

Знакомство с МКЭ подсистемой

СтадиКон (СДК)

Нелинейная потеря устойчивости цилиндра



Содержание

Содержание	2
1. Описание задачи	3
2. Тело вращения	4
2.1. Создание цилиндра.....	5
2.2. Задание нагрузок.....	9
2.3. Проверочный статический расчет.....	23
2.4. Расчет на устойчивость	24
2.5. Нелинейный расчет	27

1. Описание задачи

В этом примере представлен анализ потери устойчивости по Эйлеру и нелинейный анализ потери устойчивости оболочечной конструкции. Конструкция представляет собой цельный цилиндр. Цилиндр полностью закреплён по нижнему краю. Он нагружен переменной осевой распределённой нагрузкой qz по верхнему краю.

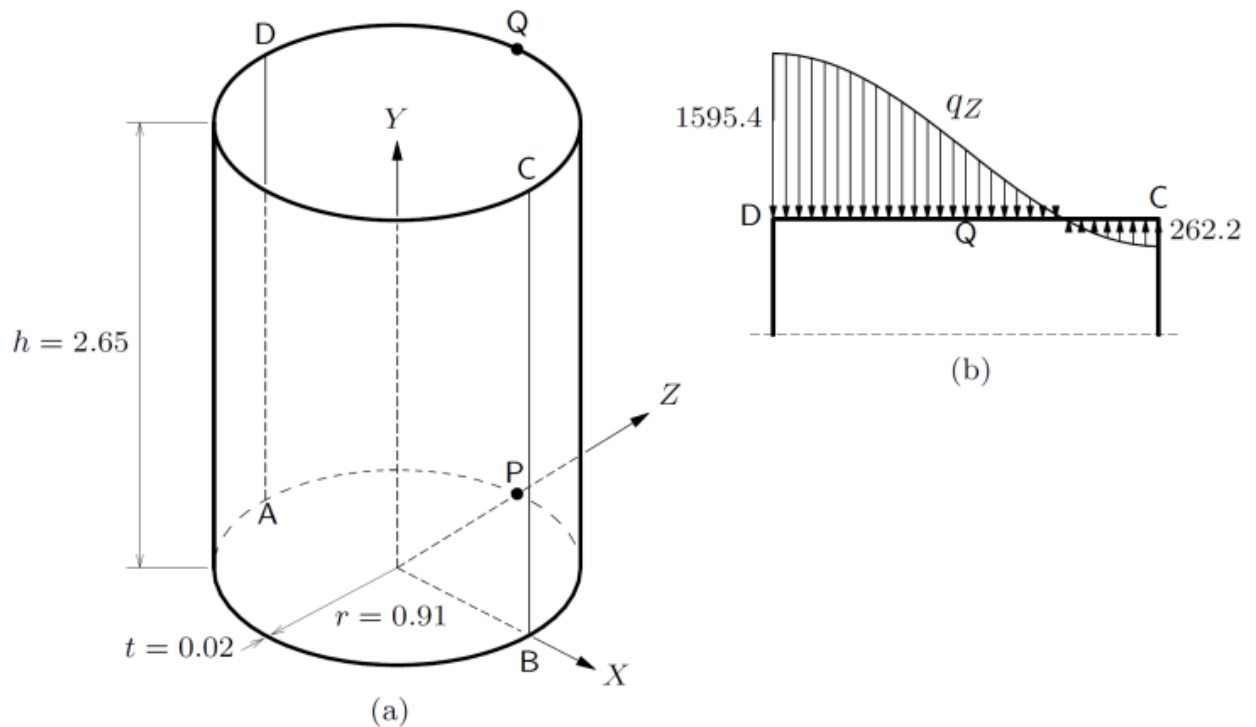


Рис. 1.1 – (a) Идеализированная модель [м], (b) Нагружение [Н]

Геометрические характеристики:

- высота $h = 2.65$ м
- радиус $r = 0.91$ м
- толщина $t = 0.02$ м

Свойства материала:

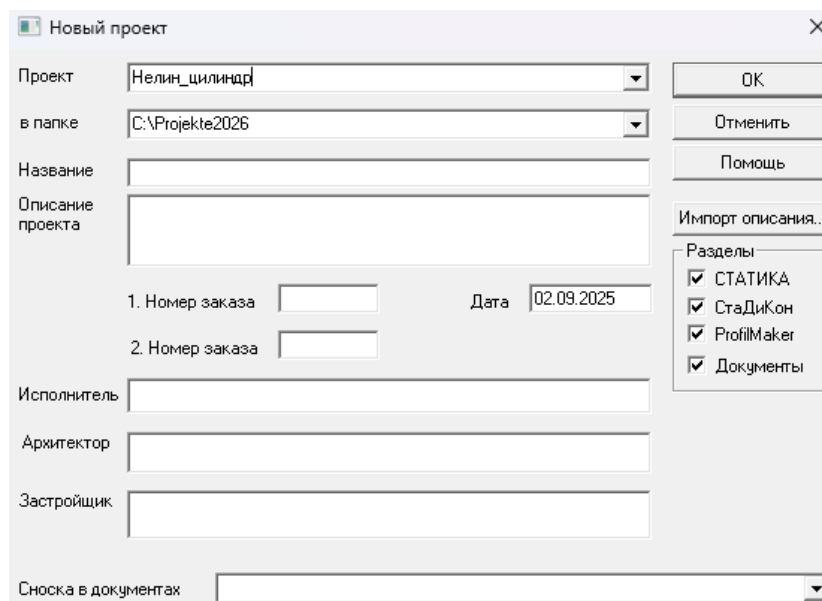
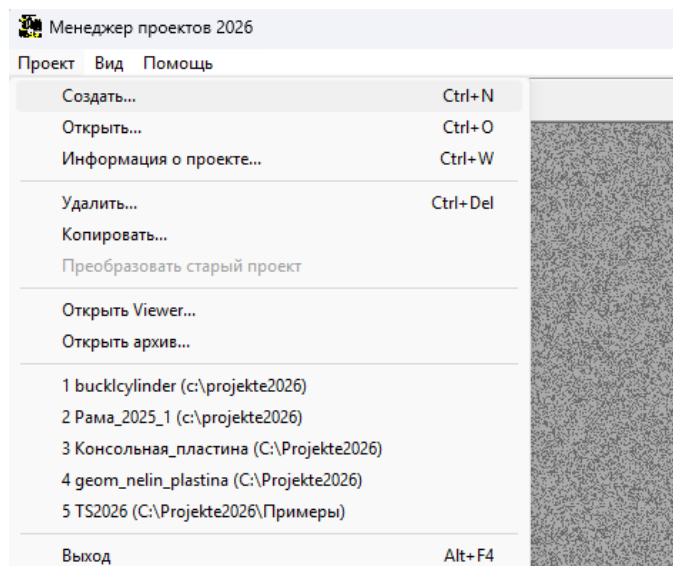
- модуль упругости $E = 2.1 \times 10^5$ кН/м²
- коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$

Нагружение:

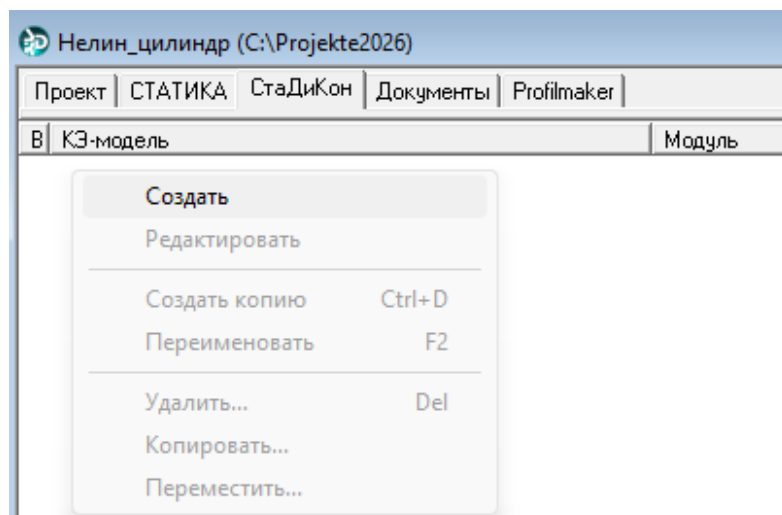
- значение нагрузки в точке D = 1.5954 кН
- значение нагрузки в точке C = 0.2622 кН

2. Тело вращения

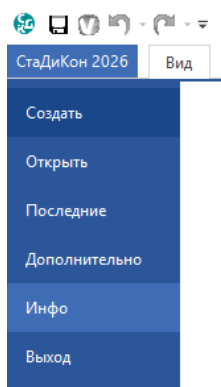
Создаем новый проект.



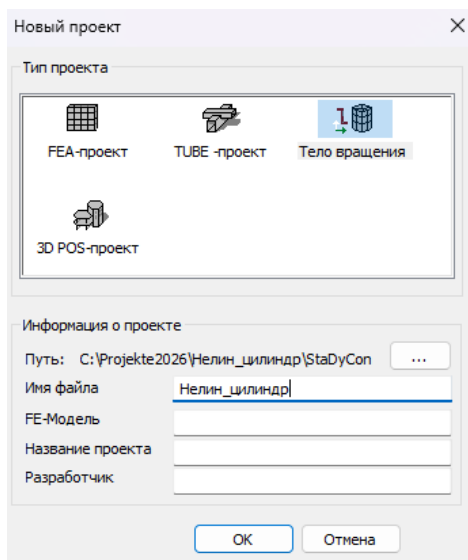
Во вкладке «СтаДиКон» нажимаем ПКМ в пустом окне и создаем новую КЭ модель.



Переходим в дерево проекта и выбираем «Создать».



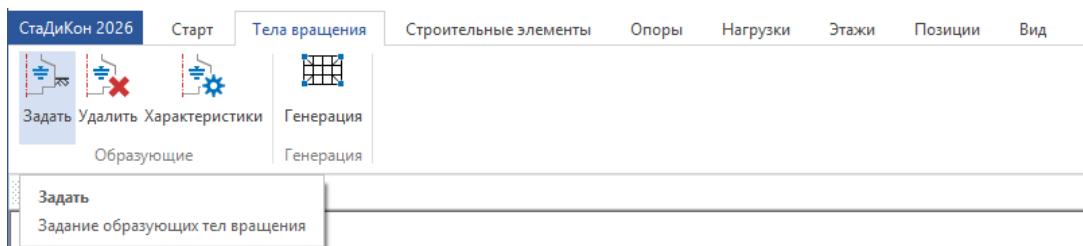
Выбираем тип проекта «Тело вращения».



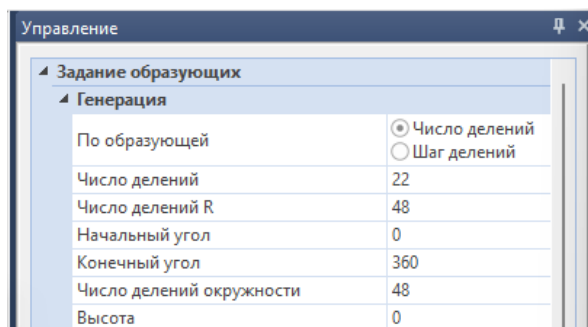
2.1. Создание цилиндра

Создадим цилиндр воспользовавшись образующей тела вращения.

Переходим на вкладку «Тела вращения» и выбираем «Задать».



В окне «Управление» - вкладка «Генерация» задаем следующие параметры сетки.



Во вкладке «Материал» вводим параметры материала.

Материал	
Модуль упругости E	210000
Коэффициент Пуассона	0.3
Плотность плиты Rho	0
Коэффициент Drill	100
Толщина	0.02

Во вкладке «Краевые условия» установим жесткое защемление на нижней грани. Для этого ставим галочку и нажав на «...» устанавливаем краевые условия.

Краевые условия	
Вдоль образующей	☐ ...
Верхний конец образующей	☐ ...
Нижний конец образующей	☒ ...

Краевые условия 'внизу' образующей

Направление осей

☒ Ось t вертикально

☐ Ось t вдоль образующей

	Жесткость [кН/м]		Жесткость [кН*м/рад]
☒ r	0	☒ Rr	0
☒ s	0	☒ Rs	0
☒ t	0	☒ Rt	0

Генерировать: Только для конца образующей

OK Отменить

Нагрузку будем задавать позже, здесь все остальное оставляем по умолчанию.

Далее нажимаем на пустое окошко в правом нижнем углу и вводим координаты первой точки образующей.

Координаты

X 0.91

Y 0

Z 0

OK Отмена >>

Координаты

Снова жмем на это окошко задаем координаты второй точки.

Координаты

X 0.91

Y 2.65

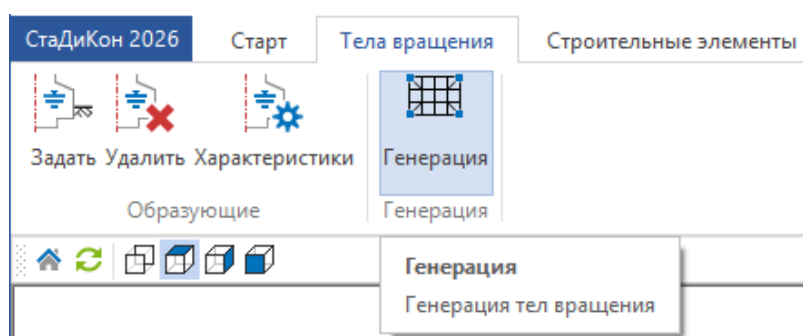
Z 0

OK Отмена >>

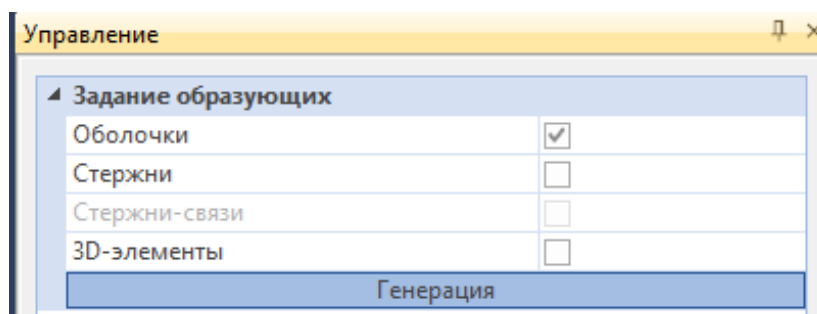
Получаем следующую образующую.



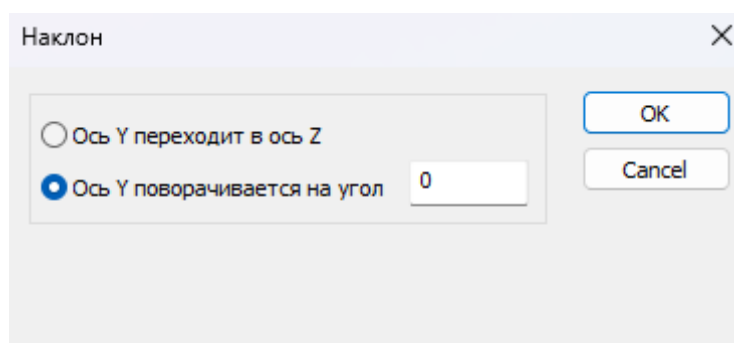
Далее выбираем «Генерация»



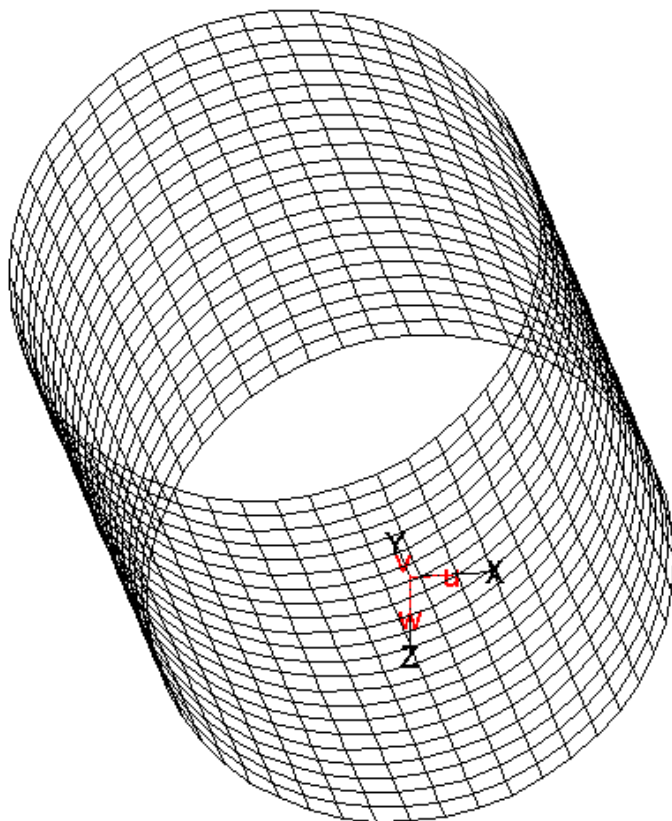
И оставляем только оболочки. После нажимаем «Генерация».



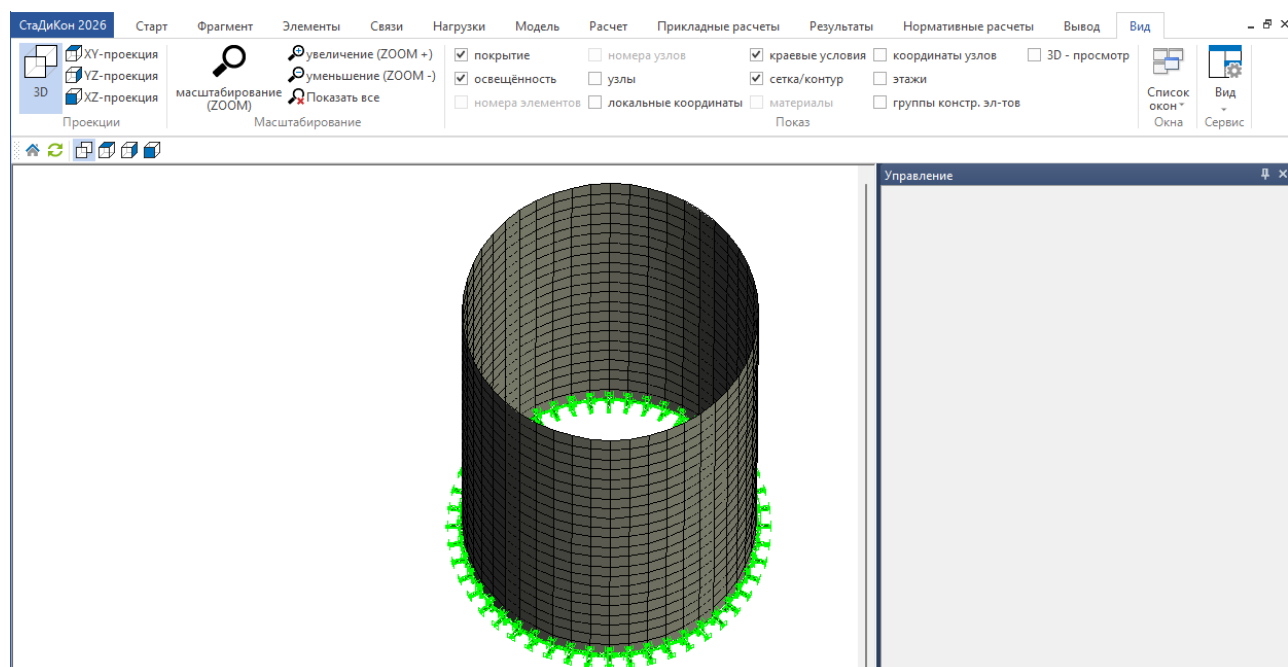
Отключаем поворот оси Y.



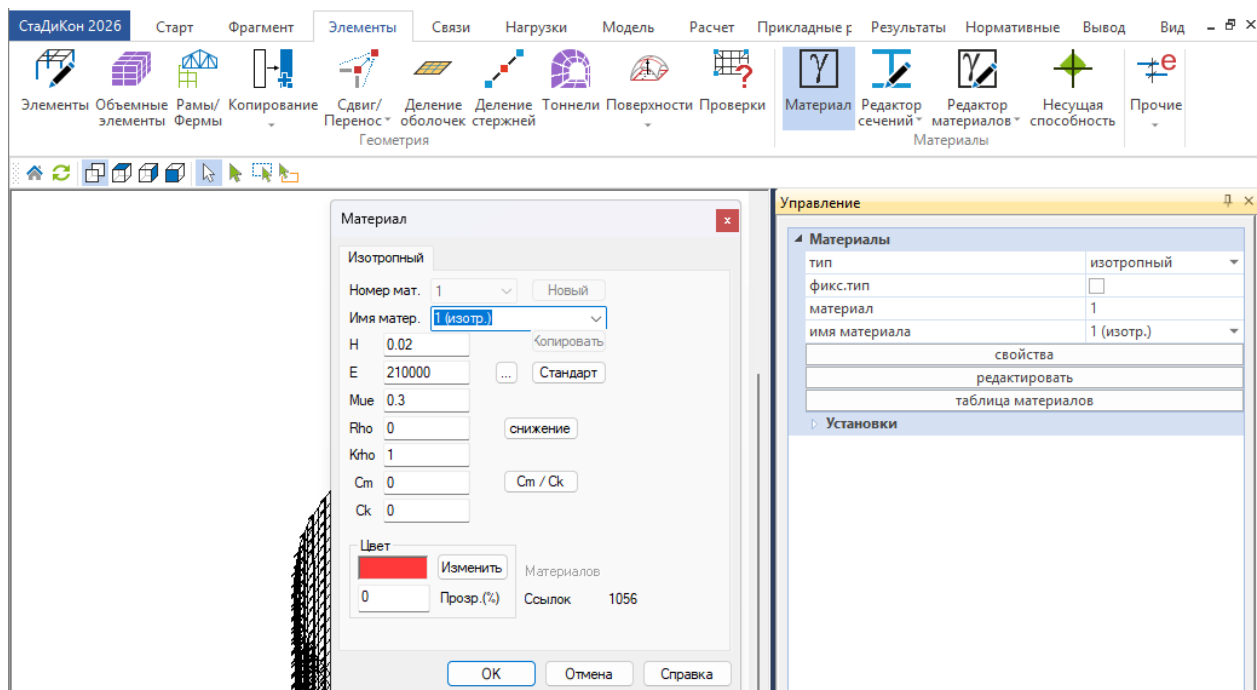
И сохранив FEA-модель, получаем следующий цилиндр.



Во вкладке «Вид» проверим назначение краевых условий, а также можно включить отображение покрытия и освещенности для удобства восприятия.

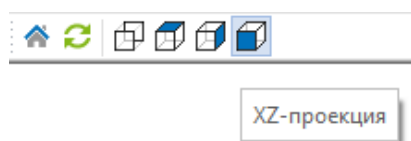


На вкладке «Элементы» - «Материал» можно проверить заданные параметры материала.

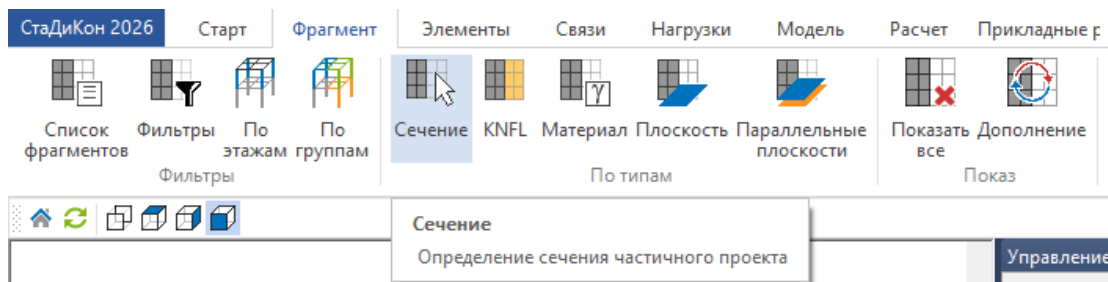


2.2. Задание нагрузок

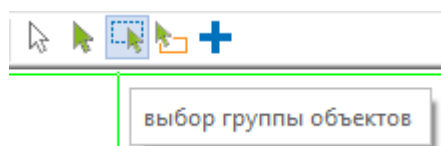
Перейдем к проекции XZ.



Во вкладке «Фрагмент» выбираем «Сечение».

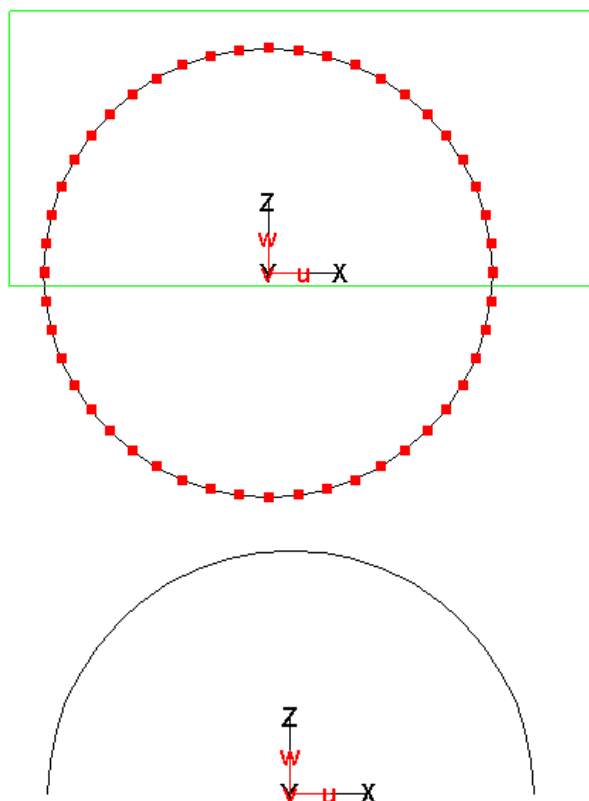


Включаем выбор группы объектов.

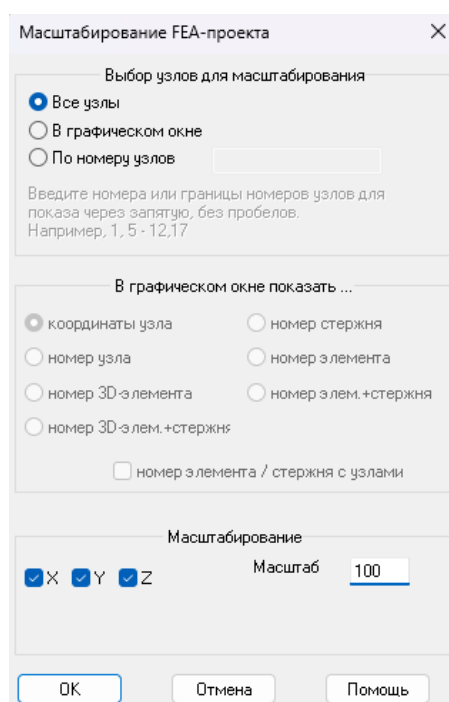
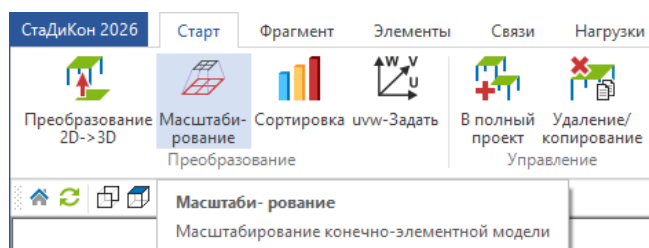


Для удобства можно включить отображение узлов во вкладке «Вид».

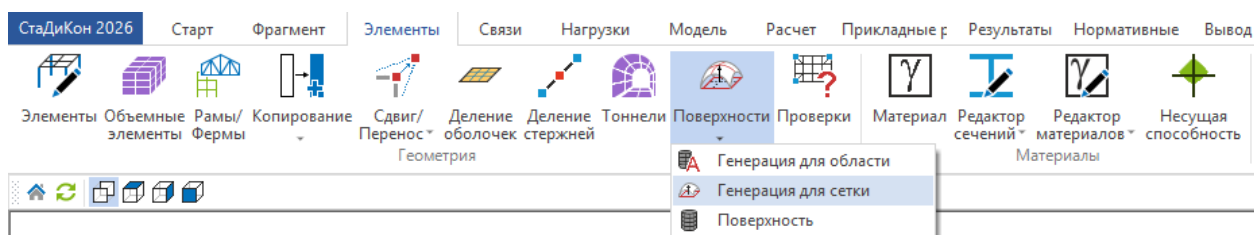
И выбираем верхнюю половинку.



Далее во вкладке «Старт» выбираем «Масштабирование».



На вкладке «Элементы» выбираем «Поверхности» - «Генерация для сетки».



Поверхность

$u(x, y)$ 1

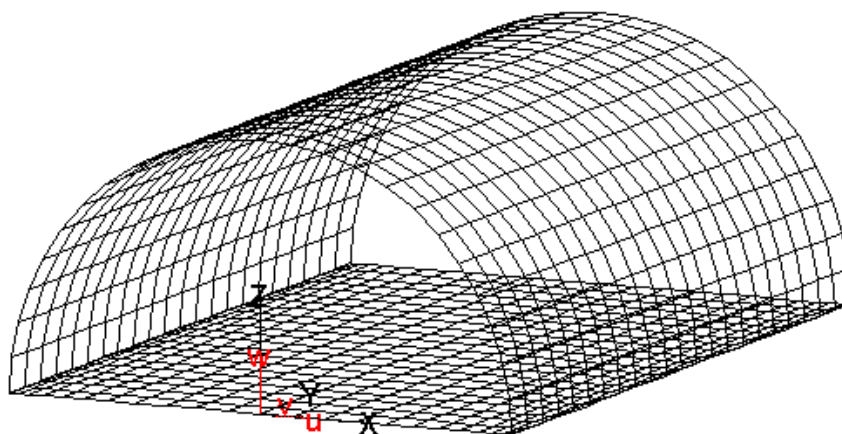
$v(x, y)$ 1

$z = f(u, v, x, y)$ 0

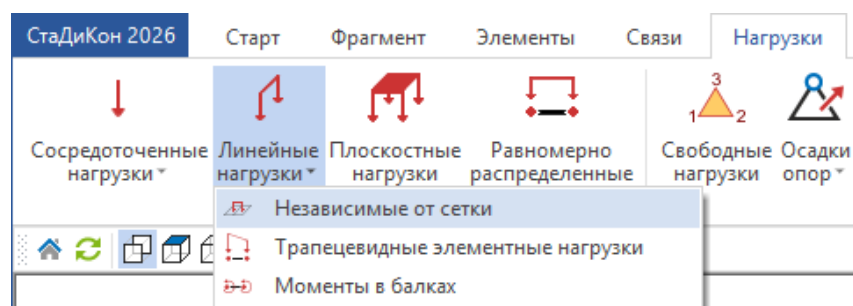
☐ Замена

☒ Добавление

OK Отмена



Переходим на вкладку «Нагрузки» - «Линейные нагрузки» - «Независимые от сетки».



Создаем новое нагружение.

Новое нагружение

Номер 2

Имя Линейная нагрузка

Тип воздействия Собственный вес ж/б конструкций

OK Отмена Помощь

Ставим галочку «Установить плоскость»

Управление

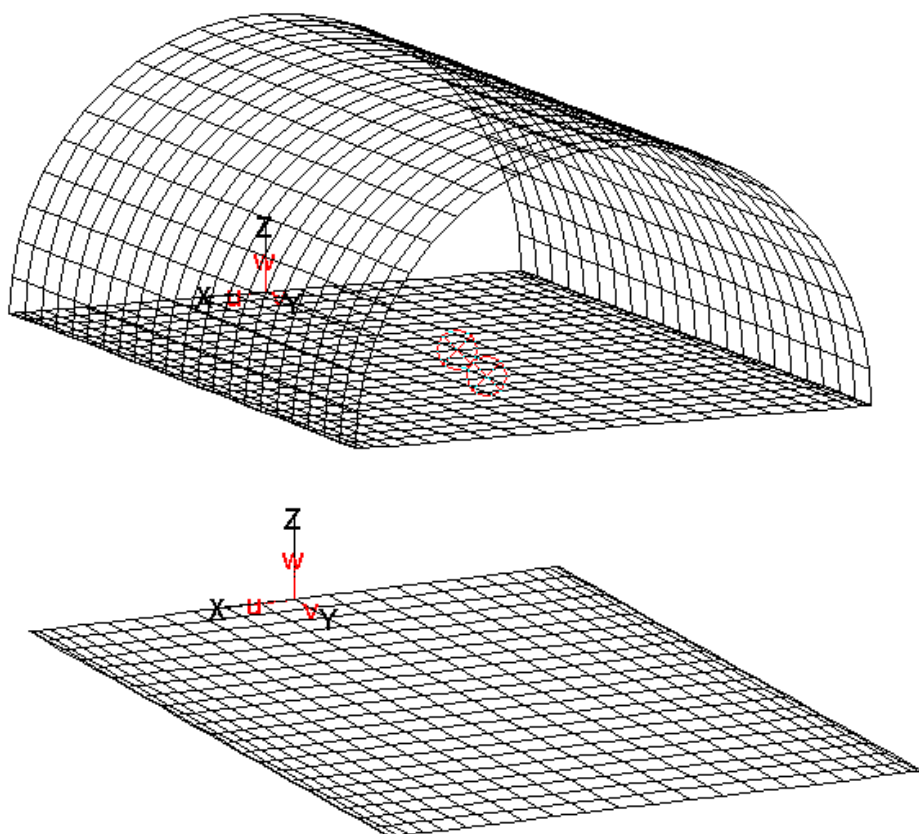
Параметры

Нагружение (2) Линейная нагрузка

Новое нагружение

P_x	☐
P_y	☒ 0
P_z	☐
M_x	☐
M_y	☐
M_z	☐
Система координат	☐ Локальная ☒ Глобальная ☐ Элементная
Проекция	☐
Установ. пл-ть	☒
Шкала	☐ не показывать ☐ Установить плоскость
Интервалы	8

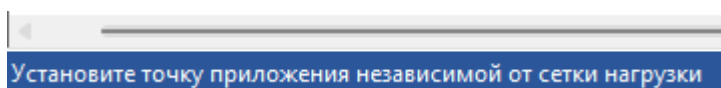
И выбираем три узла на плоскости.



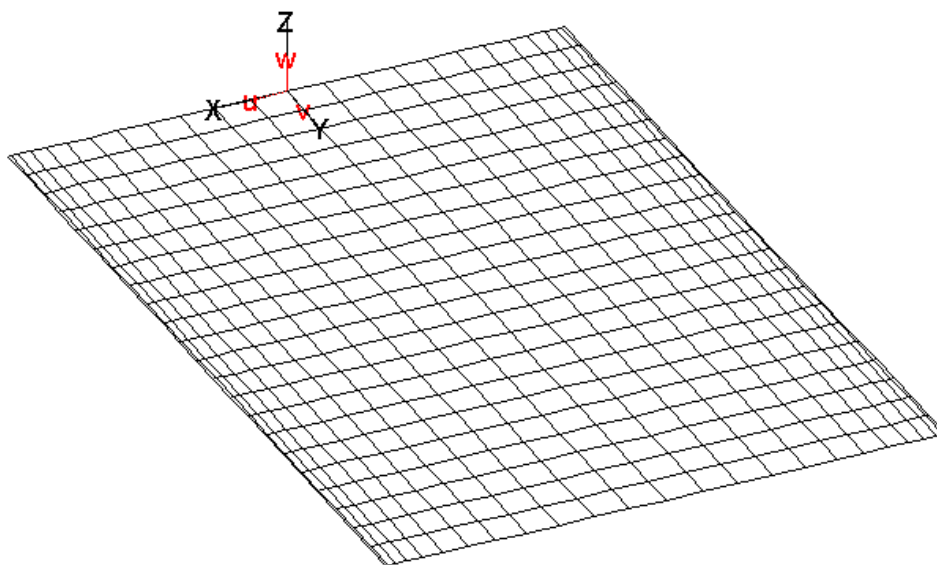
Чтобы нагрузка не округлялась, вписываем значения в [Н], а позже переведем обратно.

Параметры	
Нагружение	(2) Линейная нагрузка
Новое нагружение	
Px	☐
Py	☒ -1595.4
Pz	☐
Mx	☐
My	☐
Mz	☐
Система коорд	☐ Локальная ☒ Глобальная ☐ Элементная

В левом нижнем углу указываются подсказки по действиям



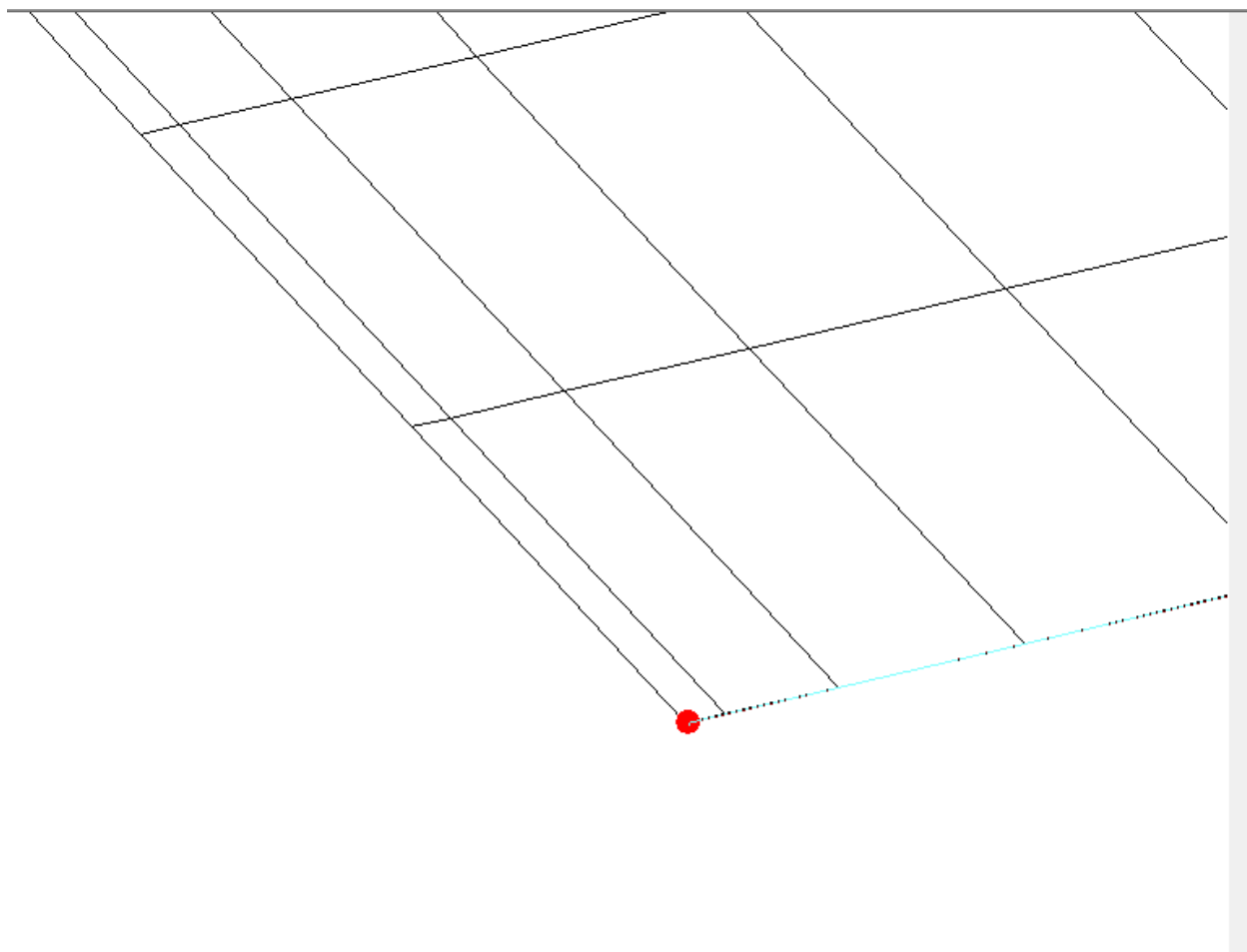
Обращайте внимание на какие стороны задаете нагрузку. Если расположить в следующей ориентации, то выбираем правый нижний узел.



После меняем значение нагрузки

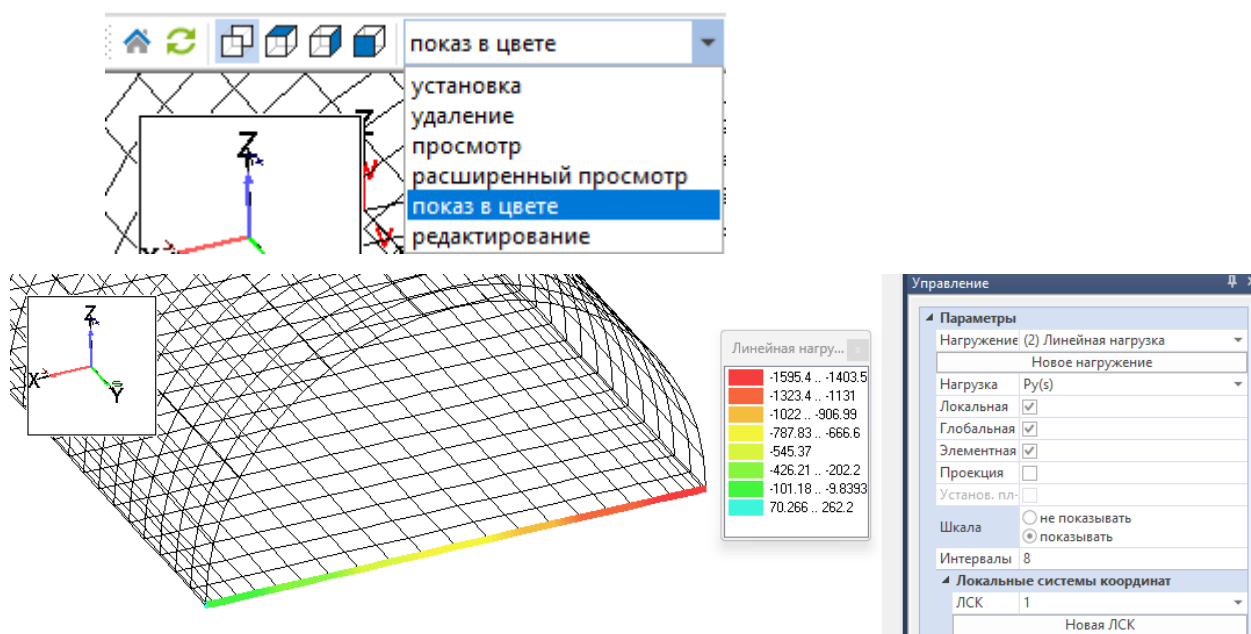
Параметры	
Нагружение	(2) Линейная нагрузка
Новое нагружение	
Px	☐
Py	☒ 262.2
Pz	☐
Mx	☐
My	☐
Mz	☐
Система коорд	☐ Локальная ☒ Глобальная ☐ Элементная

И выбираем левый нижний узел

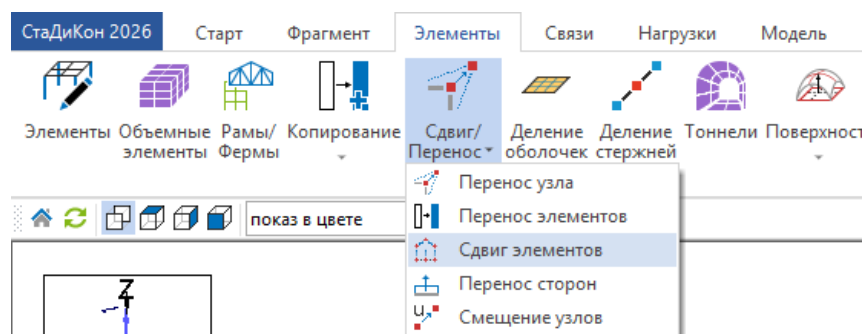


И еще раз нажимаем на этот же узел для завершения операции.

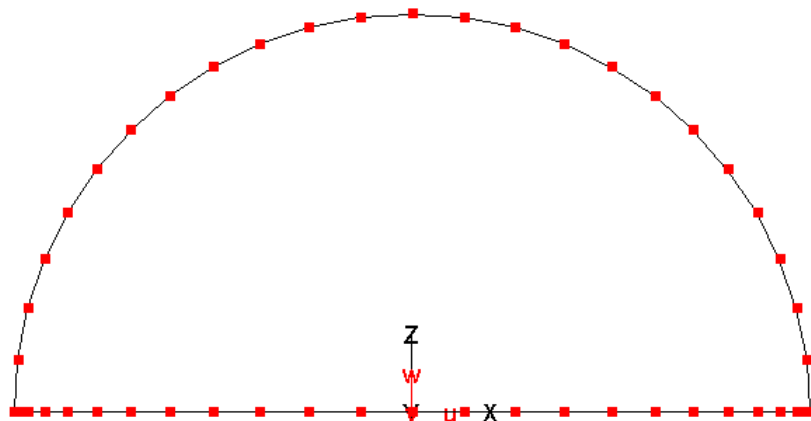
Проверим нагрузку, выбрав показ в цвете.



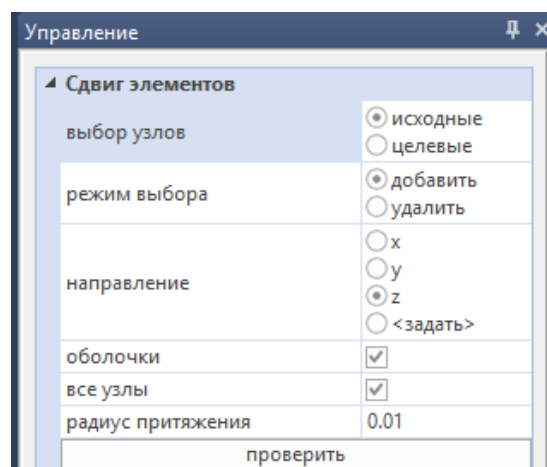
На вкладке «Элементы» выбираем «Сдвиг/Перенос» - «Сдвиг элементов».



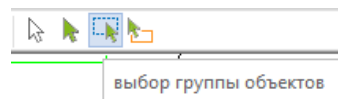
Для удобства включаем проекцию XZ и показ узлов.



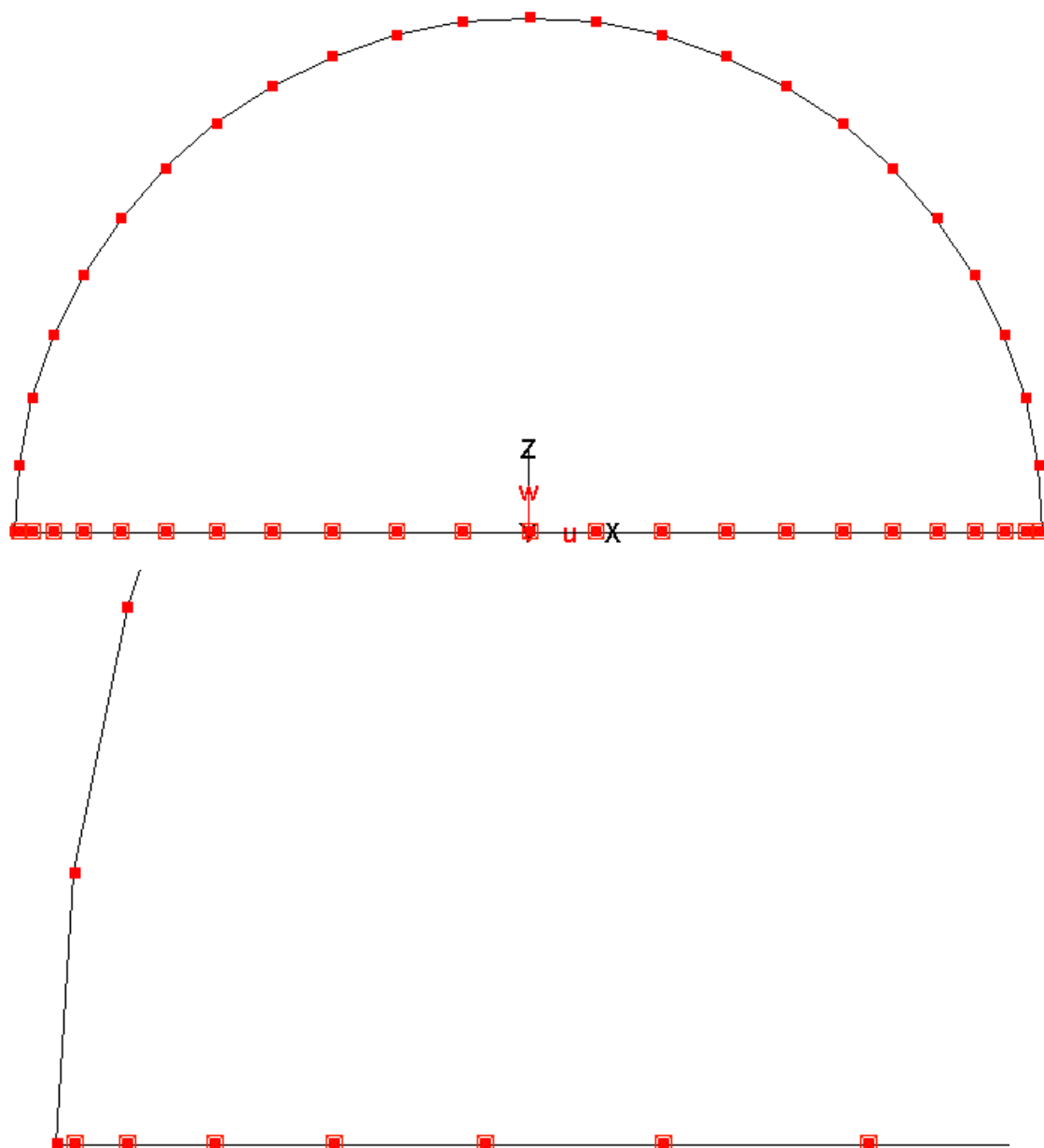
Сначала выбираем исходные узлы.



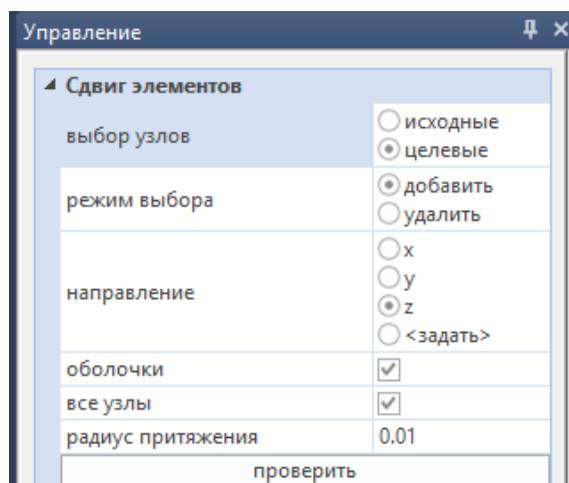
Используем выбор группы объектов, чтобы захватить и все узлы позади.



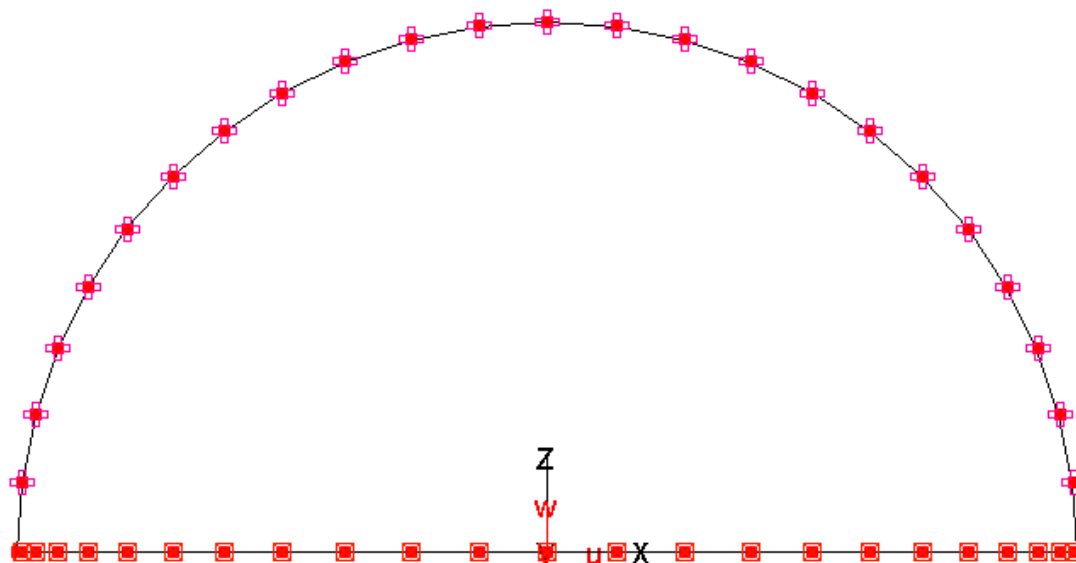
Выбранные узлы отмечаются дополнительной квадратной обводкой. Выбираем все узлы нижней плоскости, кроме угловых.



Далее переключаем на выбор целевых узлов.



И выбираем также групповым выделением все узлы выше плоскости.

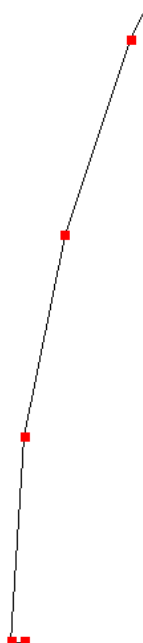


Нажимаем «проверить» и после «выполнить сдвиг»

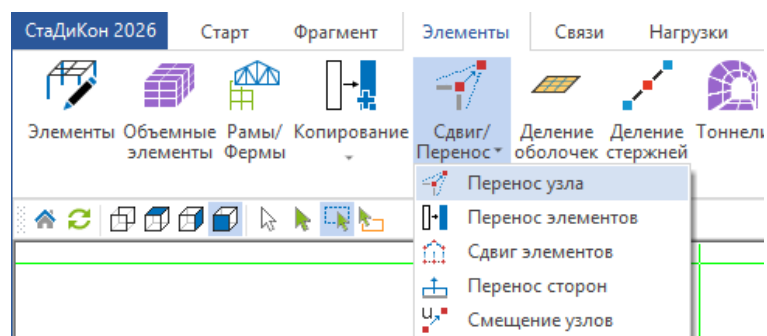
Сдвиг элементов	
выбор узлов	☐ исходные ☒ целевые
режим выбора	☒ добавить ☐ удалить
направление	☐ x ☐ y ☒ z ☐ <задать>
оболочки	☒
все узлы	☒
радиус притяжения	0.01
проверить	

Сдвиг элементов	
выбор узлов	☐ исходные ☒ целевые
режим выбора	☒ добавить ☐ удалить
направление	☐ x ☐ y ☒ z ☐ <задать>
оболочки	☒
все узлы	☒
радиус притяжения	0.01
выполнить сдвиг	

Ближайшие к крайним узлы могли не перенестись из-за малого расстояния. Перенесем их отдельно вручную.



Выбираем «Перенос узла».

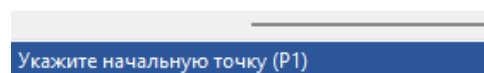


И групповым выбором выделяем данные узлы с обеих сторон.

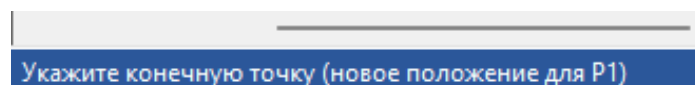


После выбора нажимаем ПКМ.

Далее указываем начальную точку.

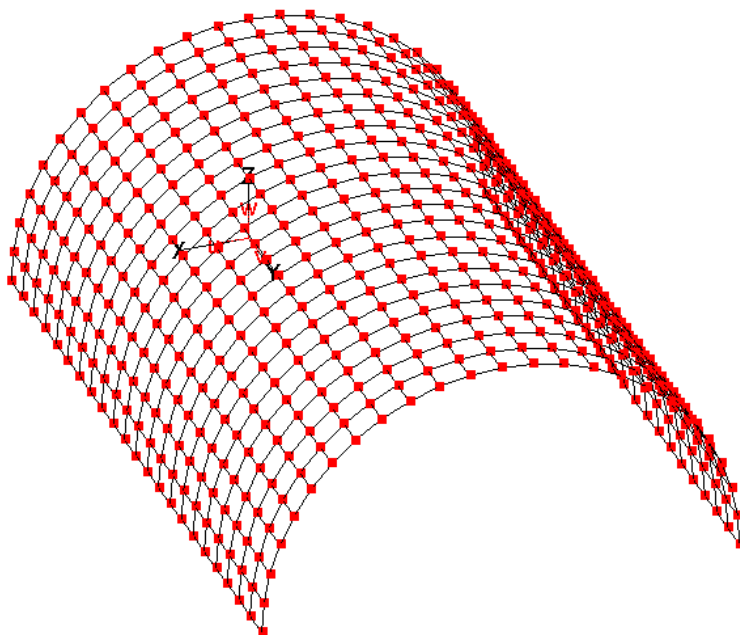


И после конечную точку.

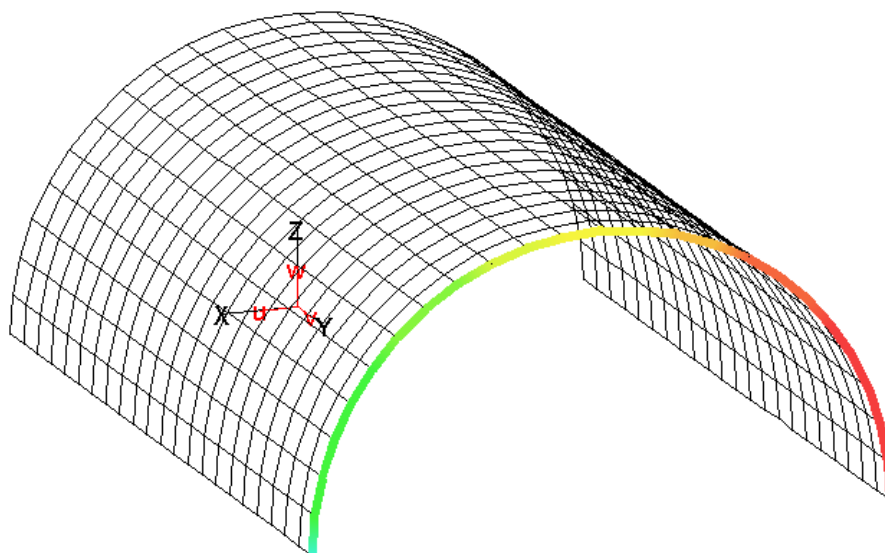


В качестве конечной выбираем узел, находящийся над выбранным узлом на скриншоте выше.

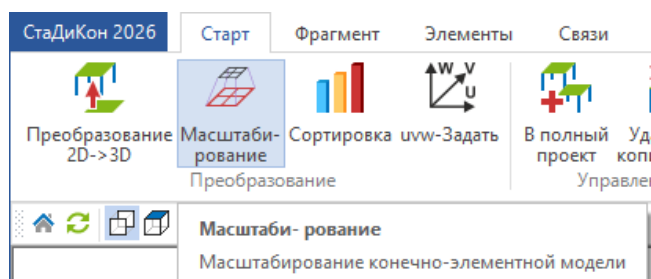
Получаем такой результат.



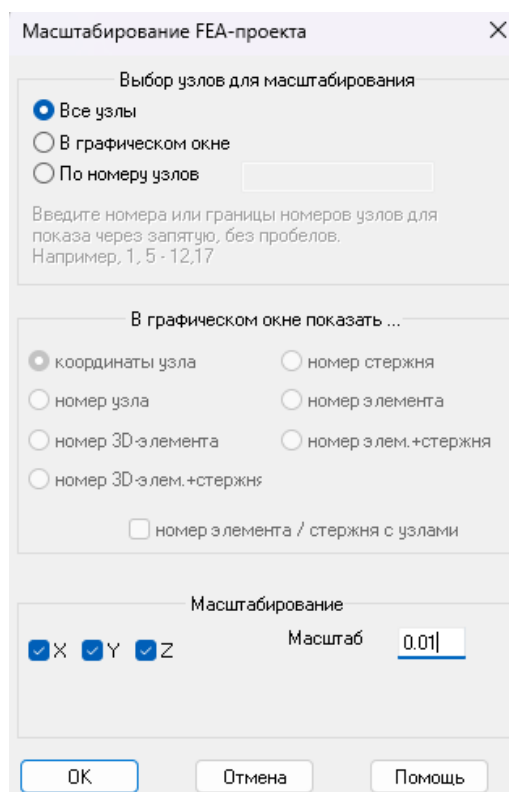
И проверяем нагрузку.



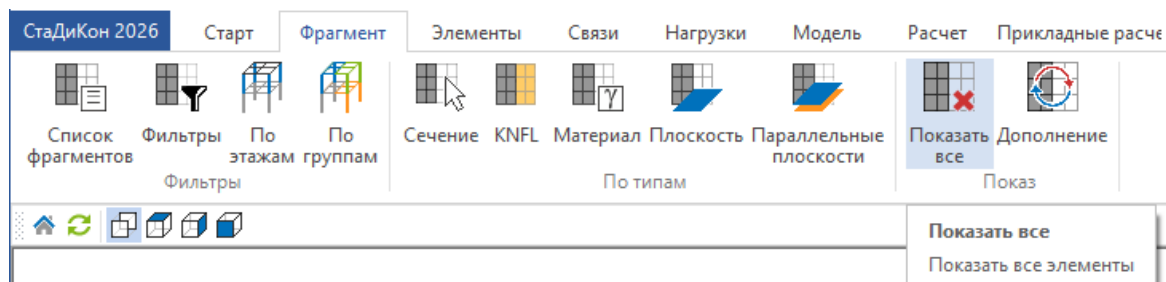
Возвращаемся к масштабированию.



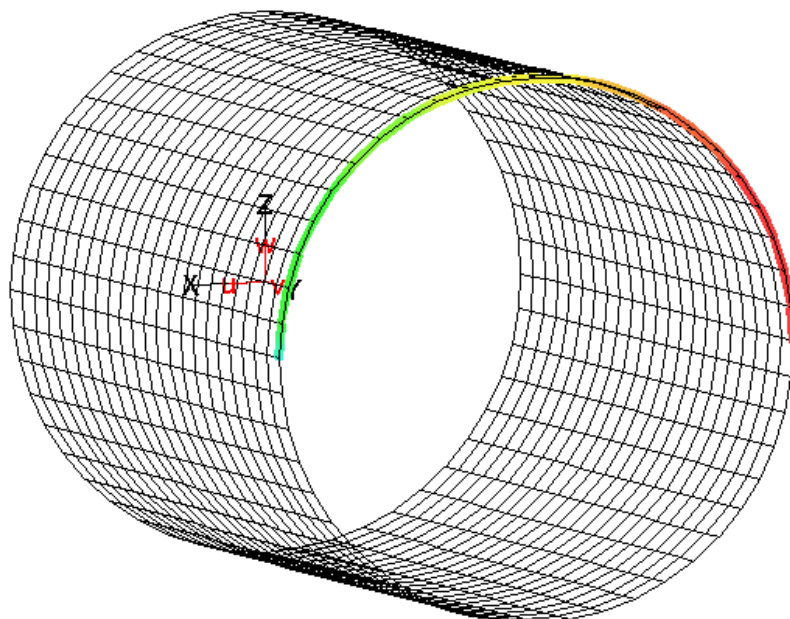
И устанавливаем исходный масштаб.



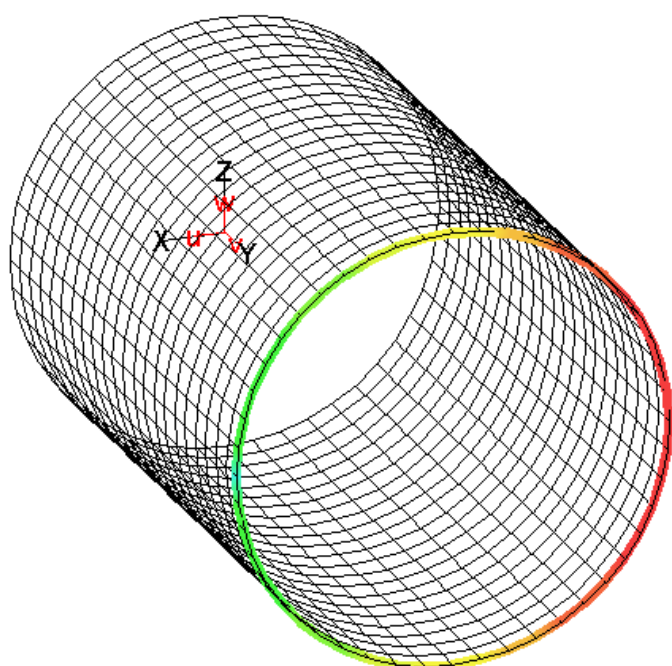
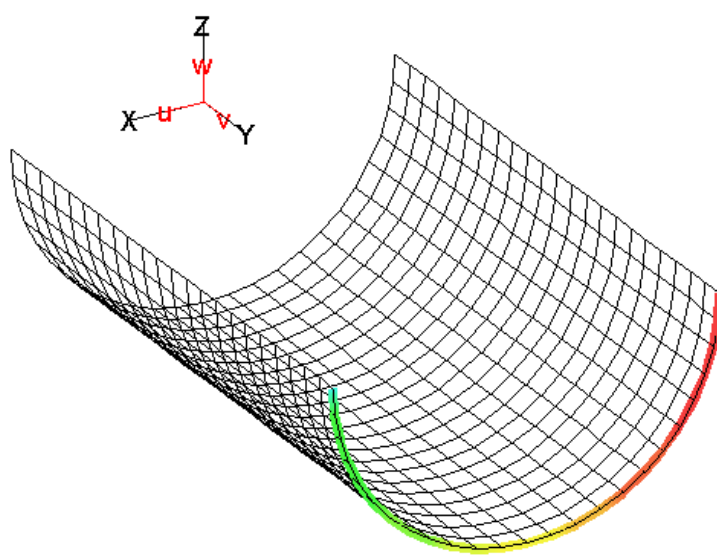
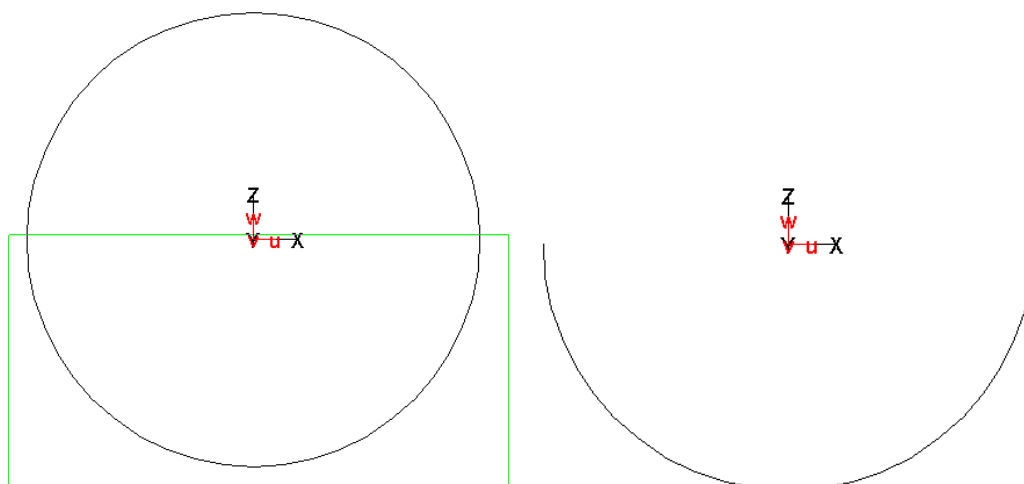
Во вкладке «Фрагмент» выбираем «Показать все».



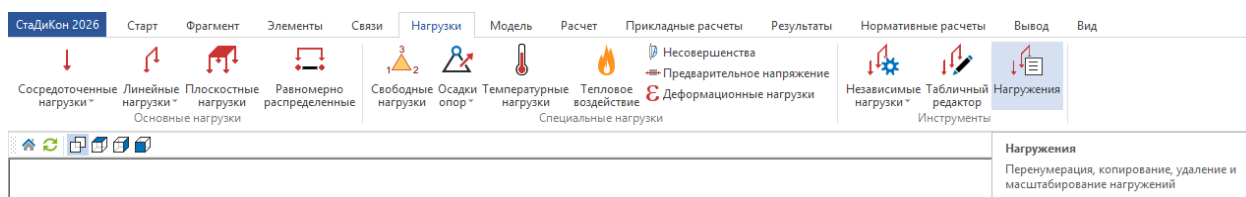
Получаем готовую половину цилиндра.



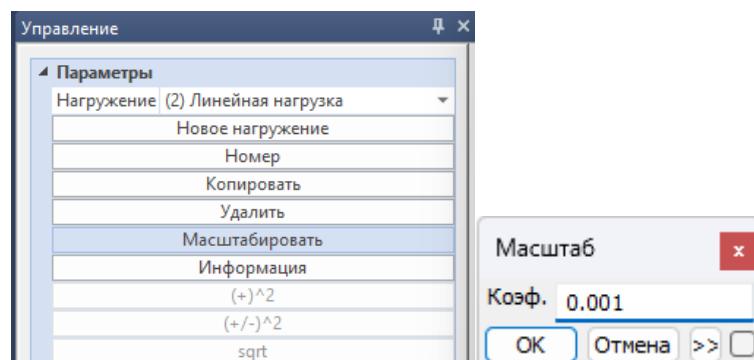
После повторяем все вышеуказанные действия для нижней части цилиндра. Нагрузку добавляем в уже созданное нагружение «(2) Линейная нагрузка».



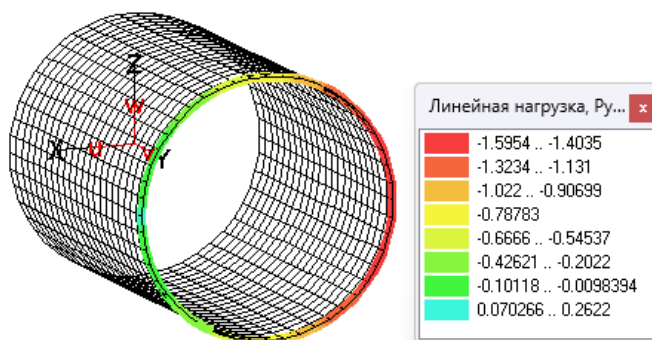
Переходим на вкладку «Нагрузки» и выбираем «Нагружения».



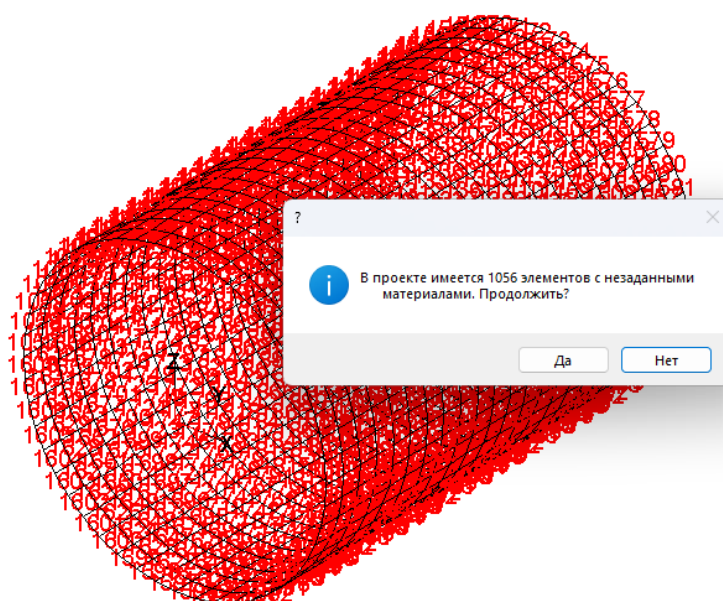
Выбираем «Масштабировать».



Таким образом, мы перевели нагрузку в [кН].

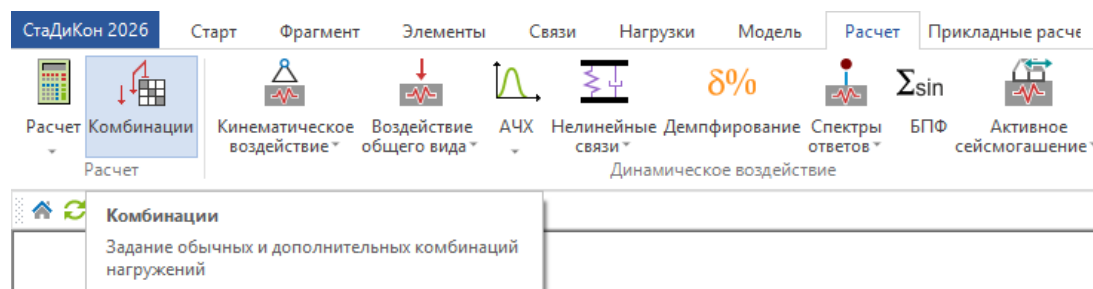


Сохраняем проект, не обращая внимания на предупреждение о незадаанных материалах. Так как эти элементы без материала мы использовали только для нагружения и в расчете они участвовать не будут.

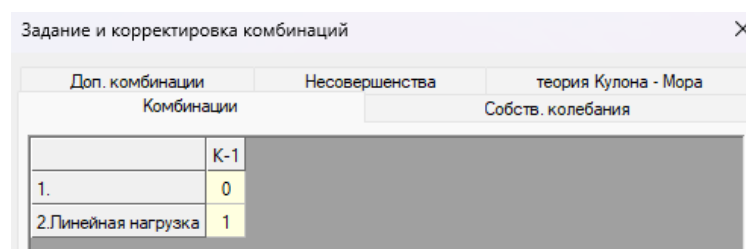


2.3. Проверочный статический расчет

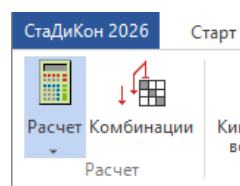
Во вкладке «Расчет» выбираем «Комбинации»



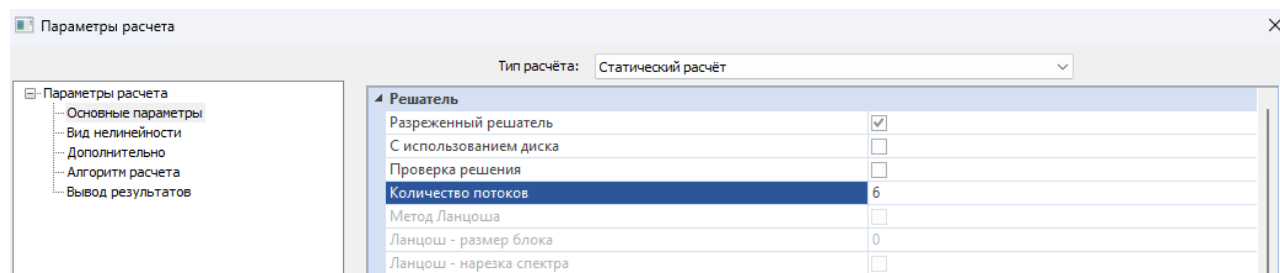
Убираем воздействие собственного веса, оставив только наше нагружение.



Нажимаем «Расчет».

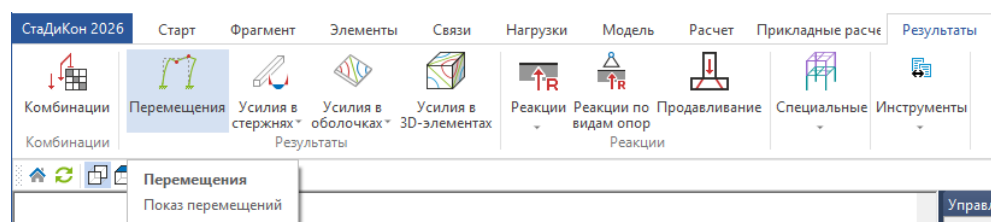


Для ускорения расчета можно увеличить количество потоков, в зависимости от числа ядер вашего процессора.

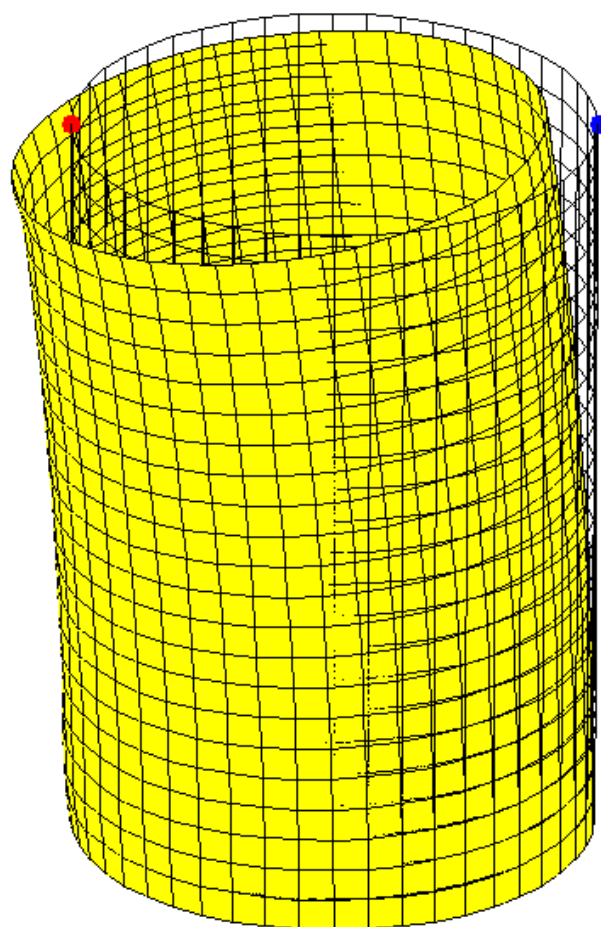


Остальные параметры оставляем по умолчанию и запускаем расчет соответствующей кнопкой.

После завершения расчета переходим на вкладку «Результаты» и выбираем «Перемещения».



Получаем следующие результаты перемещений U_y . Масштаб увеличен до 200 для наглядности перемещений.



Управление	
Параметры	
Степень свободы	U_y
№ комбинации	1
CNC-комбинации	
Вид	Закраска
Масштаб	200
Вывод рисунка	
Показ шкалы	☒ Горизонтально ☐ Вертикально
Тип вывода	☒ Вывод во Viewer ☐ Вывод в Word
Настройки вывода	
Вывод	
Масштаб Масштабный коэффициент для показа перемещений	
Max: Узел=551, $U_y=0.16508$ мм Min: Узел=575, $U_y=-1.00469$ мм	

2.4. Расчет на устойчивость

В параметрах расчета выбираем тип расчета «Устойчивость».

Тип расчёта:	Устойчивость
	Статический расчёт
	Устойчивость
Метод	Нелинейная устойчивость
Метод диска	Собственные колебания
Метод	Собственные колебания с демпфированием
Метод	Собственные колебания деформированной системы
Метод	Собственные колебания деформированной системы с демпфированием
Метод	Спектр матрицы жесткости
Метод	Спектр матрицы жесткости с нелинейностью
Метод	Прогрессирующее обрушение
Метод	Задача идентификации
Метод	Вынужденные колебания

Устанавливаем следующие параметры расчета. Те параметры, что не указаны, остаются по умолчанию.

Параметры расчета

Тип расчёта: Устойчивость

Панель параметров:

- 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	1e-07
Количество итераций	2000
Прерывание итераций	☒
Превышение итераций	☒
Итерации на шаг по времени	☐

Собственные значения

Дополнительно

Теплопроводность

Панель параметров:

- 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	☐

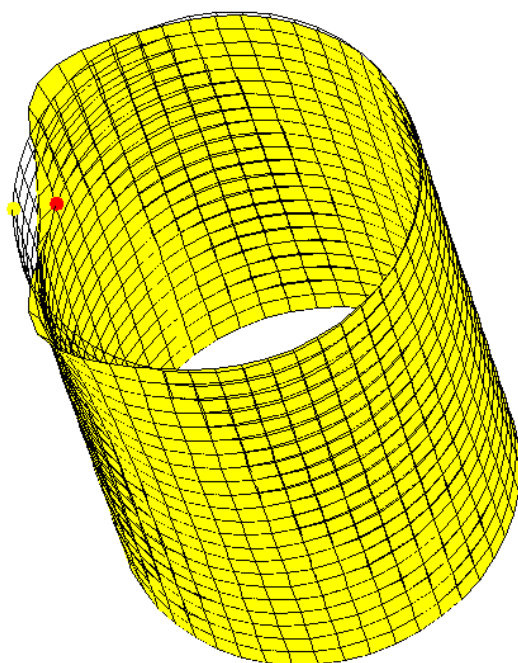
Панель параметров:

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

Алгоритм расчета	
Инкрементно-итеративный метод решения	☐
Количество шагов приращений нагрузки	100
Начальное приближение	По линейной теории

Запускаем на расчет.

Переходим на «Результаты» - «Перемещения». Ниже показаны первые 3 формы потери устойчивости.



Управление

Панель параметров:

- Параметры
- Вывод рисунка
- Настройки вывода
- Вывод

Степень свободы	Dsum
№ комбинации	1
№ формы	1
Вид	Закраска
Масштаб	1

Анимация

Вывод рисунка

Показ шкалы

Тип вывода

Настройки вывода

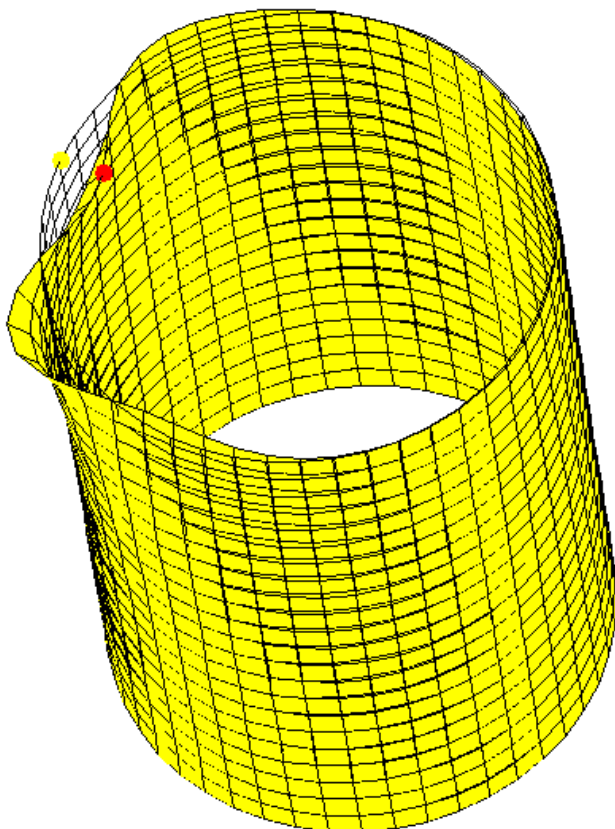
Вывод

№ формы

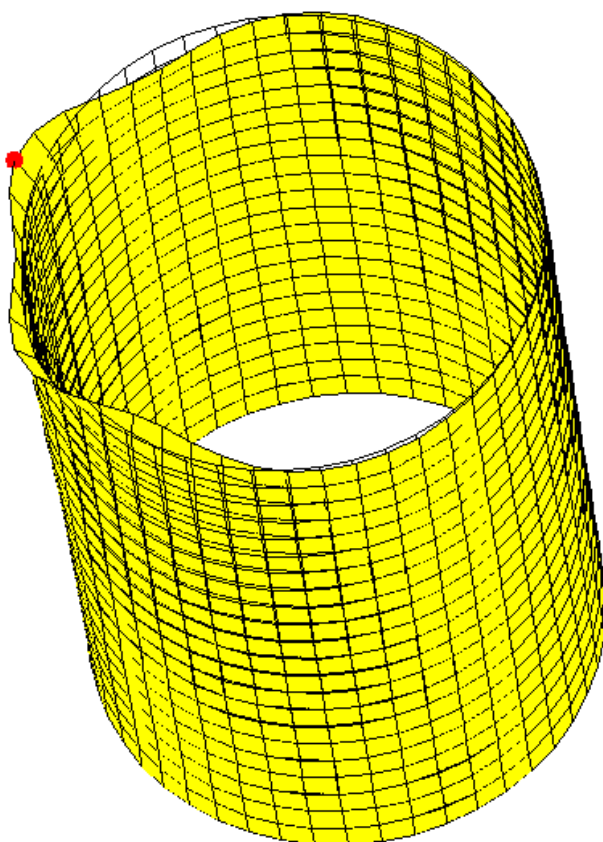
Номер формы

р = 14.9345

Max.перемещение = 194.91491 mm в узле = 575



Управление	
Параметры	
Степень свободы	Dsum
№ комбинации	1
№ формы	2
Вид	Закраска
Масштаб	1
Анимация	
Вывод рисунка	
Показ шкалы	☒ Горизонтально ☐ Вертикально
Тип вывода	☒ Вывод во Viewer ☐ Вывод в Word
Настройки вывода	
Вывод	
№ формы	
Номер формы	
$\rho = 14.9561$ Мах.перемещение = 165.30651 mm в узле = 572	



Управление	
Параметры	
Степень свободы	Dsum
№ комбинации	1
№ формы	3
Вид	Закраска
Масштаб	1
Анимация	
Вывод рисунка	
Показ шкалы	☒ Горизонтально ☐ Вертикально
Тип вывода	☒ Вывод во Viewer ☐ Вывод в Word
Настройки вывода	
Вывод	
№ формы	
Номер формы	
$\rho = 18.0671$ Мах.перемещение = 103.94684 mm в узле = 572	

2.5. Нелинейный расчет

Добавим следующие комбинации нагружений, близкие к полученному значения критической силы.

Задание и корректировка комбинаций

Доп. комбинации	Несовершенства				теория Кулона - Мора
Комбинации					Собств. колебания
	K-1	K-2	K-3	K-4	
1.	0	0	0	0	
2. Линейная нагрузка	1	14	15	16	

Меняем тип расчета на «Статический расчёт» и задаем следующие параметры:

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 1e-07
- Количество итераций 500
- 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

Конструктивные

Физические

Геометрические

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

Параметры расчета

Тип расчёта: Статический расчёт

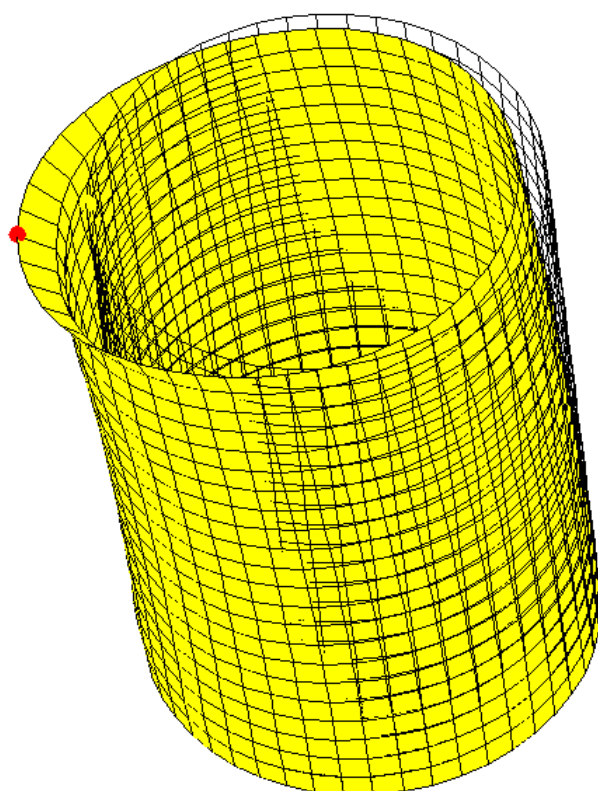
Параметры расчета

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

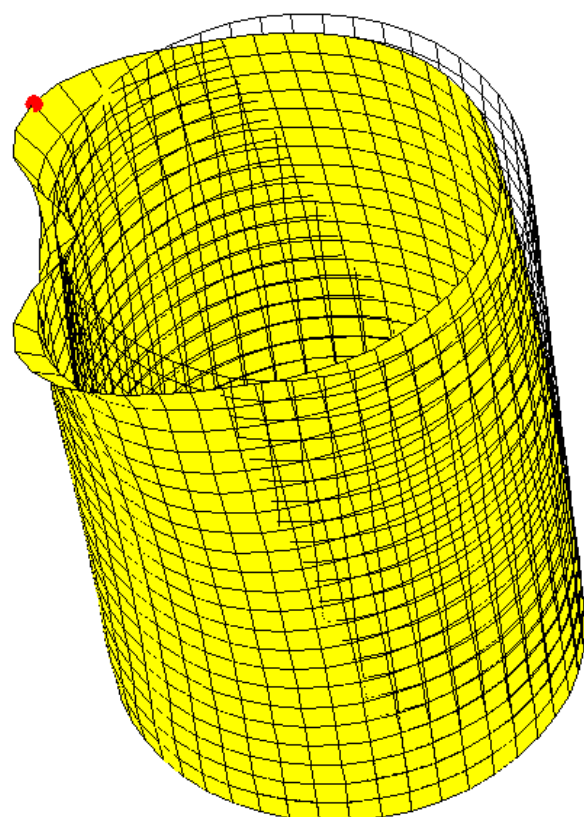
Алгоритм расчета

- Инкрементно-итеративный метод решения ☐
- Количество шагов приращений нагрузки 10
- Начальное приближение По линейной теории

И получаем следующие результаты для 3-ей и 4-ой комбинации:



Управление	
Параметры	
Степень свободы	Dsum
№ комбинации	3
CNC-комбинации	
Вид	Закраска
Масштаб	10
Вывод рисунка	
Показ шкалы	☒ Горизонтально ☐ Вертикально
Тип вывода	☒ Вывод во Viewer ☐ Вывод в Word
Настройки вывода	
Вывод	
№ комбинации Номер комбинации	
Max.перемещение = 33.82273 mm в узле = 575	



Управление	
Параметры	
Степень свободы	Dsum
№ комбинации	4
CNC-комбинации	
Вид	Закраска
Масштаб	10
Вывод рисунка	
Показ шкалы	☒ Горизонтально ☐ Вертикально
Тип вывода	☒ Вывод во Viewer ☐ Вывод в Word
Настройки вывода	
Вывод	
№ комбинации Номер комбинации	
Max.перемещение = 34.41633 mm в узле = 570	

Как видно при 4-й комбинации получаем некоторое предкритическое состояние, характер которого соответствует полученной ранее 1-й форме потери устойчивости.