

Знакомство с МКЭ подсистемой

СтаДиКон (СДК)

**Геометрически нелинейный
анализ консоли**



Содержание

Содержание	2
1. Описание задачи	3
2. Консольная пластина.....	5
2.1. Геометрия	6
2.2. Свойства материала	7
2.3. Разбиение плиты	8
2.4. Краевые условия	9
2.5. Нагрузки	10
2.6. Параметры расчета	11
2.7. Результаты	13
3. Консольная балка.....	15
3.1. Геометрия	15
3.2. Свойства материала	16
3.3. Разбиение стержня.....	17
3.4. Краевые условия	17
3.5. Нагрузки	18
3.6. Параметры расчета	19
3.7. Результаты	21
4. Консольная пластина в позиционном проекте.....	23
5. Консольная балка-стенка	26
6. Обсуждение различных подходов	30

1. Описание задачи

В данном примере демонстрируется геометрически нелинейный анализ консольной конструкции, которая закреплена на одном конце, а на другом конце приложен сосредоточенный изгибающий момент, в результате чего конструкция изгибается в круговую форму, как описано в работе Argyris et al. (1986). Приложенная нагрузка вызывает большие повороты, но малые деформации, что приводит к значительным геометрически нелинейным эффектам.

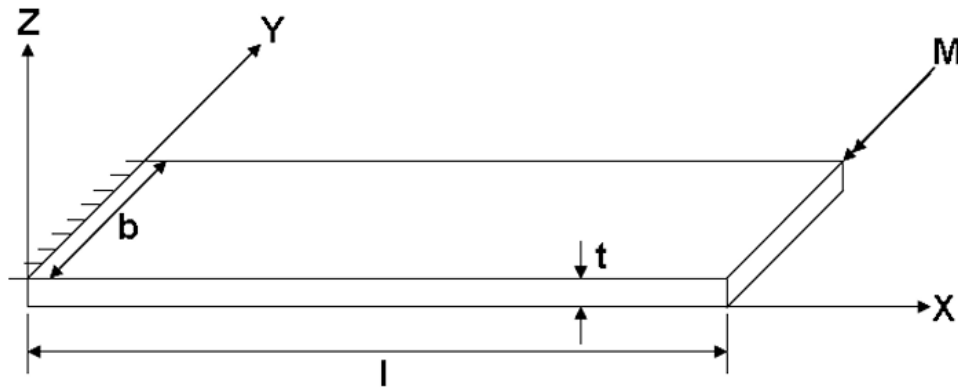


Рис. 1.1 – Схема консоли

Геометрические характеристики:

- длина $l = 1$ м
- ширина $b = 0.2$ м
- толщина $t = 0.005$ м

Свойства материала:

- модуль Юнга $E = 9.34126E+10$ кН/м²
- коэффициент Пуассона $\nu = 0.33$

Выполняем структурный нелинейный анализ с учетом геометрически нелинейных эффектов. Исследуем эту проблему несколькими различными подходами метода конечных элементов:

- используя оболочечные элементы [Раздел 2]
- используя трехмерные балочные элементы [Раздел 3]
- используя позиционный проект СтаДиКон [Раздел 4]
- используя оболочечные элементы в виде балки-стенки [Раздел 5]

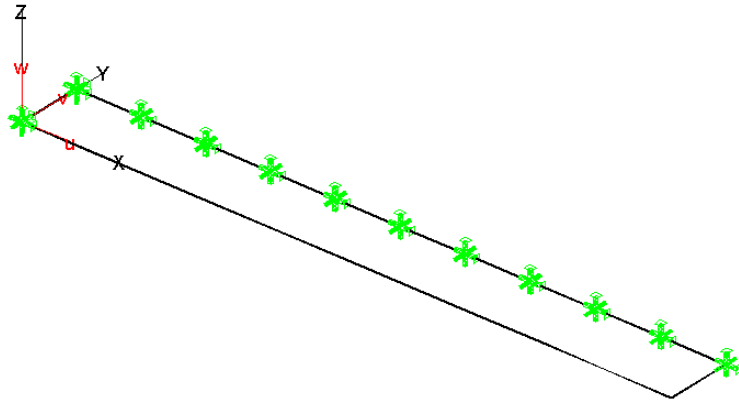


Рис 1.2 – Модель консольной пластины

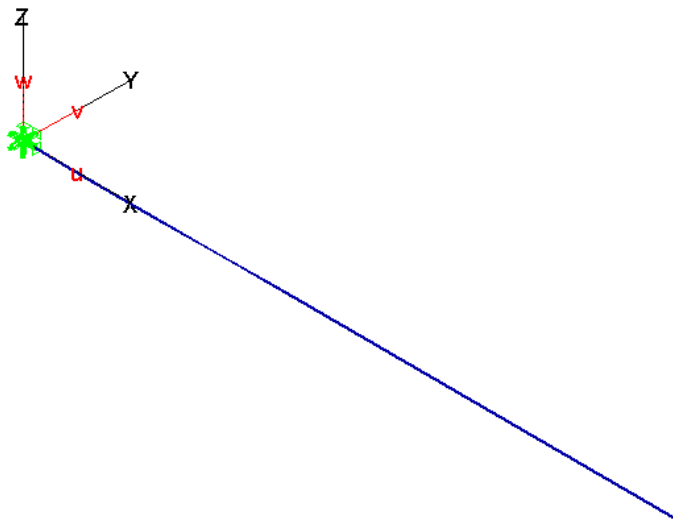


Рис 1.3 – Модель консольной балки

2. Консольная пластина

Создаем новый проект.

Новый проект

Проект: Консольная_пластина

в папке: C:\Projekte2026

Название:

Описание проекта:

1. Номер заказа: Дата: 14.08.2025

2. Номер заказа:

Исполнитель:

Архитектор:

Застройщик:

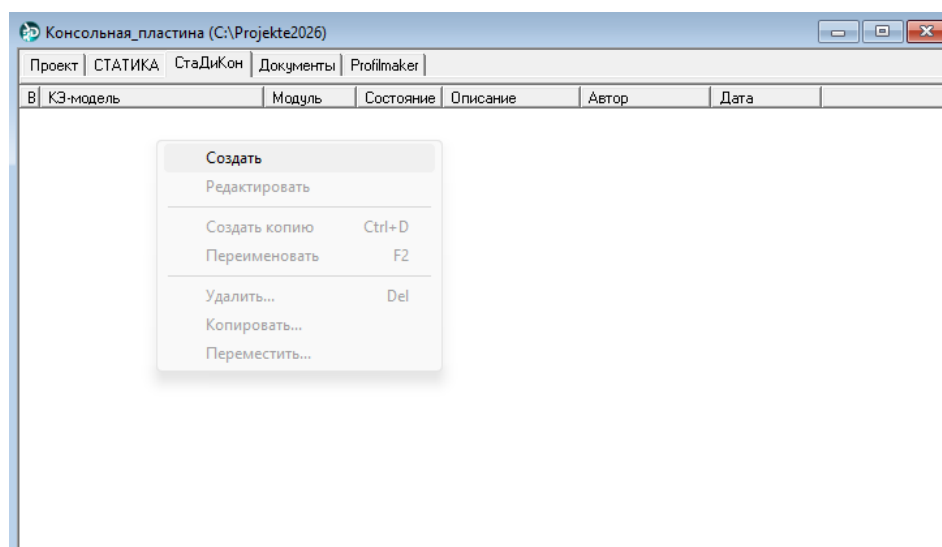
Сноска в документах:

Импорт описания...

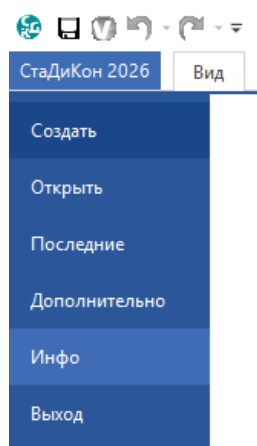
Разделы:

- ☒ СТАТИКА
- ☒ СтаДиКон
- ☒ ProfilMaker
- ☒ Документы

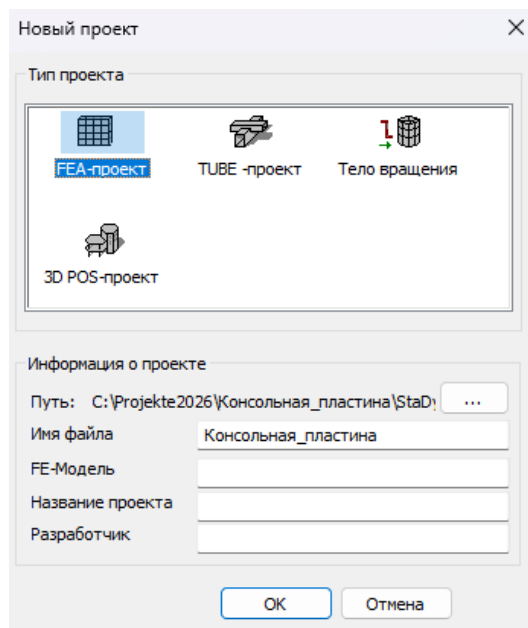
Во вкладке «СтаДиКон» нажимаем ПКМ в пустом окне и создаем новую КЭ модель.



Переходим в дерево проекта и выбираем «Создать».



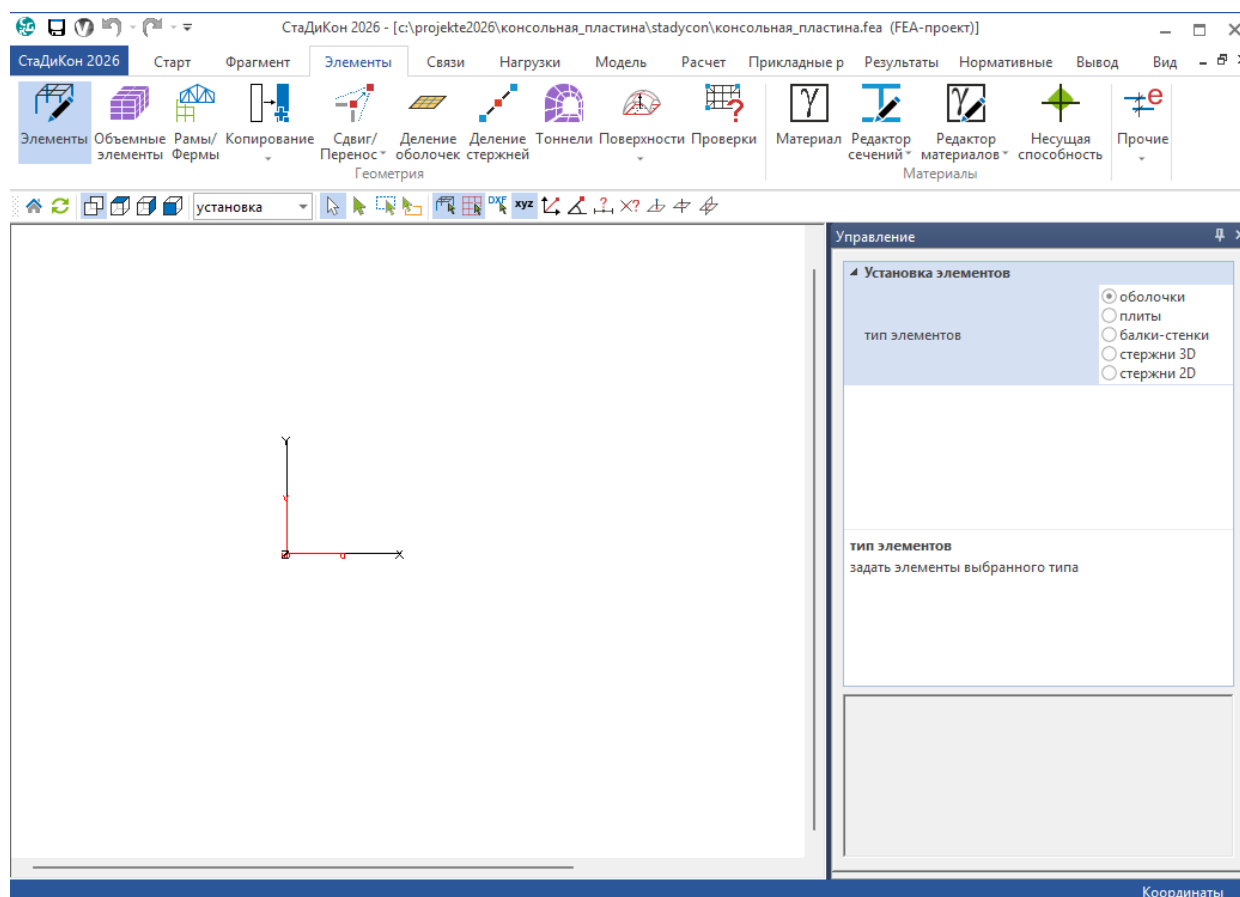
Создаем конечно-элементный «FEA-проект».



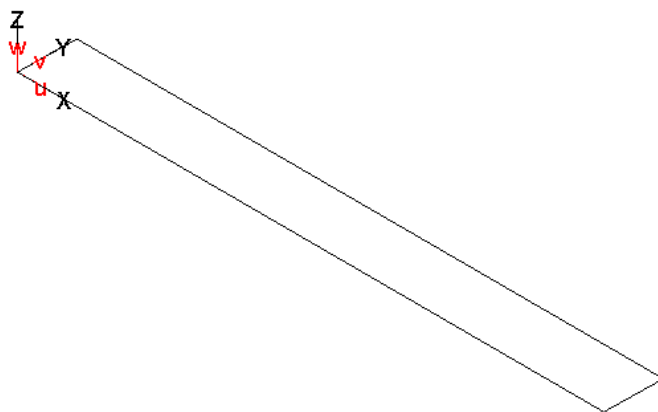
2.1. Геометрия

Так как задача симметрична, моделируем только половину консольной пластины, т.е. ширина принимается равной 0.1м вместо 0.2м.

Переходим на вкладку «Элементы», и снова выбираем «Элементы». Тип КЭ – «оболочки».

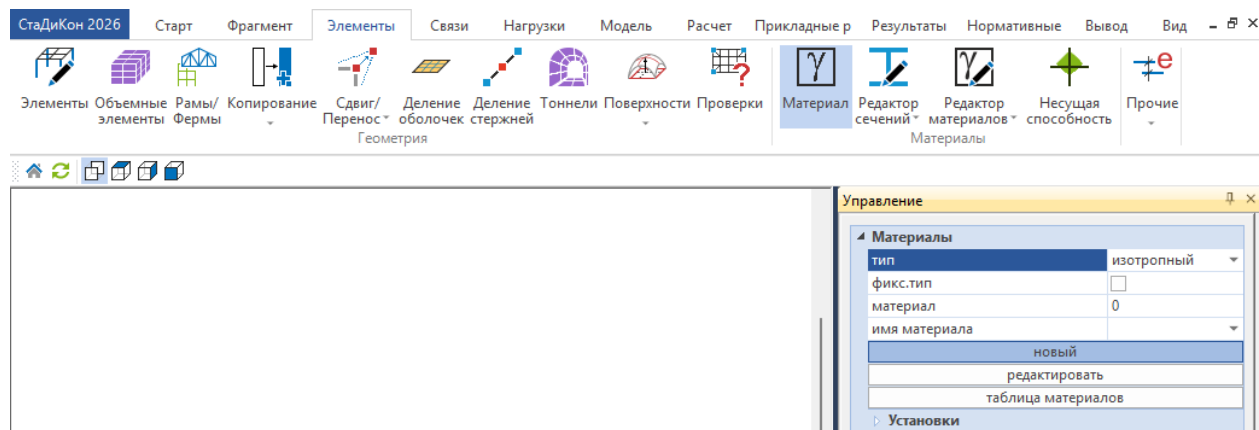


Нажимая на пустое окно в правом нижнем углу, чтобы отображались координаты предыдущего узла, создаем оболочку длиной 1м и шириной 0.1м.

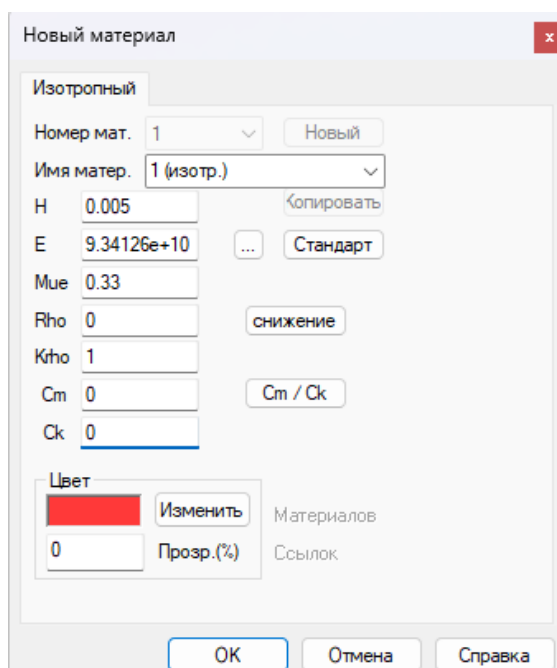


2.2. Свойства материала

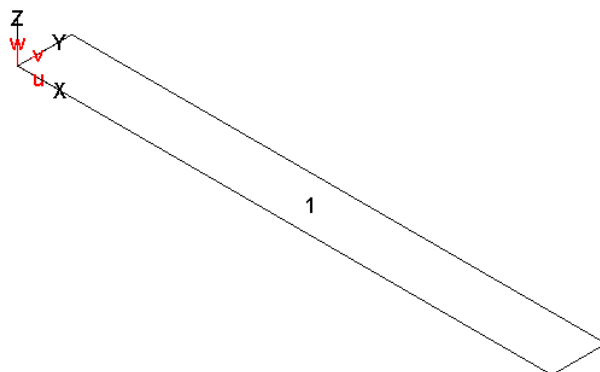
Переходим на окно «Материал», выбираем тип «*изотропный*» и создаем его, нажав на «новый».



Задаем описанные ранее свойства.

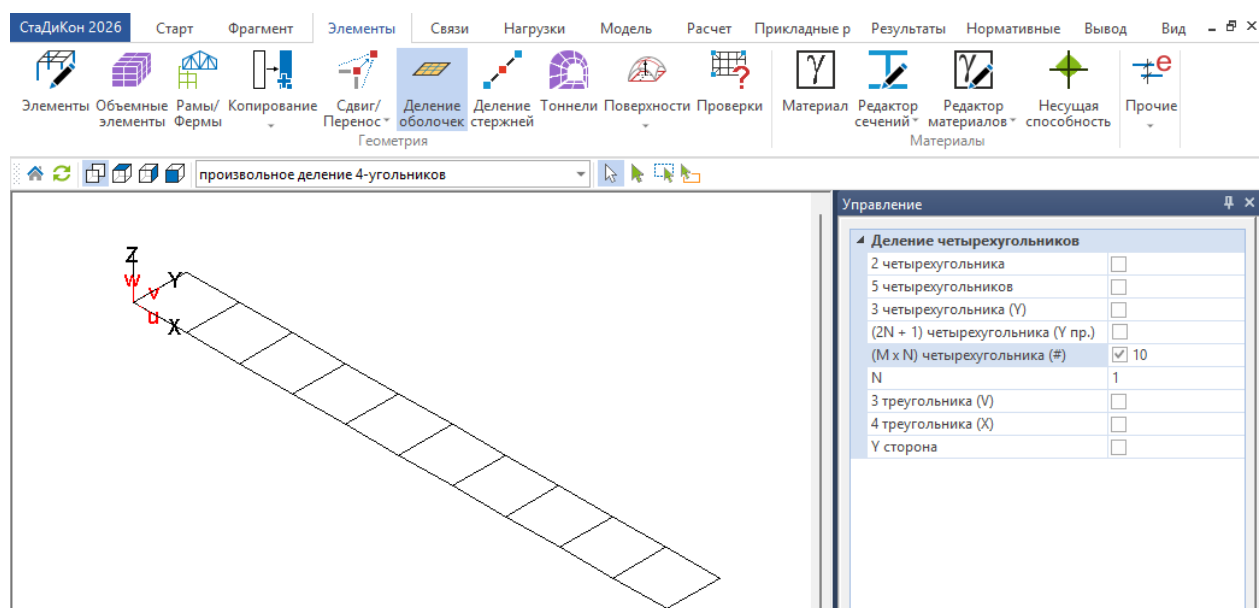


После нажимаем на плиту, чтобы задать данный материал.



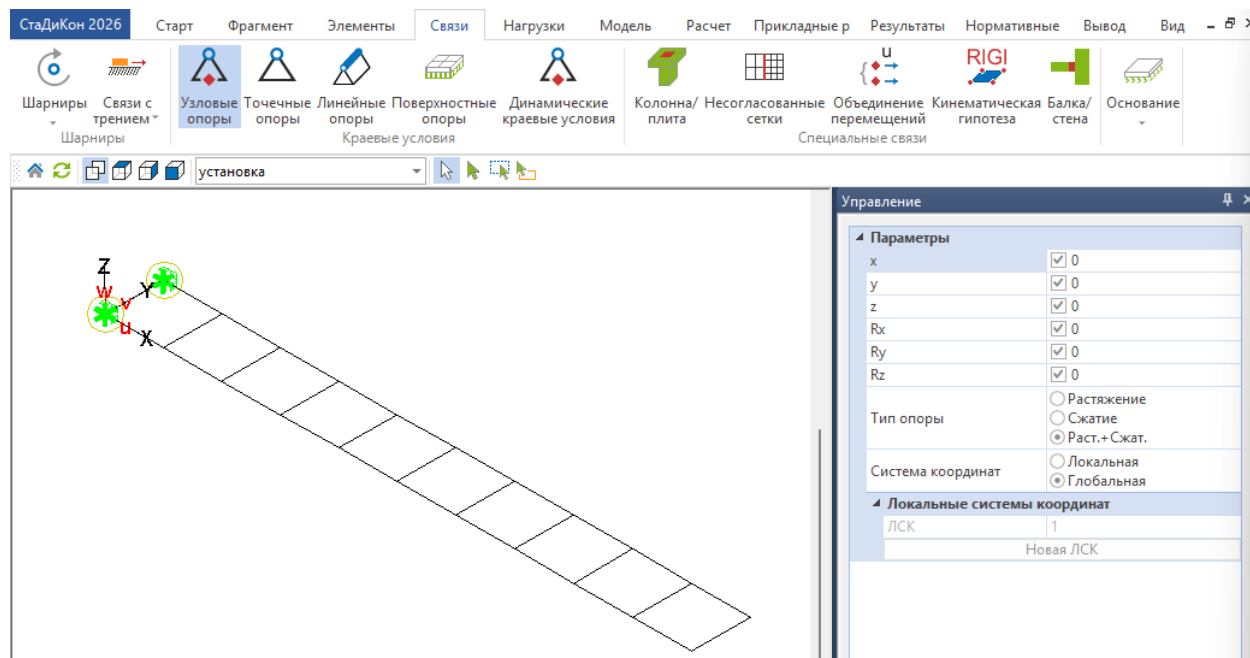
2.3. Разбиение плиты

Переходим на окно «Деление оболочек», выбираем «произвольное деление 4-угольников» и выбираем «(M x N) четырехугольника (#)». Задаем необходимое число элементов (10 x 1), выбираем плиту нажатием на ЛКМ, и завершаем разбиение кликнув ПКМ.

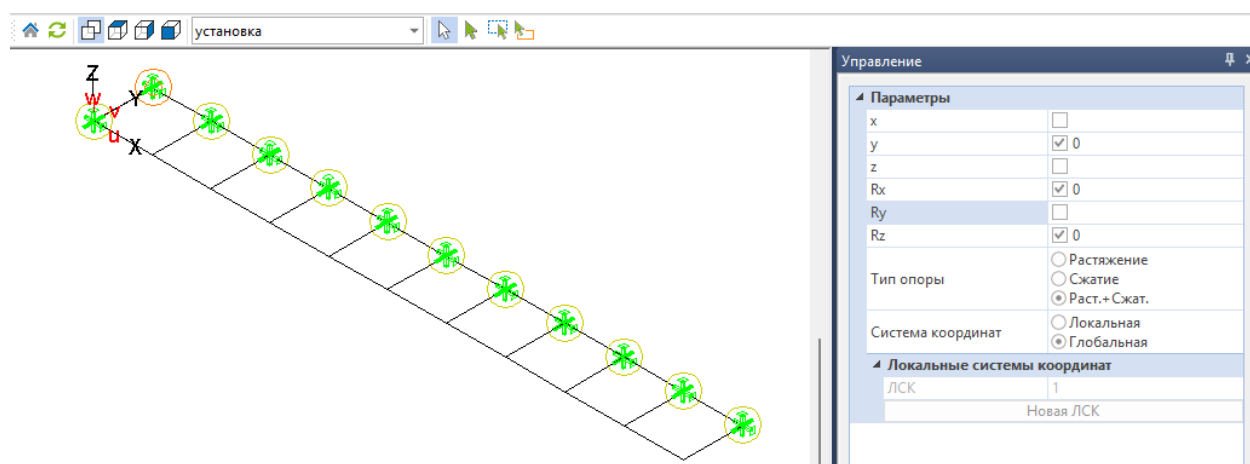


2.4. Краевые условия

На левом краю консольной пластины жесткая заделка (перемещения и повороты зафиксированы по всем направлениям). Для установки переходим на вкладку «Связи», далее «Узловые опоры», выбираем «установка» и фиксируем узлы следующим образом:

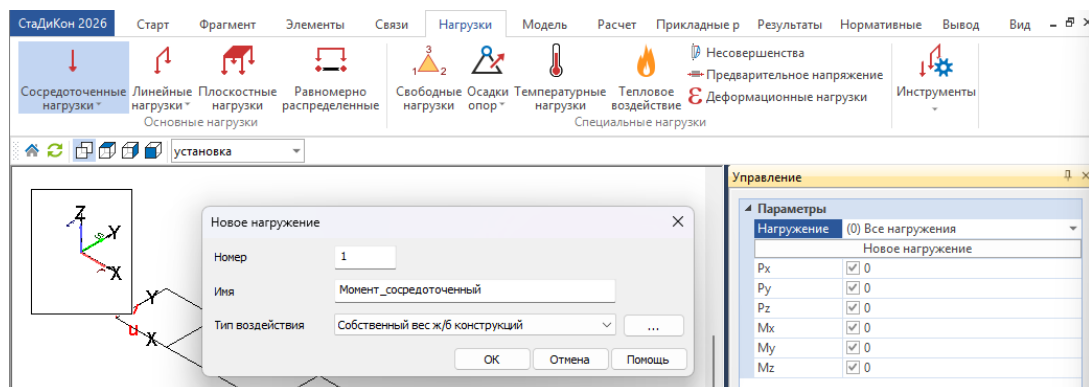


Так как мы воспользовались симметрией задачи, то добавляем на верхнюю грань краевые условия симметрии:

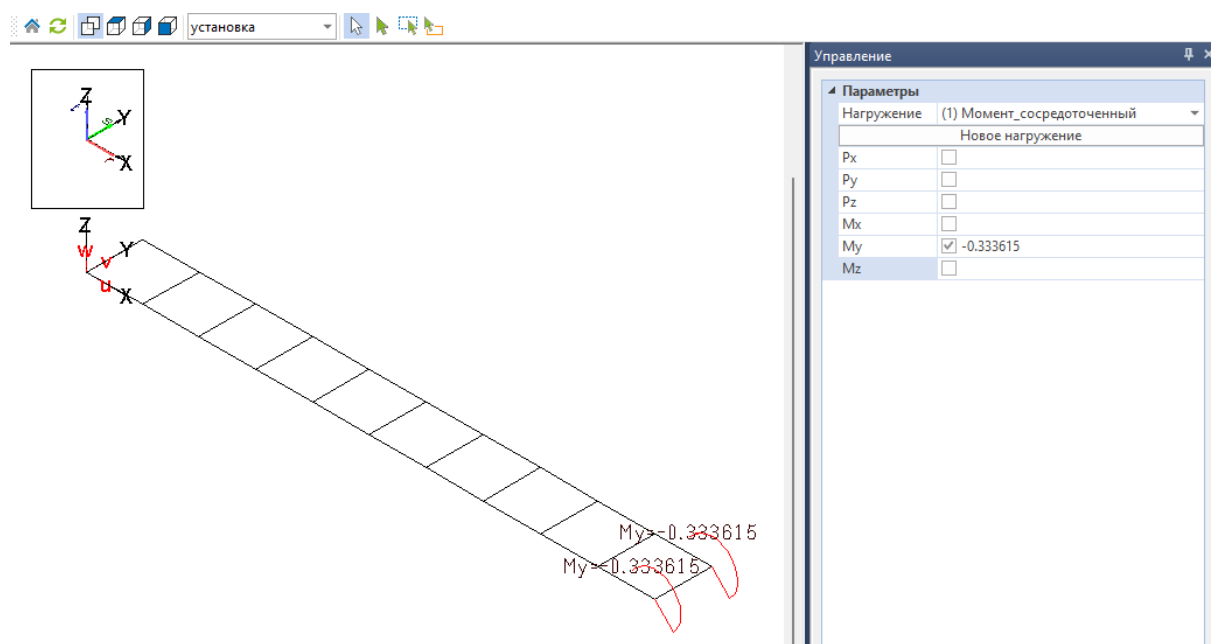


2.5. Нагрузки

Так как изначальный распределенный момент равен “-6.6723 кН*м/м”, то мы зададим на узлы правой грани узловой сосредоточенный момент, равный “-0.333615 кН*м”. Для этого переходим во вкладку «Нагрузки», нажимаем на «Сосредоточенные нагрузки» и выбираем «Узловые». Создаем «Новое нагружение»

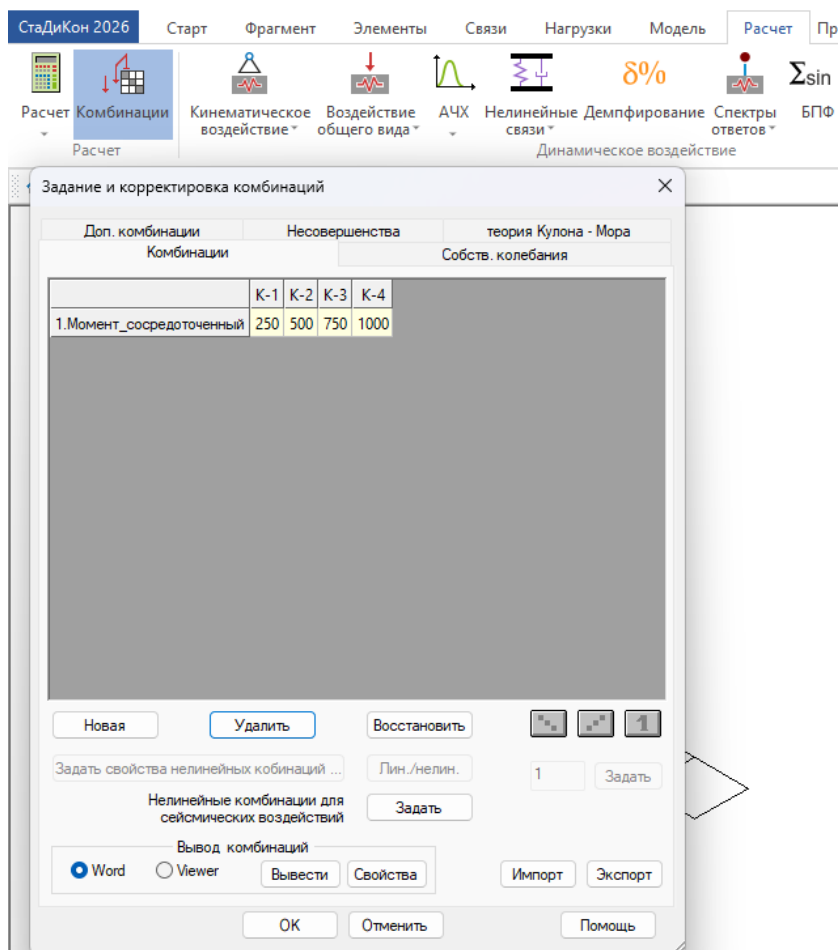


И задаем момент M_y

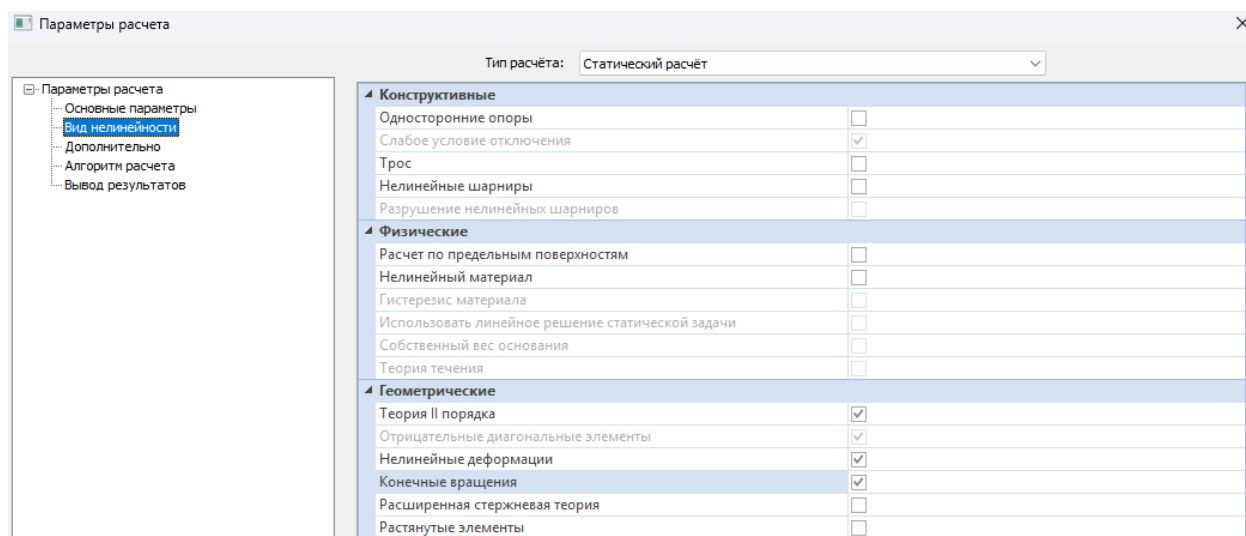


2.6. Параметры расчета

Переходим на вкладку «Расчет» и выбираем «Комбинации». Создаем 4 комбинации воздействий (250, 500, 750, 1000).



Далее нажимаем на «Расчет» и задаем следующие параметры расчета:



Параметры расчёта

Тип расчёта: Статический расчёт

Параметры расчёта

- Основные параметры
- Вид нелинейности
- Дополнительно
- Алгоритм расчёта
- Вывод результатов

Решатель

Разреженный решатель	☒
С использованием диска	☐
Проверка решения	☐
Количество потоков	6
Метод Ланцоша	☐
Ланцош - размер блока	0
Ланцош - нарезка спектра	☐

Итерации

Точность	0.0001
Количество итераций	5000
Прерывание итераций	☒
Превышение итераций	☒
Итерации на шаге по времени	☐

Дополнительно

Использовать результаты нелинейного статического расчёта	☐
Закрепление узлов	☐
Жёсткое закрепление упругого основания	☐
Снижение плотности	☐
Ускорение свободного падения	10
Добавить внешнее демпфирование	Не добавлять

Теплопроводность

Рассчитывать теплопроводность	☐
-------------------------------	--------------------------

Параметры расчёта

Тип расчёта: Статический расчёт

Параметры расчёта

- Основные параметры
- Вид нелинейности
- Дополнительно
- Алгоритм расчёта
- Вывод результатов

Параметры элемента

Элементы пластин, балок-стенок, оболочек	Гибридный 1
Объёмные элементы	Гибридный 1
Штрафная функция	☒
Штрафной множитель	1
Комбинация секущей и касательной жесткости	1

Элементные нагрузки и массы

Согласованные нагрузки	☐
Согласованные массы	☒
Инерция поворота нормали	☐
Исключить массы по Z	☐

Преобразование модели

Осреднение с весами	☒
Частное решение	☐
Преобразование элементных шарниров	☒
Изменение геометрии при задании эксцентриситетов	☒
Новая реализация ELEM	☐

Ограничения

Верхний предел жесткости	1e+10
Max значение жесткости	1e+10
Min значение жесткости	0.00057

Параметры расчёта

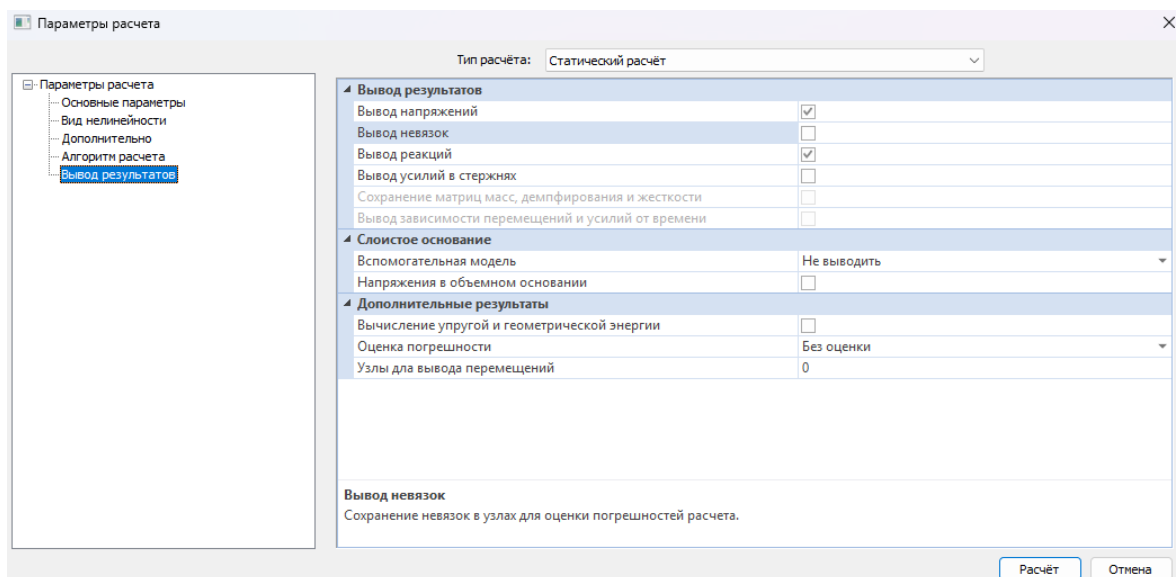
Тип расчёта: Статический расчёт

Параметры расчёта

- Основные параметры
- Вид нелинейности
- Дополнительно
- Алгоритм расчёта
- Вывод результатов

Алгоритм расчёта

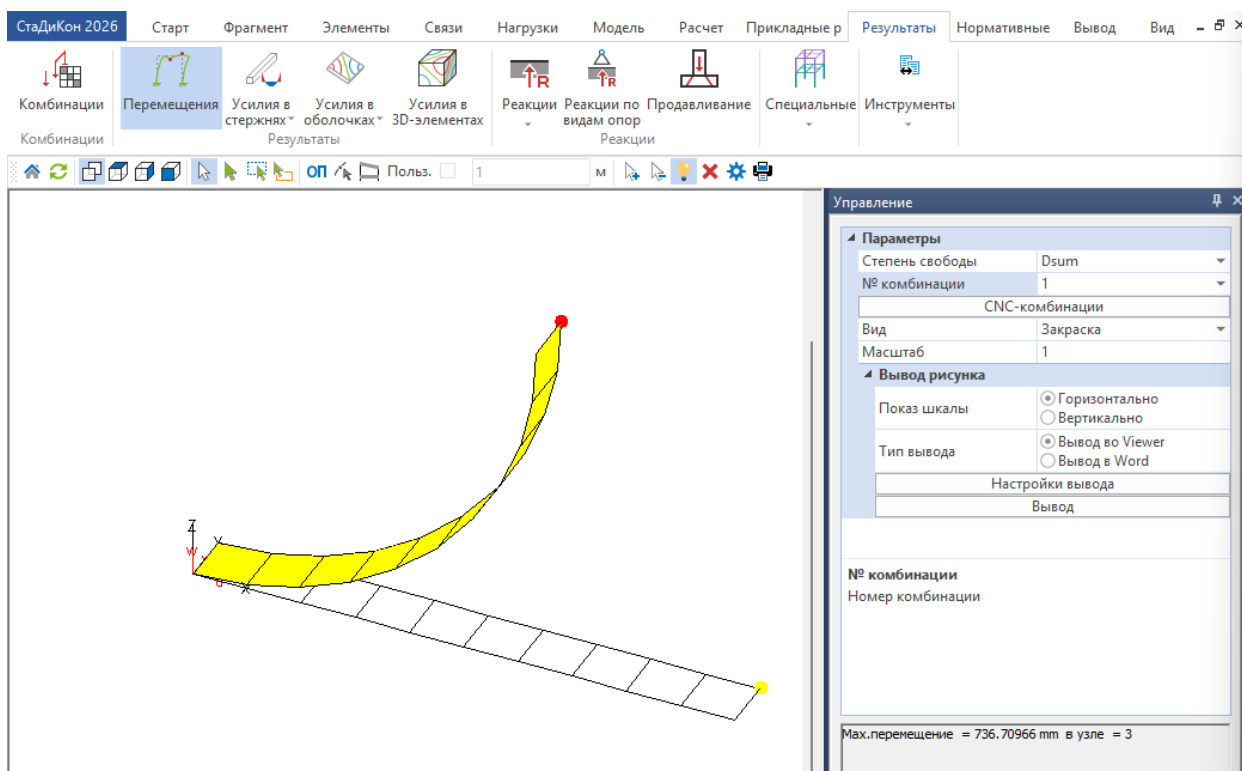
Инкрементно-итеративный метод решения	☐
Количество шагов приращений нагрузки	1000
Начальное приближение	По линейной теории

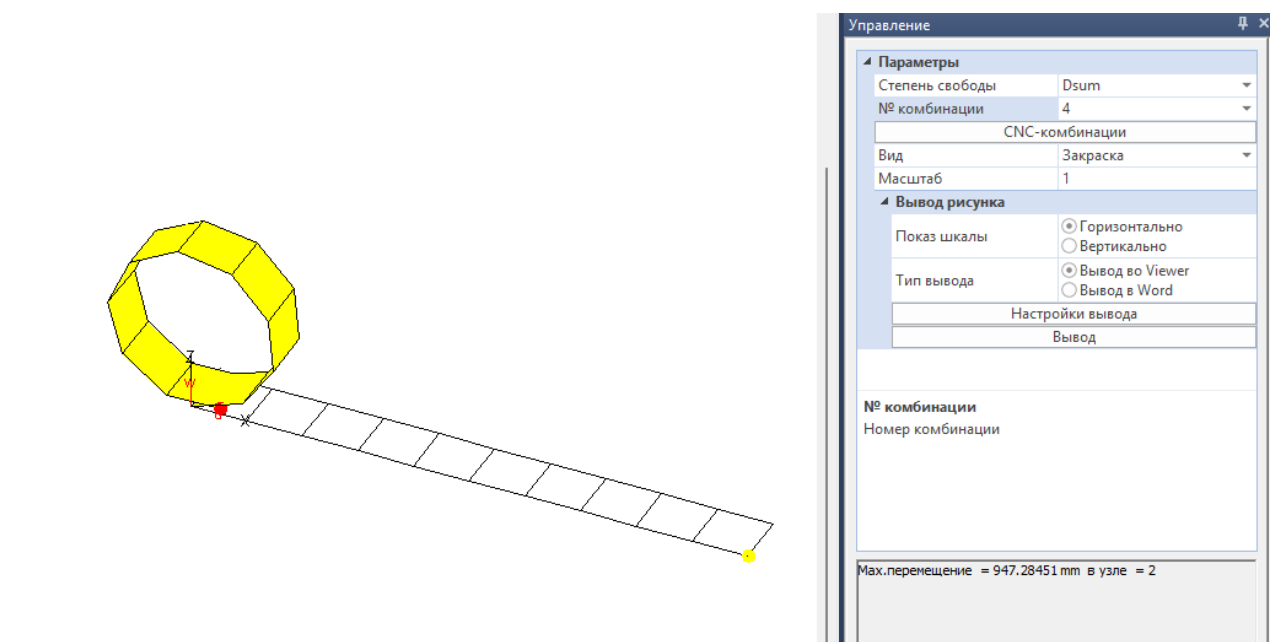
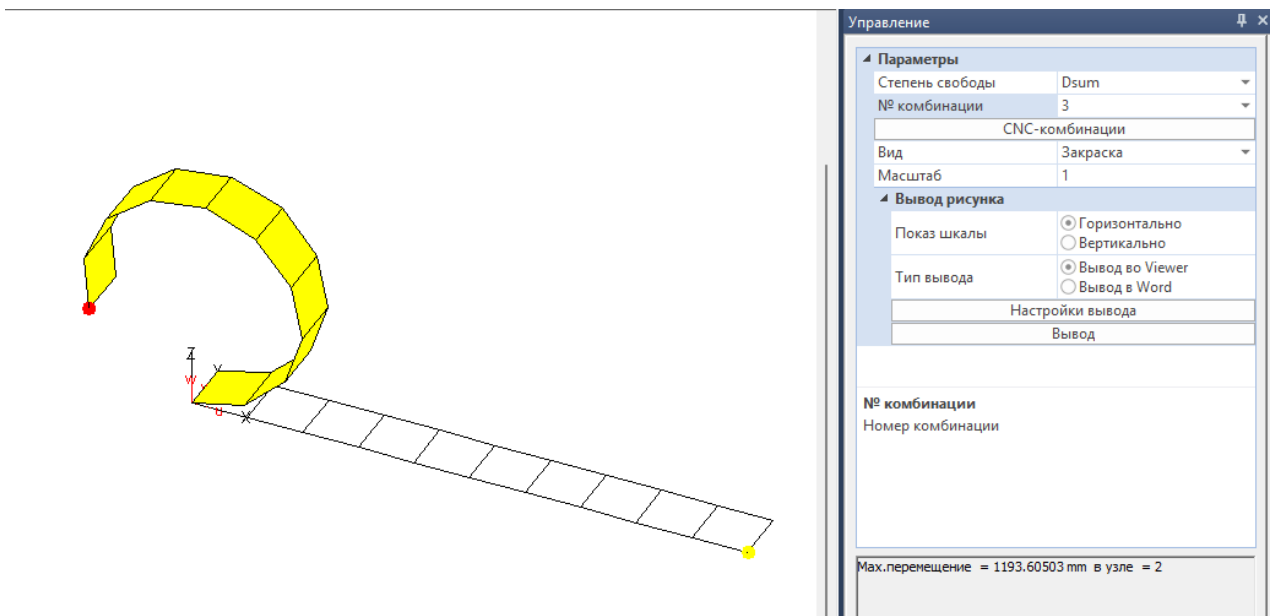
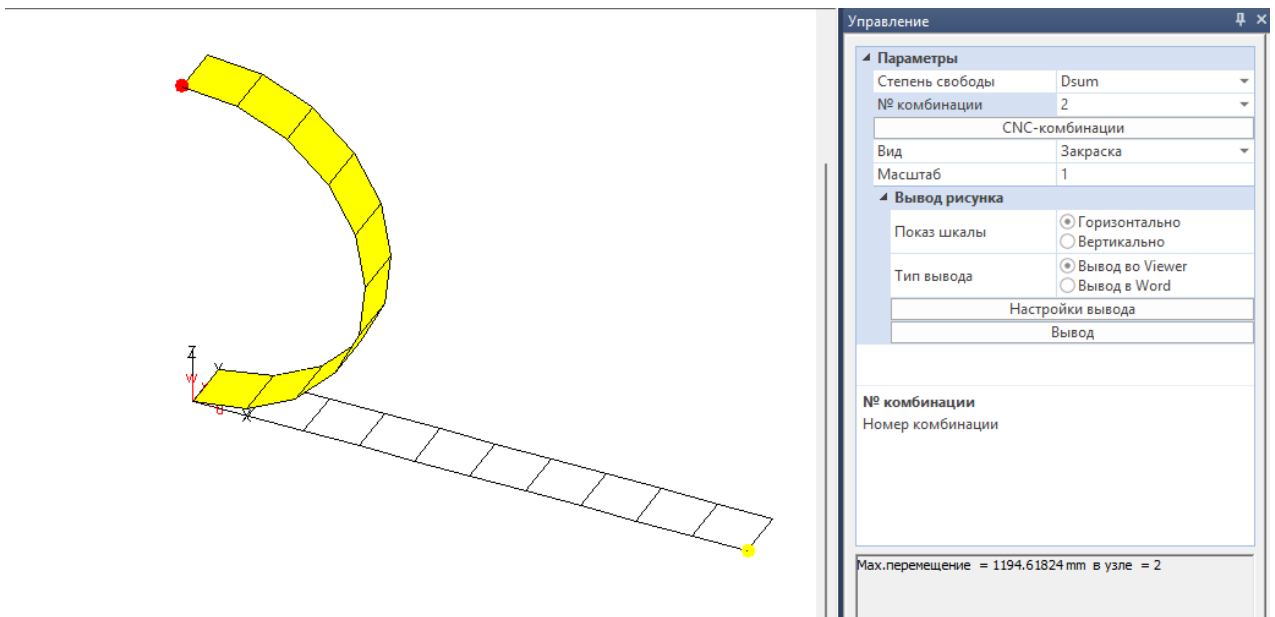


Выполняем расчет.

2.7. Результаты

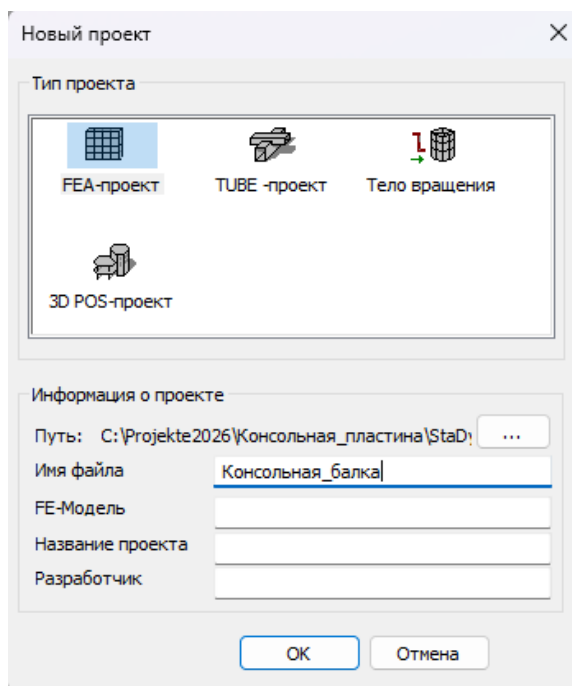
Переходим на вкладку «Результаты» и выбираем «Перемещения». В итоге были получены следующие результаты для четырех комбинаций:





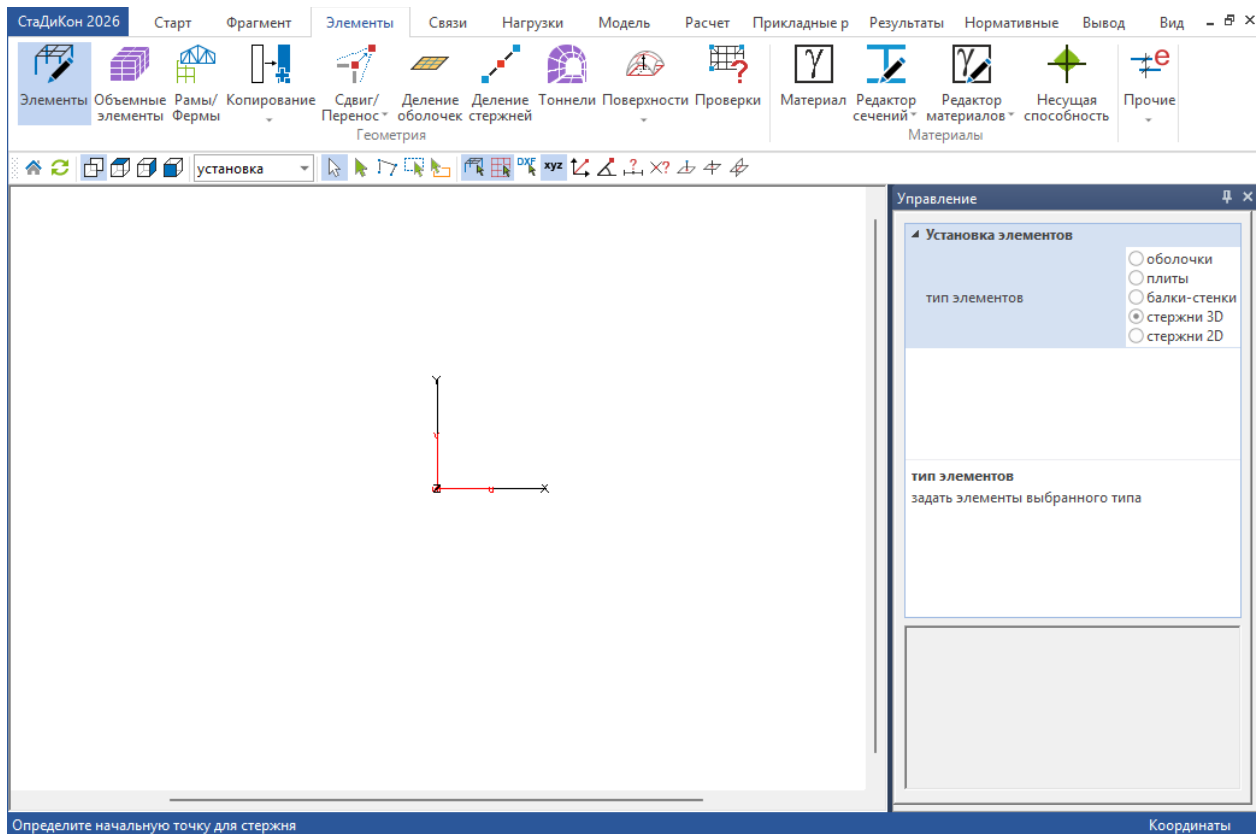
3. Консольная балка

Для моделирования с использованием балочных элементов создаём новый проект аналогично предыдущему разделу.

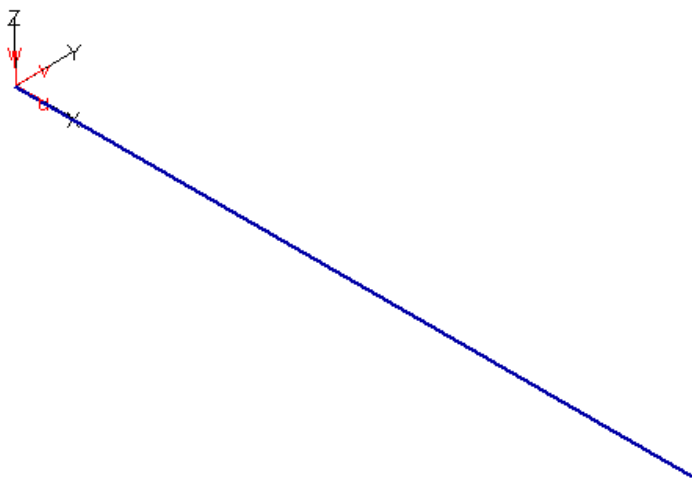


3.1. Геометрия

Переходим на вкладку «Элементы», и снова выбираем «Элементы». Тип КЭ – «*стержни 3D*».

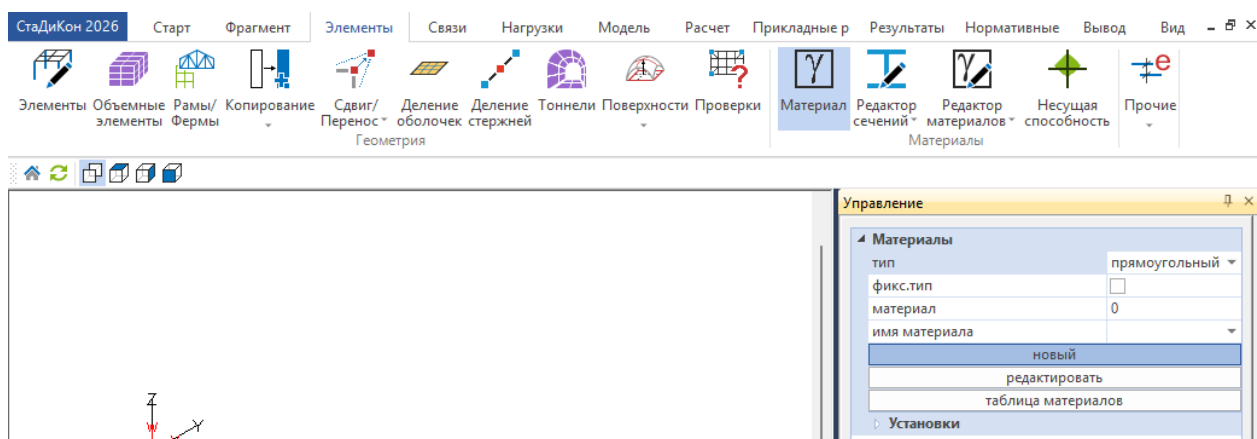


Задаем координаты двух узлов и создаем стержень длиной 1м.

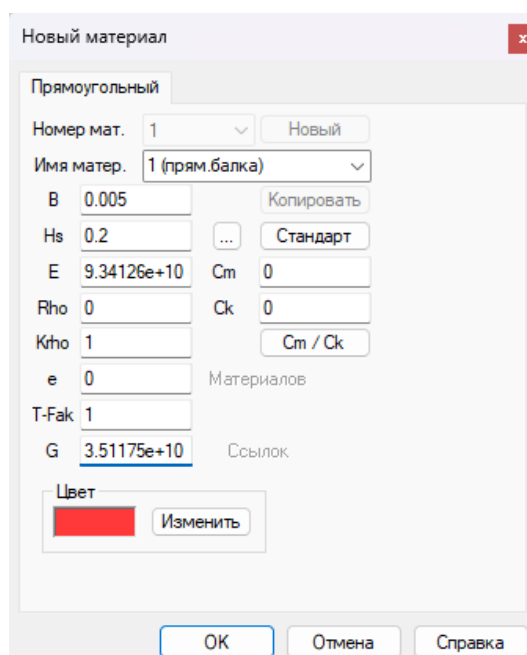


3.2. Свойства материала

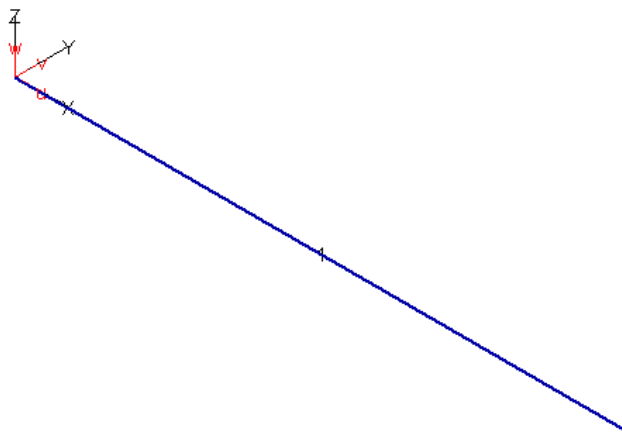
Переходим на окно «Материал», выбираем тип «прямоугольный» и создаем его, нажав на «новый».



Задаем необходимые свойства материала. Модуль сдвига $G = 3.51175e+10$ кН/м²

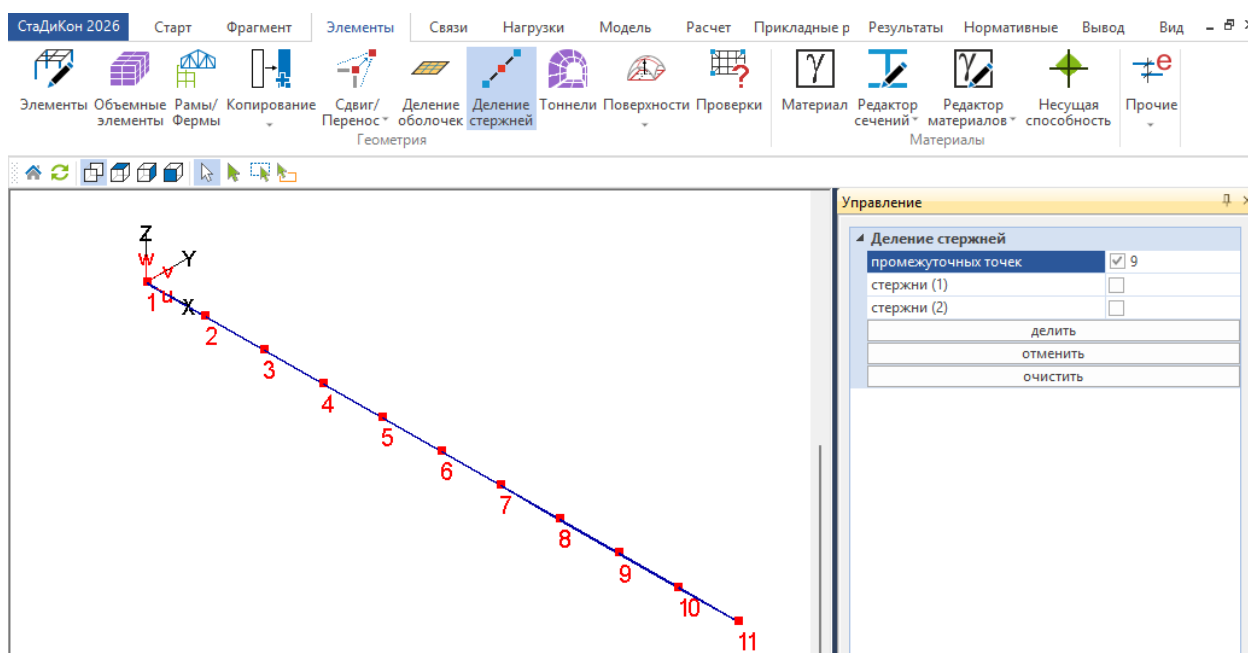


После нажимаем на стержень, чтобы задать данный материал.

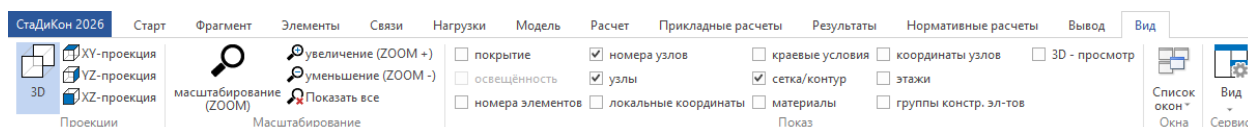


3.3. Разбиение стержня

Переходим на окно «Деление стержней», выбираем стержень нажатием, устанавливаем число «промежуточных точек» равное 9, и разбиваем его, нажав на «делить».

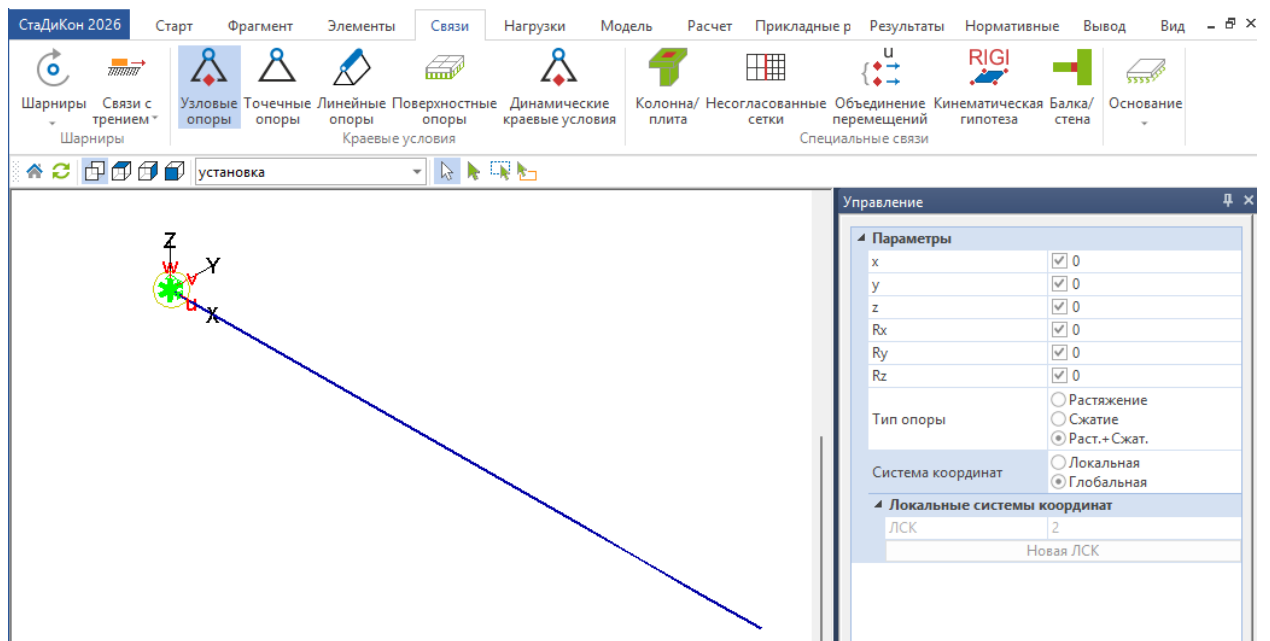


В окне «Вид» можно включить отображение и нумерацию узлов, чтобы убедиться в правильности разбиения.



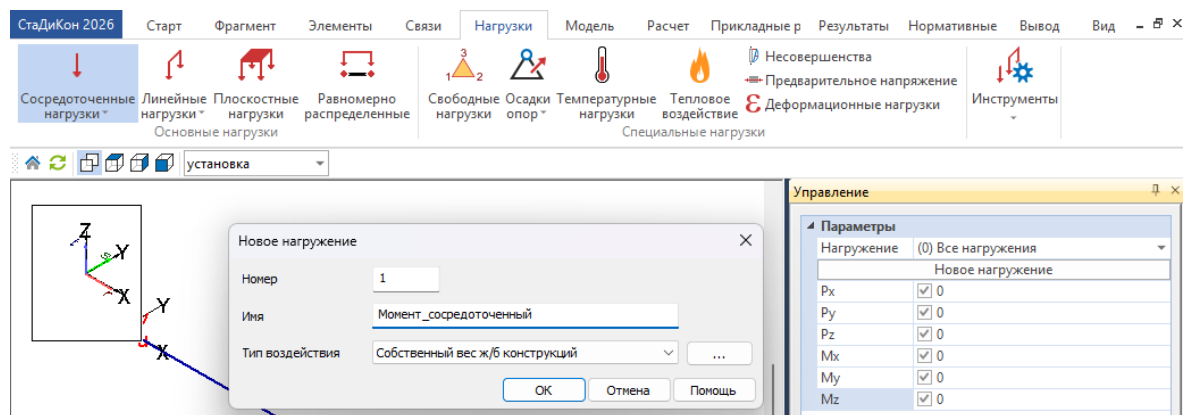
3.4. Краевые условия

На левом конце стержня жесткая заделка (перемещения и повороты зафиксированы по всем направлениям). Для установки переходим на вкладку «Связи», далее «Узловые опоры», выбираем «установка» и фиксируем левый узел следующим образом:

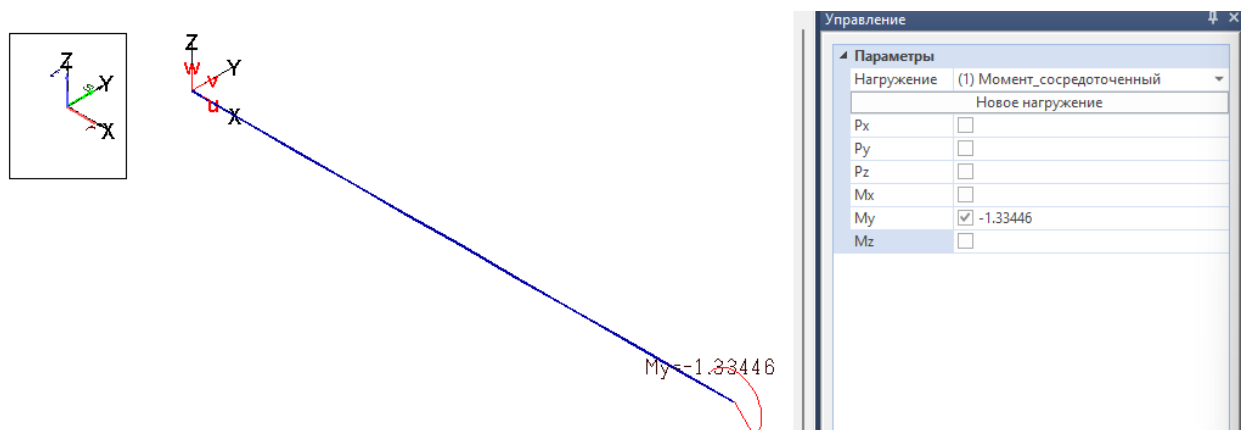


3.5. Нагрузки

На правый конец стержня задаем сосредоточенный момент, равный “-1.33446 кН*м”, что эквивалентно изначальному распределенному моменту “-6.6723 кН*м/м”. Для этого переходим во вкладку «Нагрузки», нажимаем на «Сосредоточенные нагрузки» и выбираем «Узловые». Создаем «Новое нагружение».

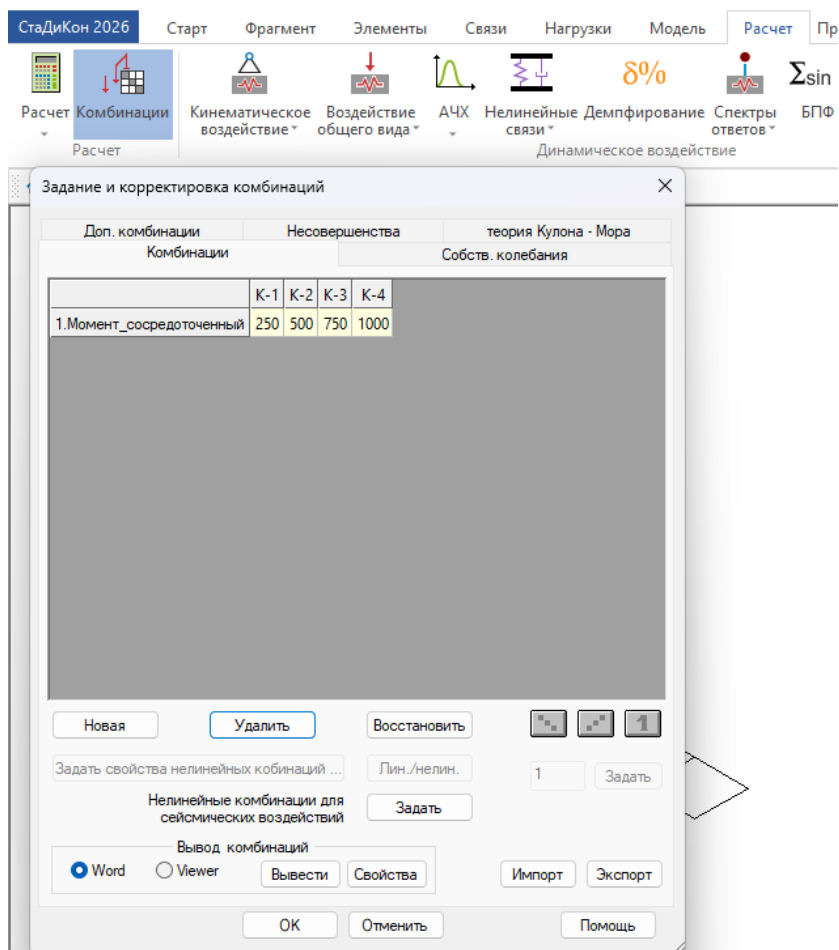


И задаем момент M_y .

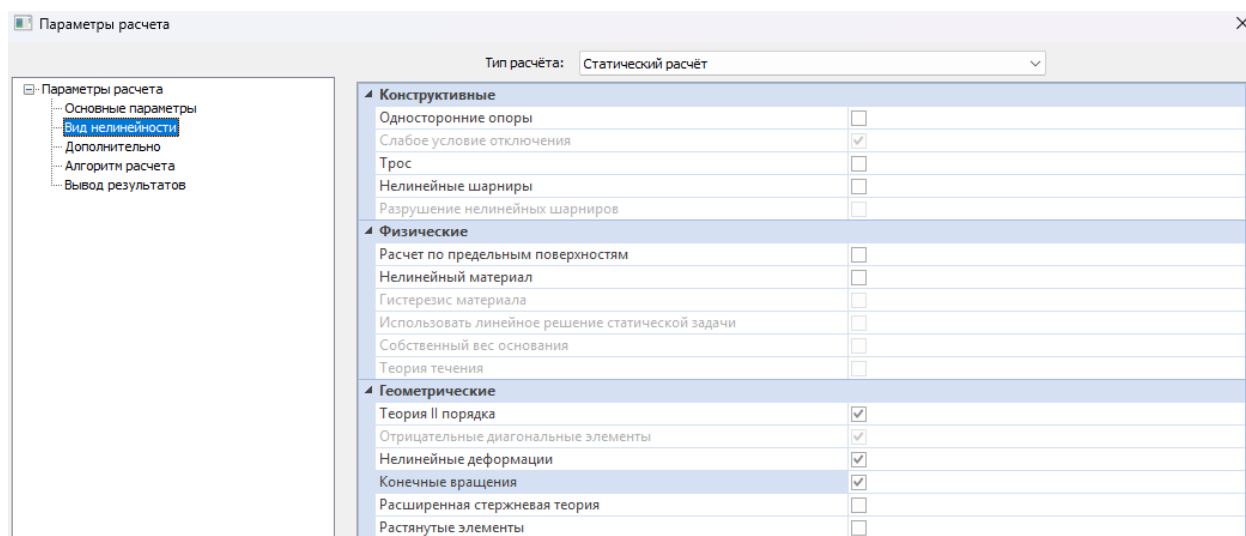


3.6. Параметры расчета

Переходим на вкладку «Расчет» и выбираем «Комбинации». Создаем 4 комбинации воздействий (250, 500, 750, 1000).



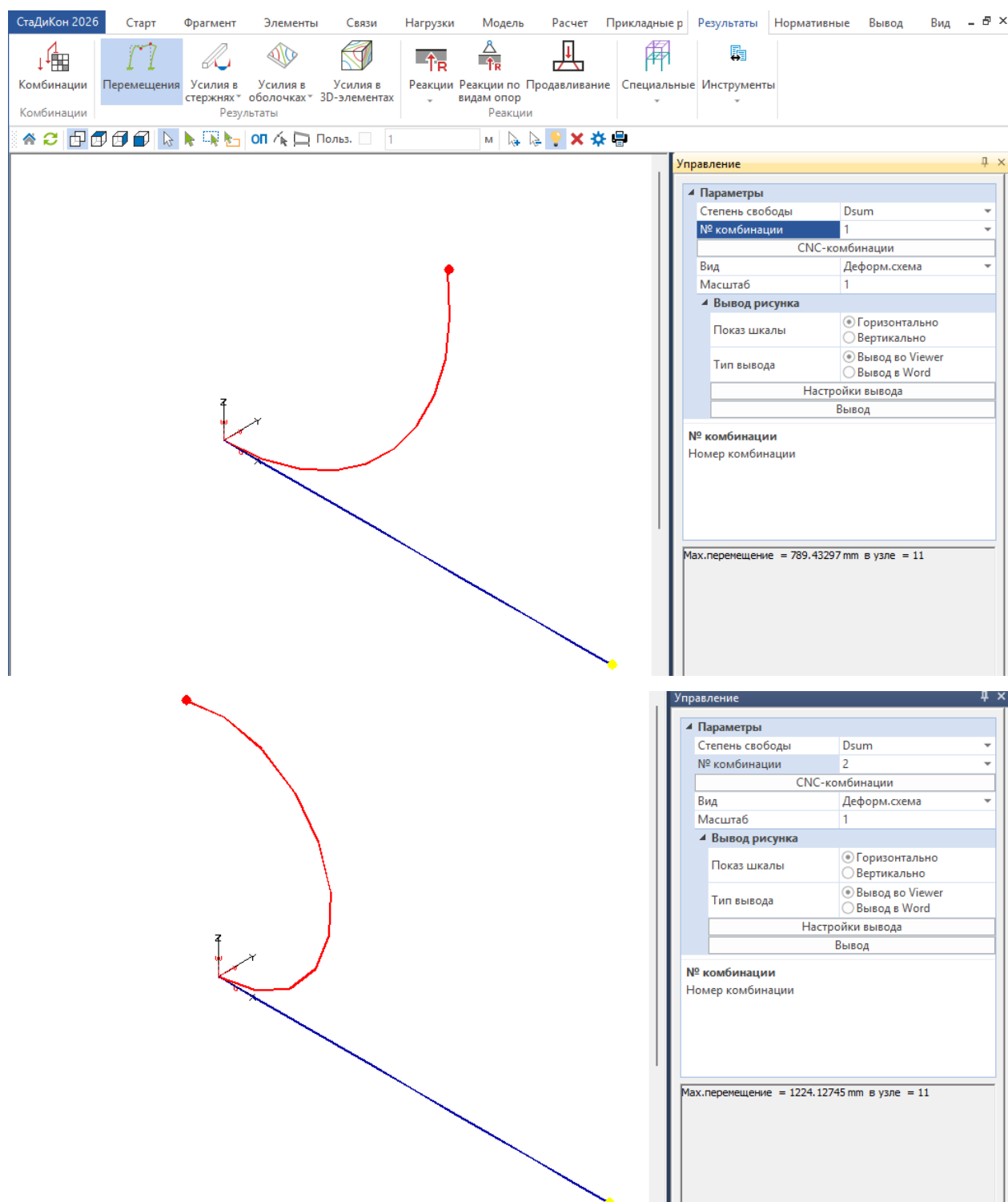
Далее нажимаем на «Расчет» и задаем следующие параметры расчета:

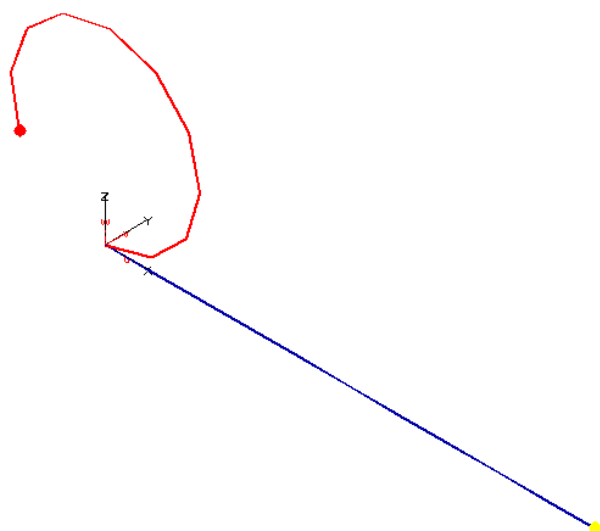


Выполняем расчет.

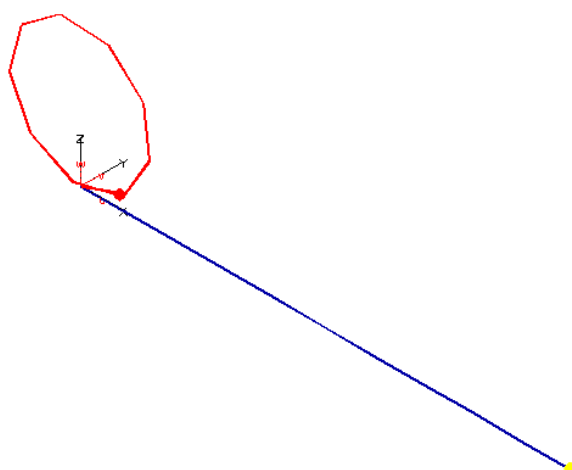
3.7. Результаты

Переходим на вкладку «Результаты» и выбираем «Перемещения». В итоге были получены следующие результаты для четырех комбинаций:





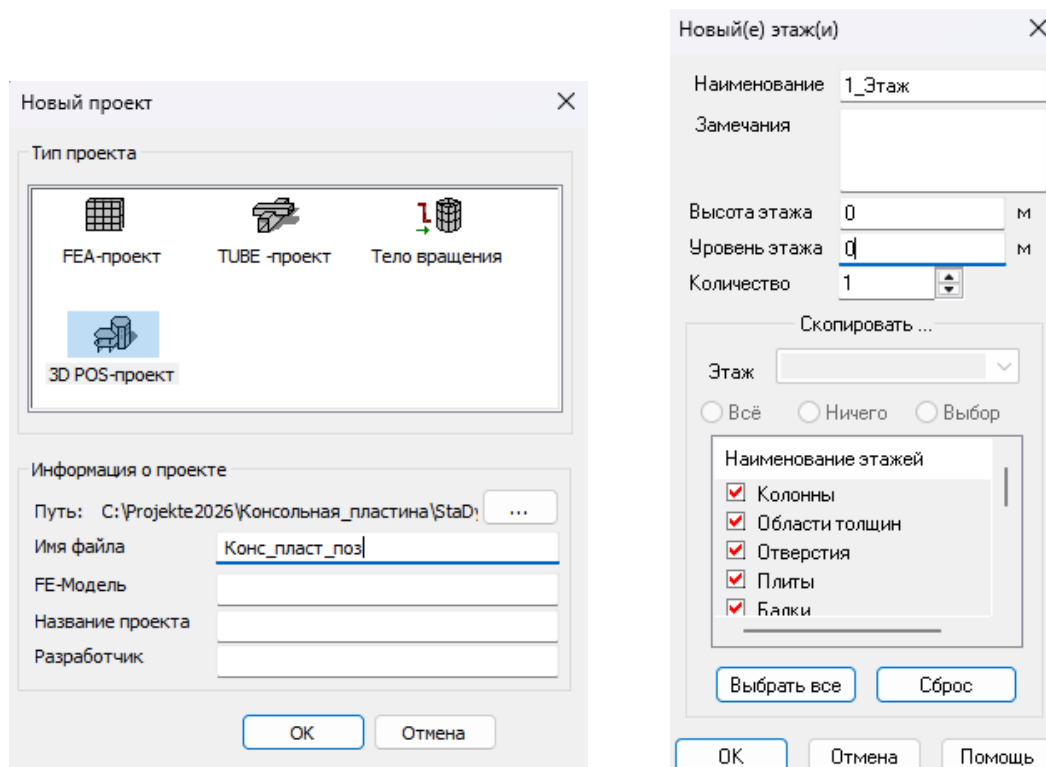
Управление	
Параметры	
Степень свободы	Dsum
№ комбинации	3
CNC-комбинации	
Вид	Деформ.схема
Масштаб	1
Вывод рисунка	
Показ шкалы	☒ Горизонтально ☐ Вертикально
Тип вывода	☒ Вывод во Viewer ☐ Вывод в Word
Настройки вывода	
Вывод	
№ комбинации	
Номер комбинации	
Max.перемещение = 1182.07797 mm в узле = 11	



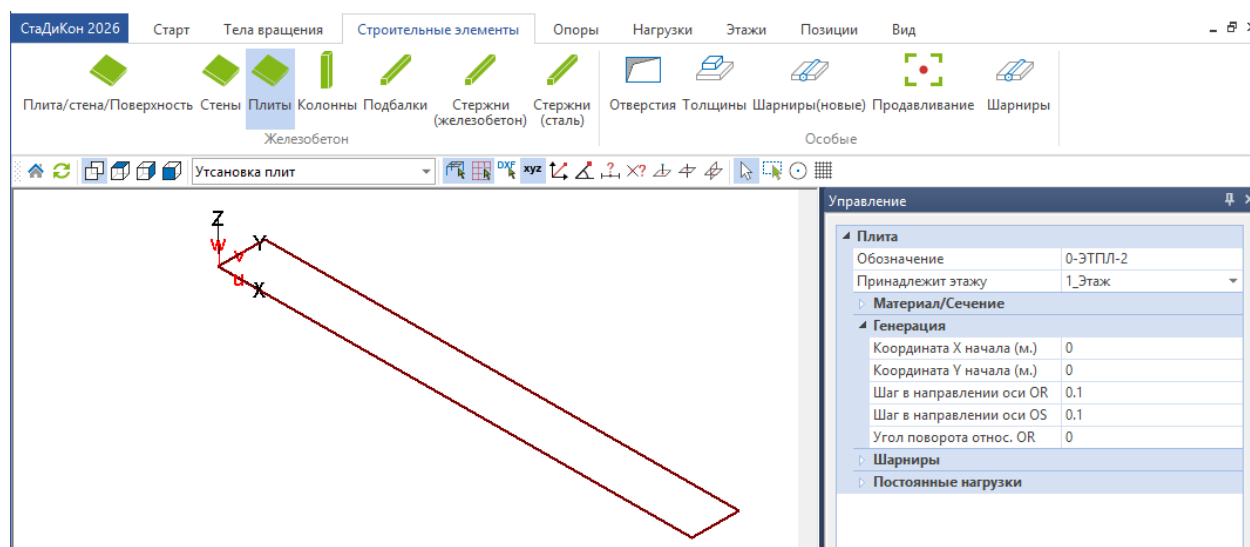
Управление	
Параметры	
Степень свободы	Dsum
№ комбинации	4
CNC-комбинации	
Вид	Деформ.схема
Масштаб	1
Вывод рисунка	
Показ шкалы	☒ Горизонтально ☐ Вертикально
Тип вывода	☒ Вывод во Viewer ☐ Вывод в Word
Настройки вывода	
Вывод	
№ комбинации	
Номер комбинации	
Max.перемещение = 921.20023 mm в узле = 11	

4. Консольная пластина в позиционном проекте

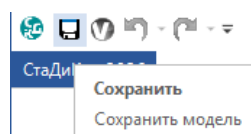
Продemonстрируем способ создания шаблона геометрии через позиционный проект. Для этого в окне создания проекта выбираем «3D POS-проект» и установим нулевые отметки этажа.



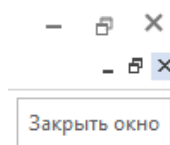
Переходим во вкладку «Строительные элементы» и заходим в подпункт управления «Генерация». Устанавливаем «Шаг в направлении оси OR (OS)» равными 0.1. Нажимая на пустое окно в правом нижнем углу, задаем плиту длиной 1м и шириной 0.1м.



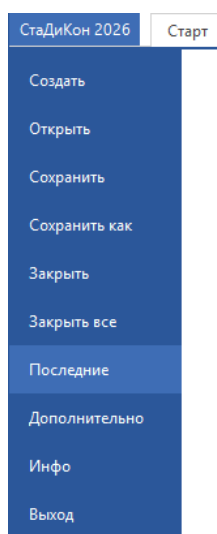
После создания геометрии сохраняем модель.



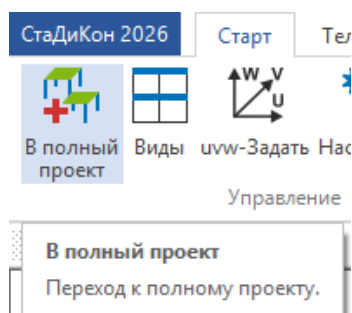
Далее выкидываем ее из проекта, нажав на маленький крестик в правом верхнем углу.



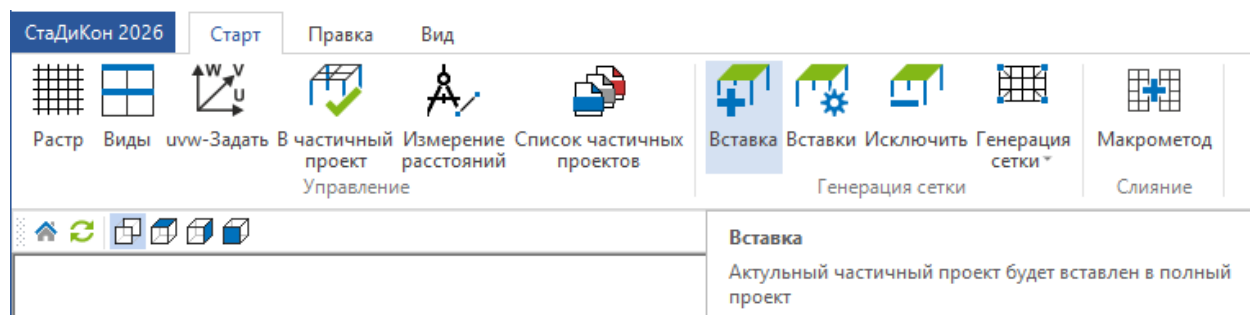
И открываем заново через дерево проекта.



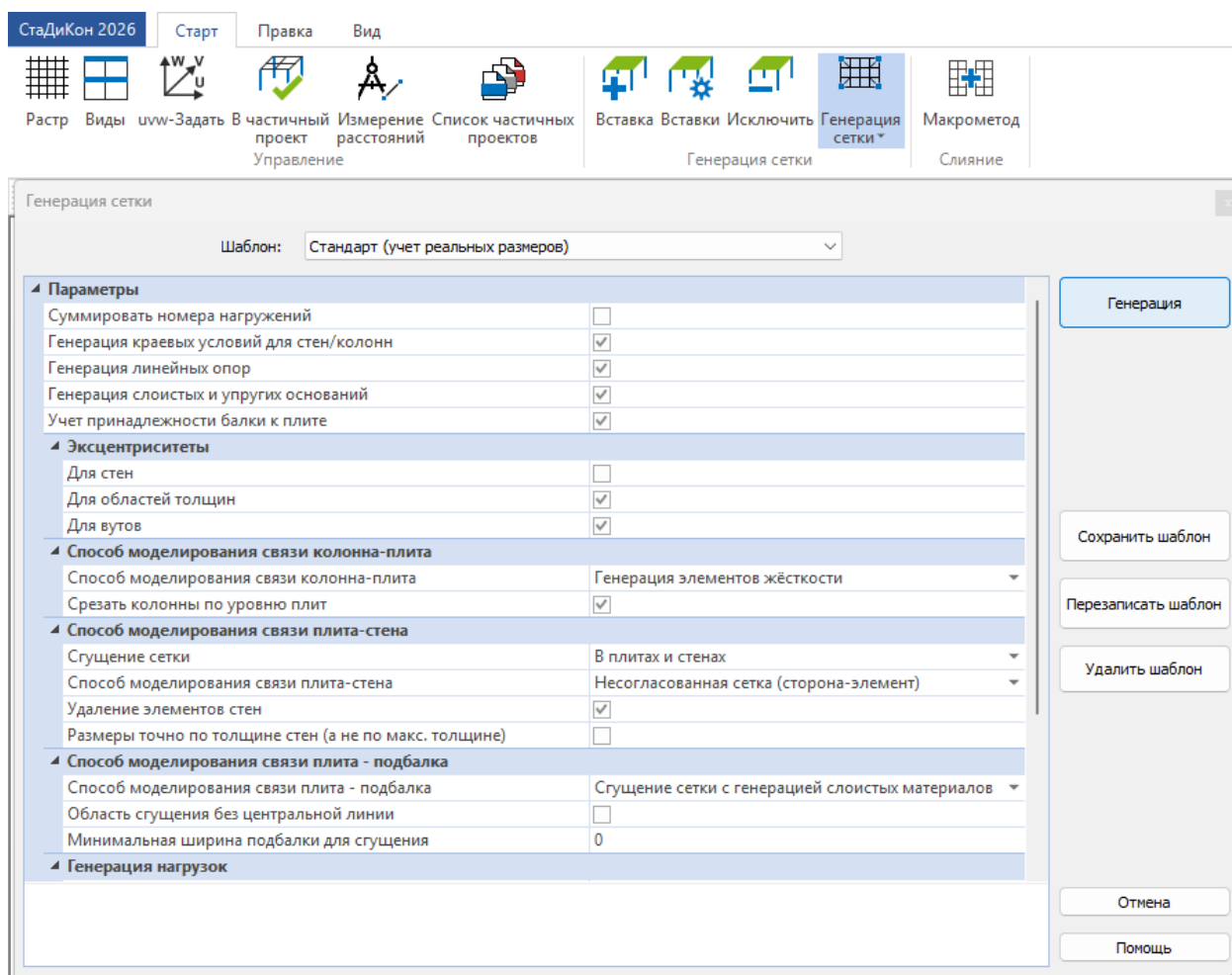
Переходим в полный проект, нажав соответствующую кнопку.



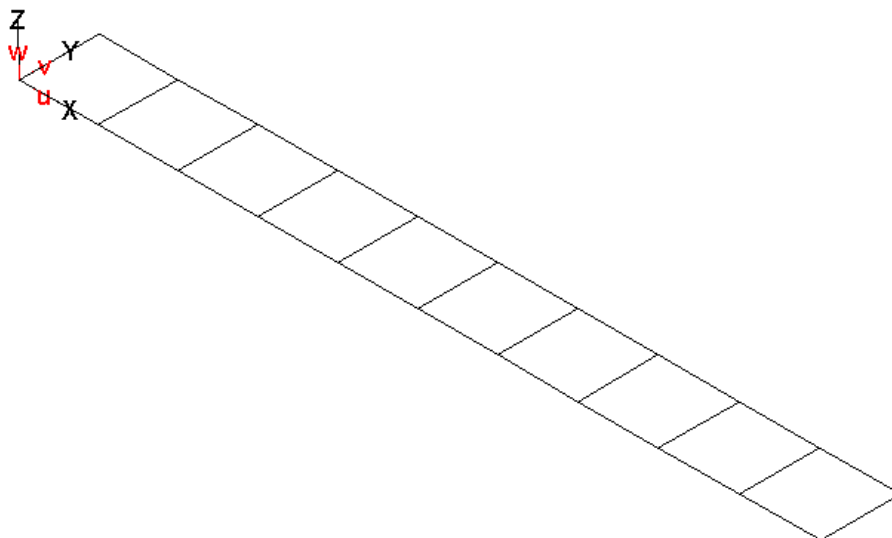
И добавляем модель, нажав на «Вставка».



После открываем пункт «Генерация сетки» и нажимаем на «Генерация»



Получаем уже разбитую КЭ модель

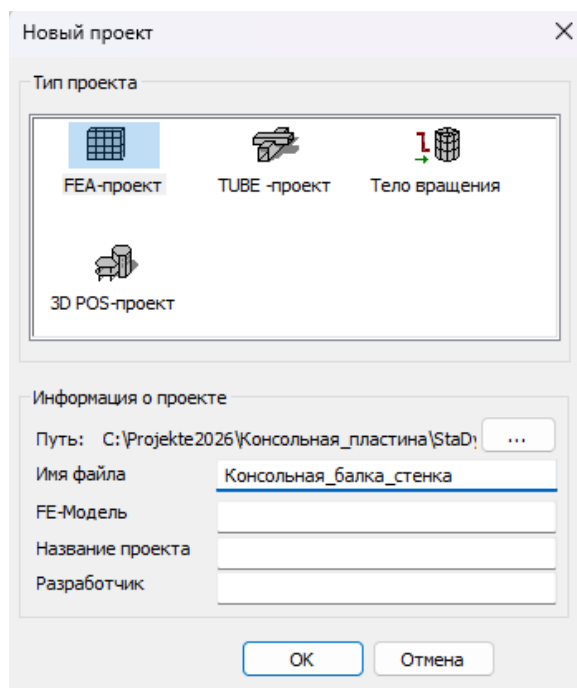


Таким образом, редактируя шаг сетки в позиционном файле можно генерировать множество различных вариаций сетки КЭ модели.

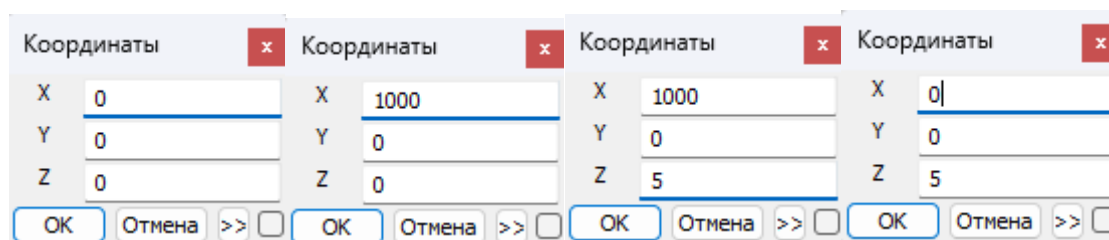
Дальнейшие действия для выполнения изначальной задачи описаны в [Раздел 2].

5. Консольная балка-стенка

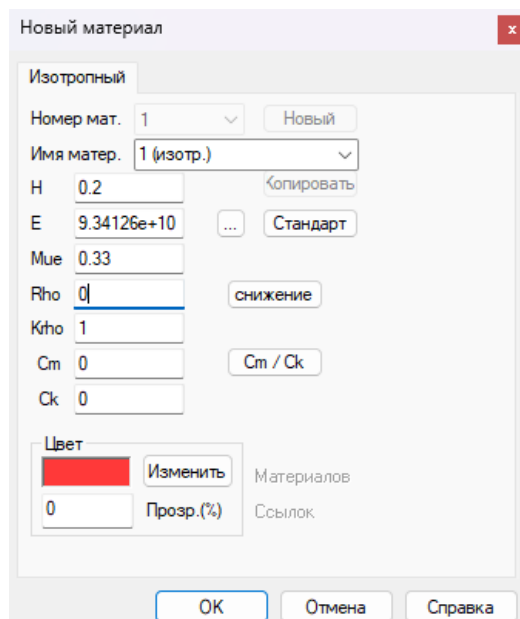
Создаем новый проект.



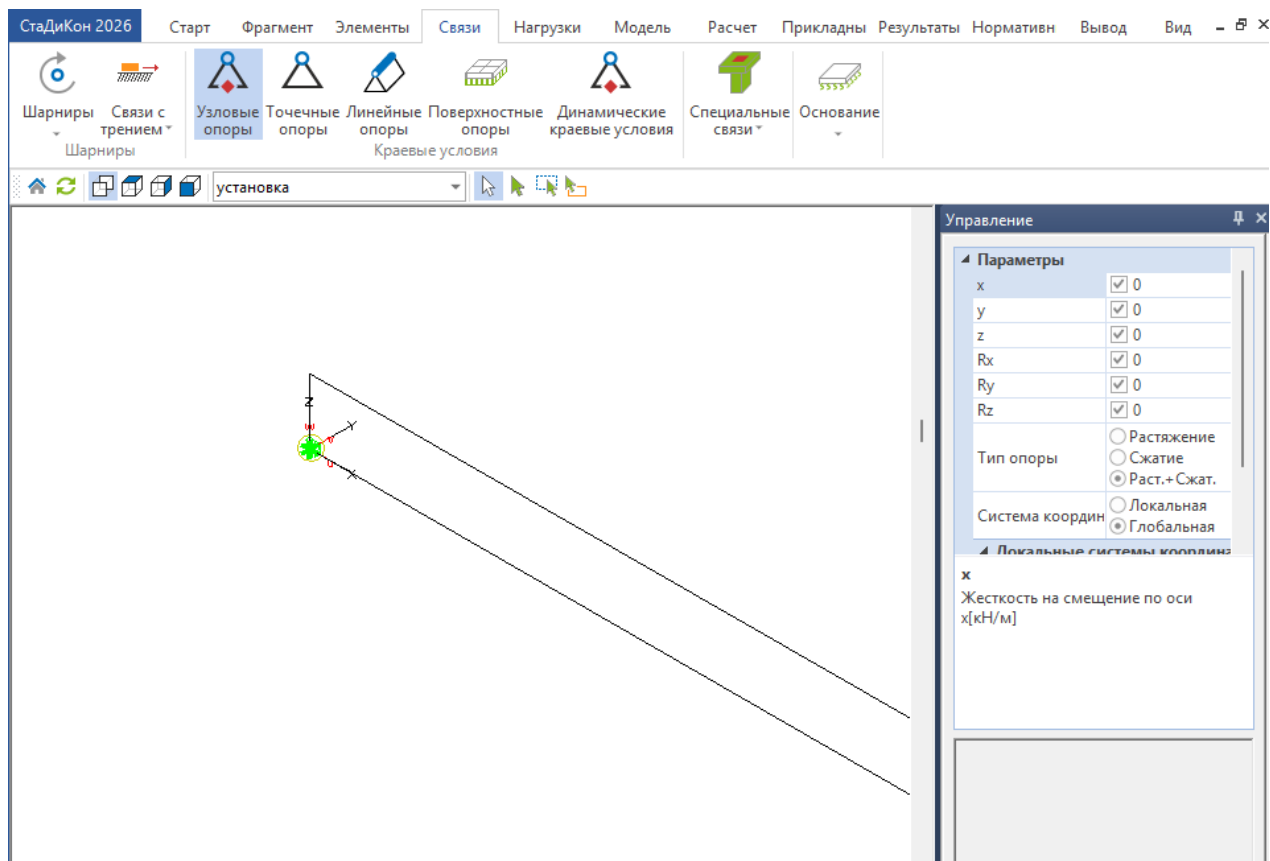
Оболочечными элементами создаем следующую геометрию. Размеры пишем в мм, позже отмасштабируем.



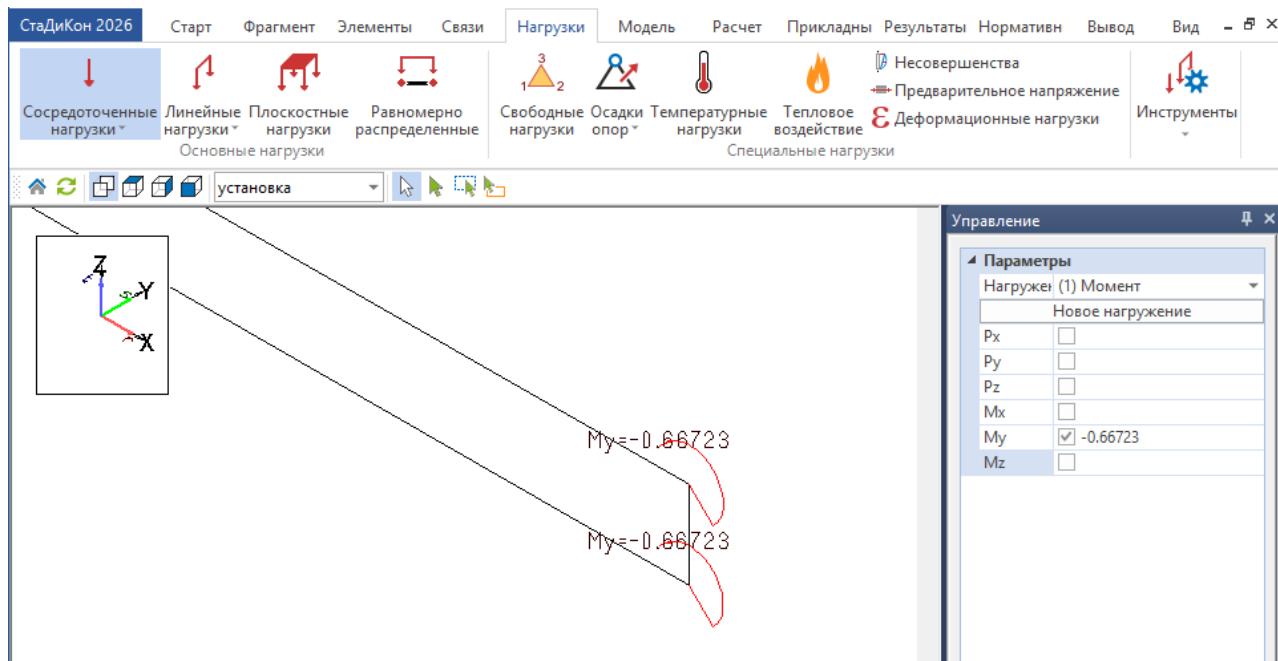
Создаем и назначаем материал.



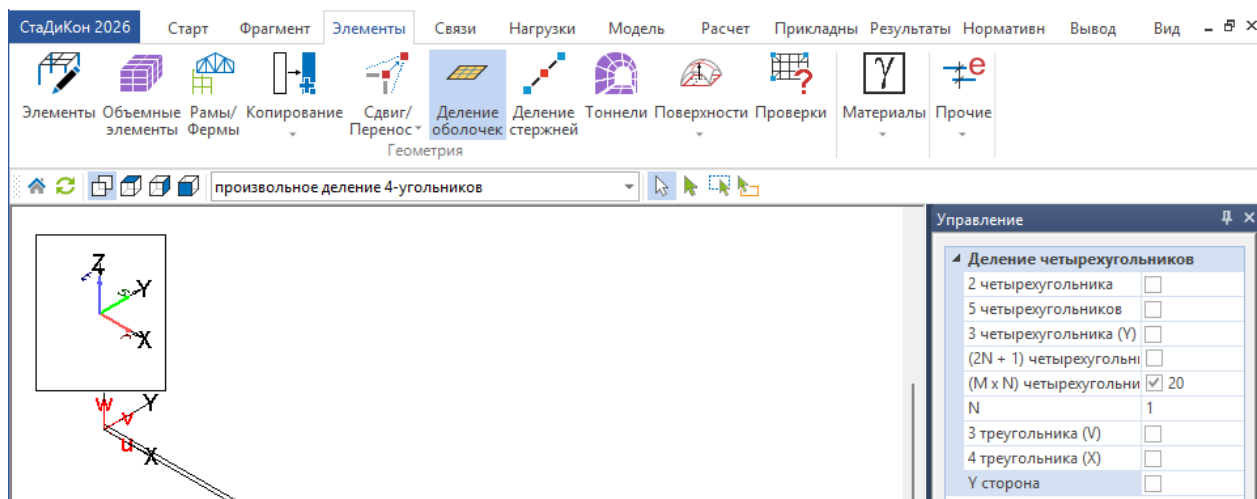
Устанавливаем жесткую заделку в узел с координатами (0,0,0).



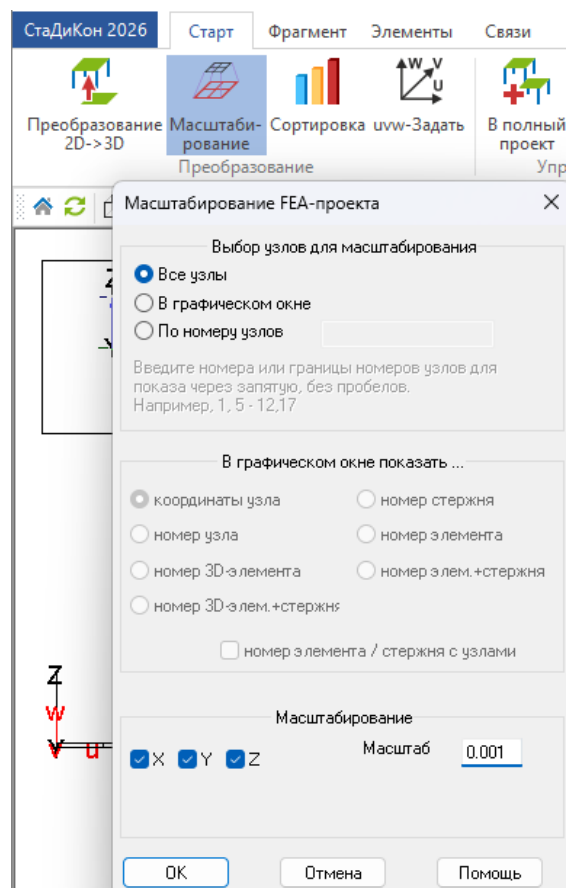
Задаем следующую узловую нагрузку на противоположном конце.



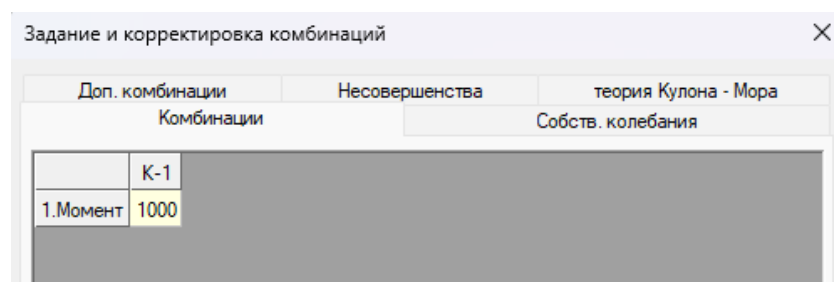
Задаем следующее деление оболочек.



На вкладке «Старт» выбираем «Масштабирование» и возвращаем размеры в метрах.



Создадим следующую комбинацию нагрузок.



Устанавливаем следующие параметры расчета. Параметры, которые свернуты, установлены по умолчанию.

Параметры расчета

Тип расчёта: Статический расчёт

- Параметры расчета
 - Основные параметры
 - Вид нелинейности**
 - Дополнительно
 - Алгоритм расчета
 - Вывод результатов

Конструктивные	
Физические	
Геометрические	
Теория II порядка	☒
Отрицательные диагональные элементы	☒
Нелинейные деформации	☒
Конечные вращения	☒
Расширенная стержневая теория	☐
Растянутые элементы	☐

Параметры расчета

Тип расчёта: Статический расчёт

- Параметры расчета
 - Основные параметры
 - Вид нелинейности
 - Дополнительно
 - Алгоритм расчета
 - Вывод результатов

Решатель	
Разреженный решатель	☒
С использованием диска	☐
Проверка решения	☐
Количество потоков	6
Метод Ланцоша	☐
Ланцош - размер блока	0
Ланцош - нарезка спектра	☐
Итерации	
Точность	0.01
Количество итераций	1300
Прерывание итераций	☒
Превышение итераций	☒
Итерации на шаг по времени	☐
Дополнительно	
Теплопроводность	

Параметры расчета

Тип расчёта: Статический расчёт

- Параметры расчета
 - Основные параметры
 - Вид нелинейности
 - Дополнительно
 - Алгоритм расчета
 - Вывод результатов

Параметры элемента	
Элементные нагрузки и массы	
Согласованные нагрузки	☐
Согласованные массы	☒
Инерция поворота нормали	☐
Исключить массы по Z	☐
Преобразование модели	
Ограничения	

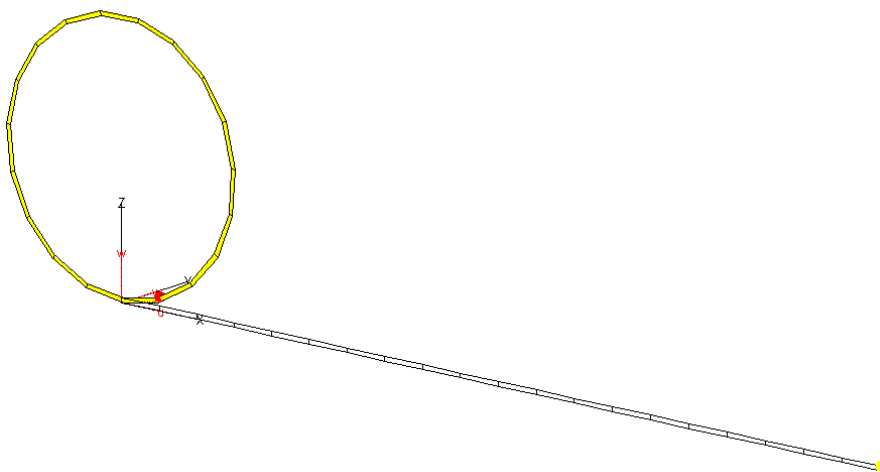
Параметры расчета

Тип расчёта: Статический расчёт

- Параметры расчета
 - Основные параметры
 - Вид нелинейности
 - Дополнительно
 - Алгоритм расчета**
 - Вывод результатов

Алгоритм расчета	
Инкрементно-итеративный метод решения	☐
Количество шагов приращений нагрузки	1000
Начальное приближение	По линейной теории

После расчета получаем следующий результат.



Управление

- Параметры
 - Степень свободы: Dsum
 - № комбинации: 1
 - CNC-комбинации
 - Вид: Закраска
 - Масштаб: 1
- Вывод рисунка
 - Показ шкалы: ☒ Горизонтально ☐ Вертикально
 - Тип вывода: ☒ Вывод во Viewer ☐ Вывод в Word
- Настройки вывода
 - Вывод

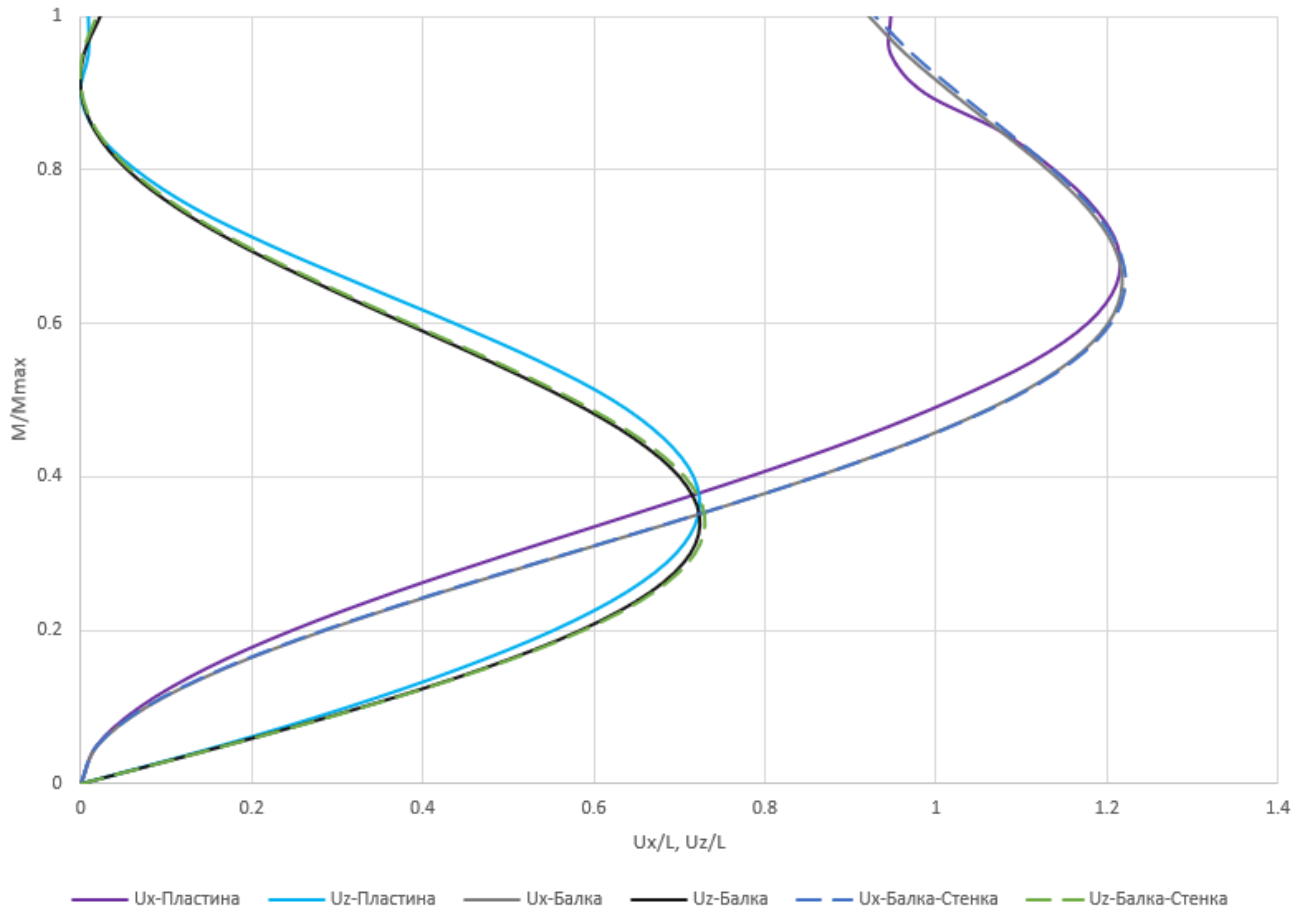
Вид

Вид показа результатов

Max.перенесение = 949.75668 mm в узле = 3

6. Обсуждение различных подходов

По результатам вычисленных перемещений были построены следующие графики. Для их построения каждая расчетная схема была пересчитана с 20-ю комбинациями для большего числа точек графиков.



Полученные решения согласуются с аналитическим решением, приведенным в работе J. Argyris, M. Haase, H.-P. Mlejnek, and P. K. Schmolz. TRUNC for Shells - An Element Possibly to the Taste of Bruce Irons. Int. J. Num. Meth. Eng., 22:93–115, 1986.

Расхождение в решениях с использованием оболочечных элементов (раздел [2]) и стержневых (раздел [3]) обуславливаются коэффициентом Пуассона.