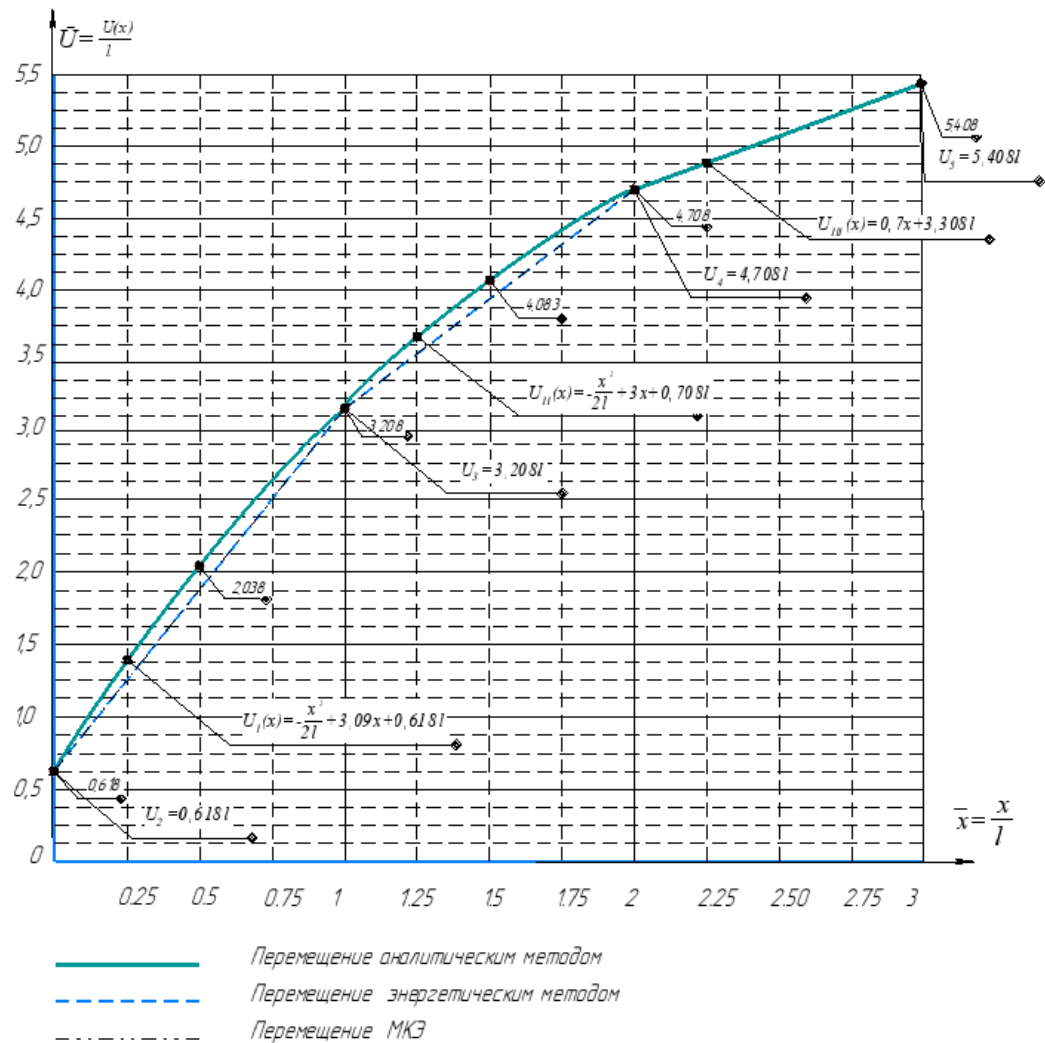


Рис. 10. – Сравнительны график перемещений $U(x)$

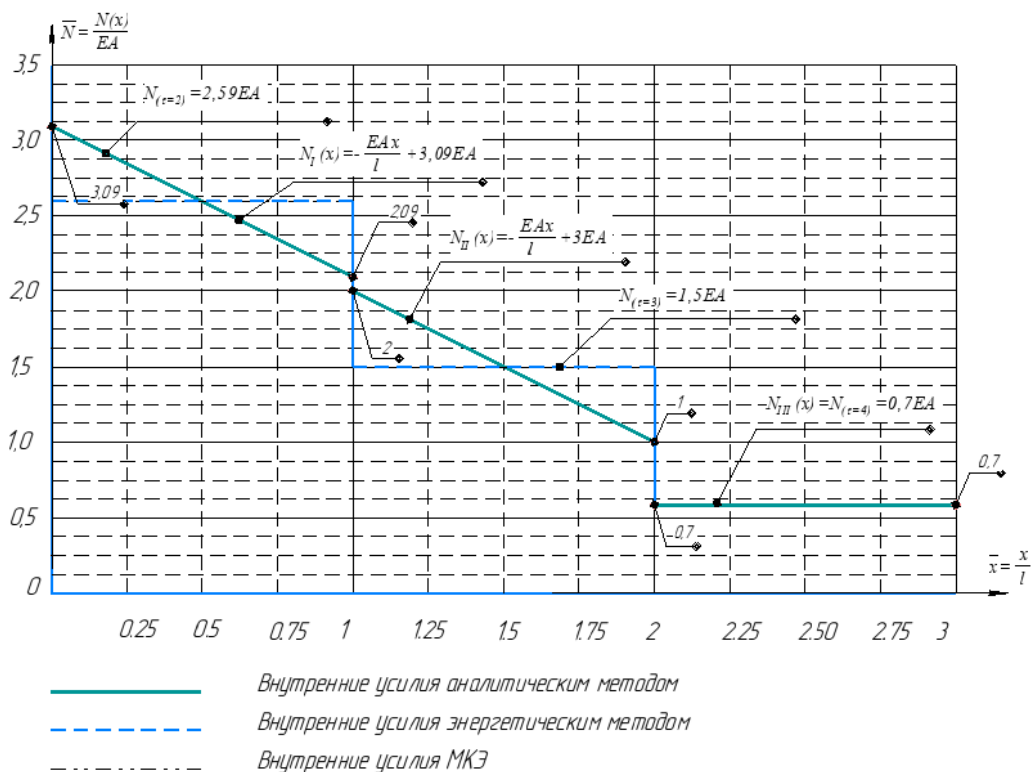


Рис. 11. – Сравнительный график $N(x)$

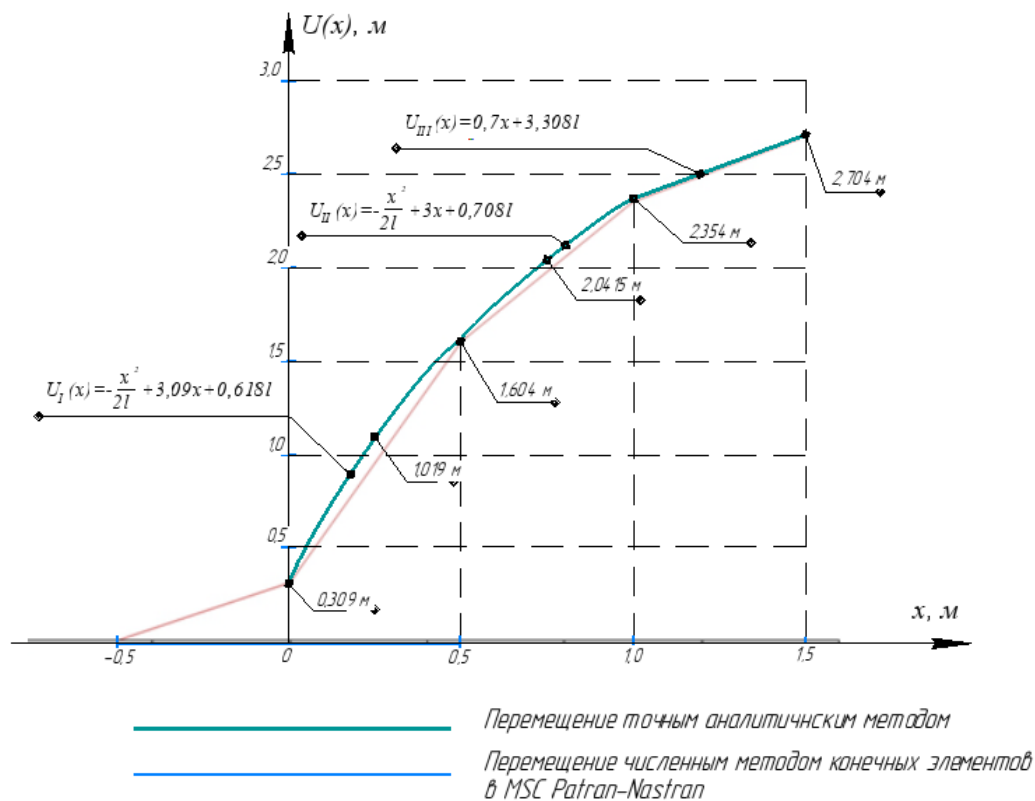


Рис. 12. – Сравнительны график перемещений $U(x)$, полученных аналитическим методом и МКЭ в MSC Patran-Nastran.

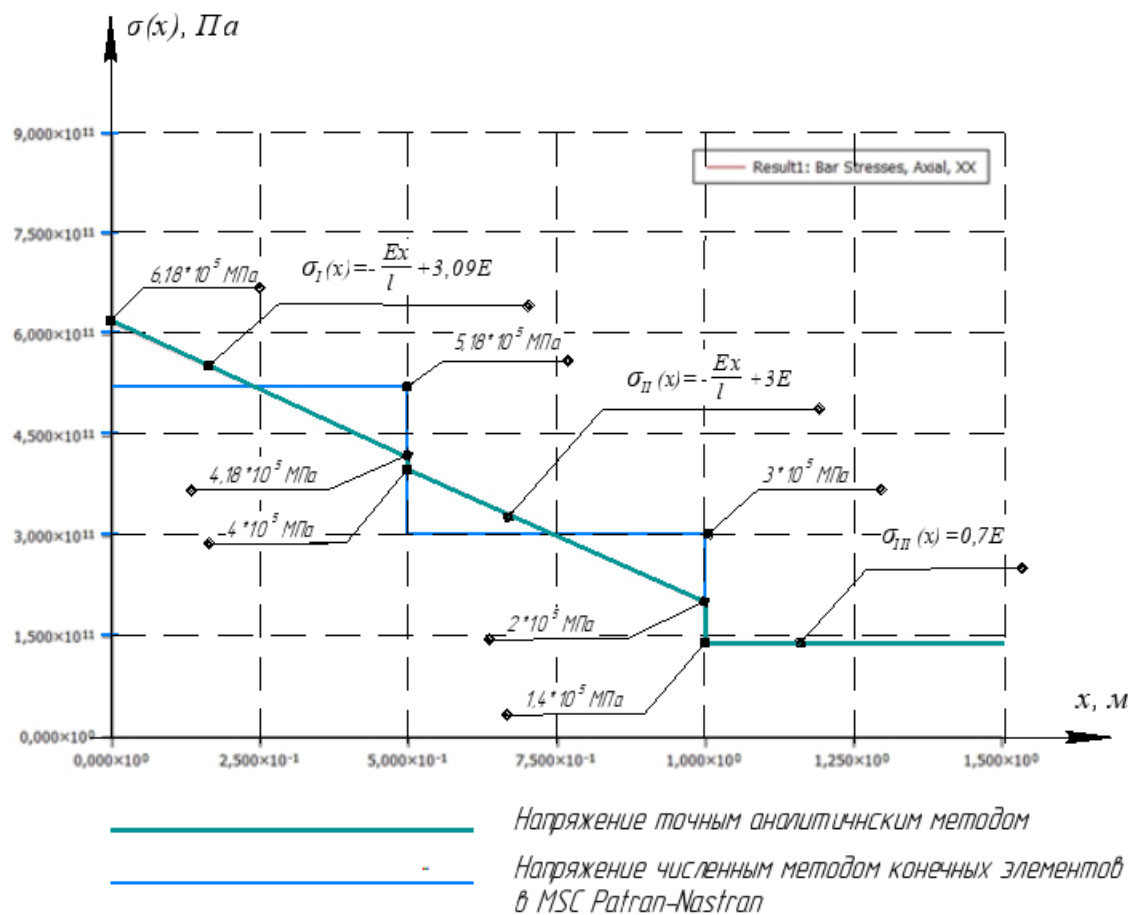


Рис. 13. – Сравнительны график напряжений $\sigma(x)$, полученных аналитическим методом и МКЭ в MSC Patran-Nastran.