

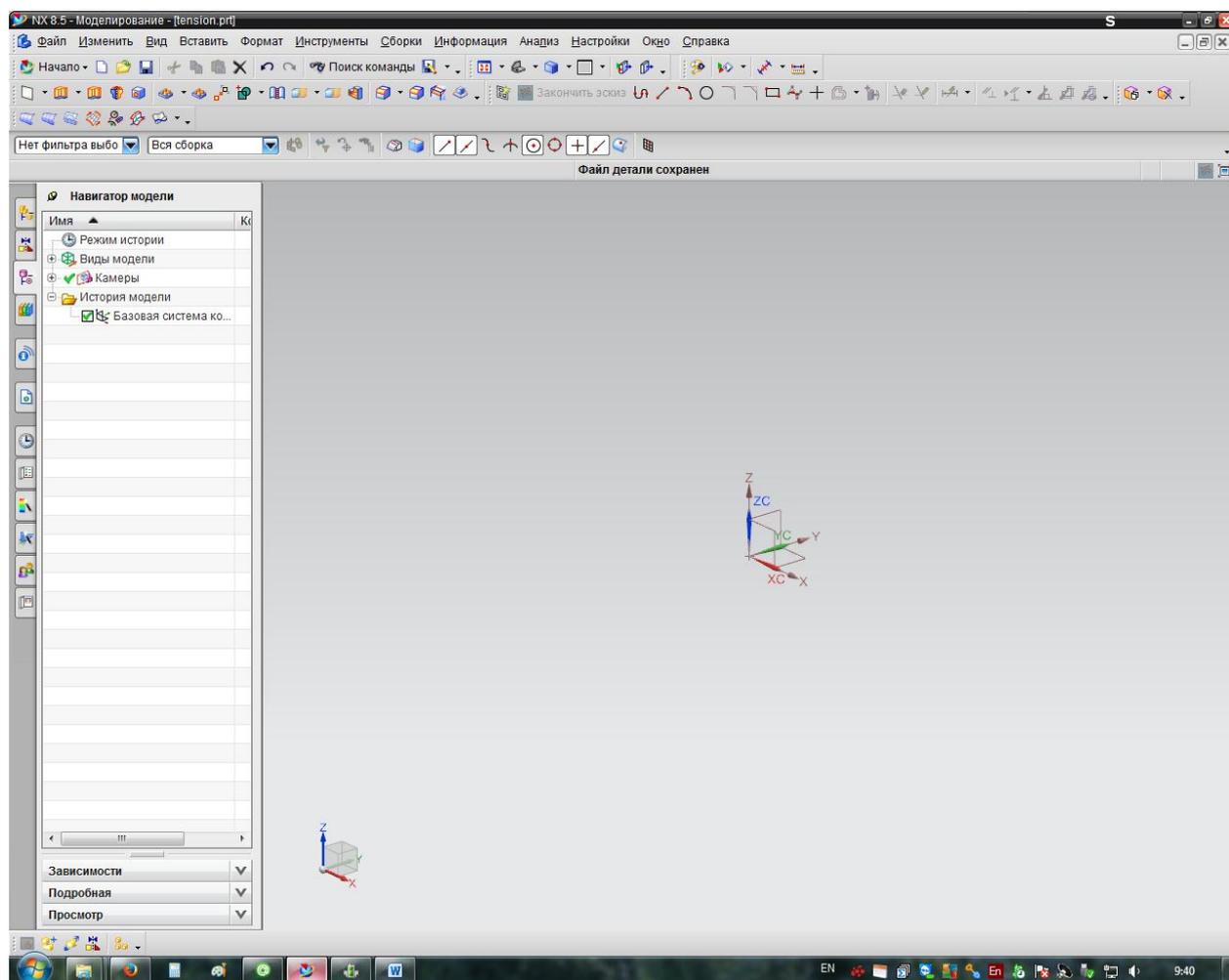
# Лабораторная работа №1

## «ОСНОВЫ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ/СЖАТИИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ UNIGRAPHICS NX 8.5»

### Цель работы:

1. Ознакомиться с методикой проведения расчета на прочность и жесткость при растяжении/сжатии;
2. Произвести проектировочный расчет типовых стержневых элементов конструкций на прочность и жесткость.

Общий вид окна программы NX 8.5 представлен на рис. далее.



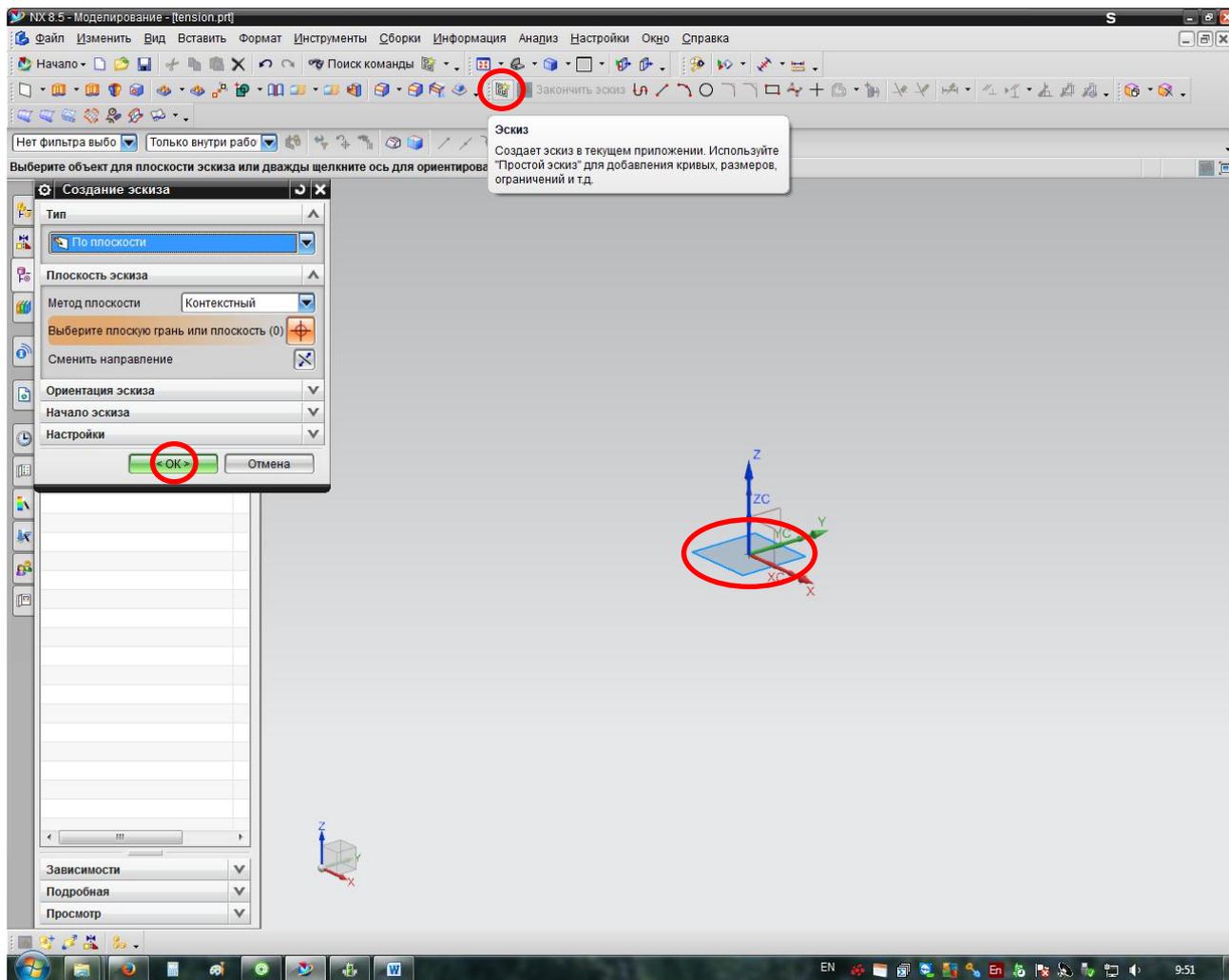
# 1 Расчет на прочность при растяжении/сжатии

**Дано:** стальной прямоугольный стержень заданных размеров.

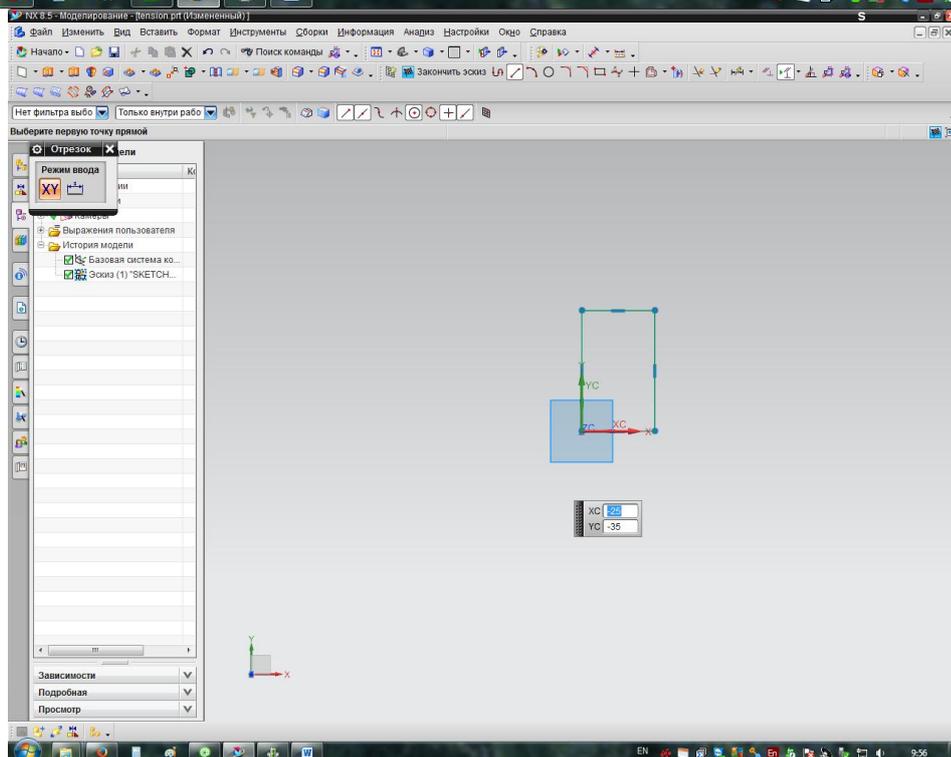
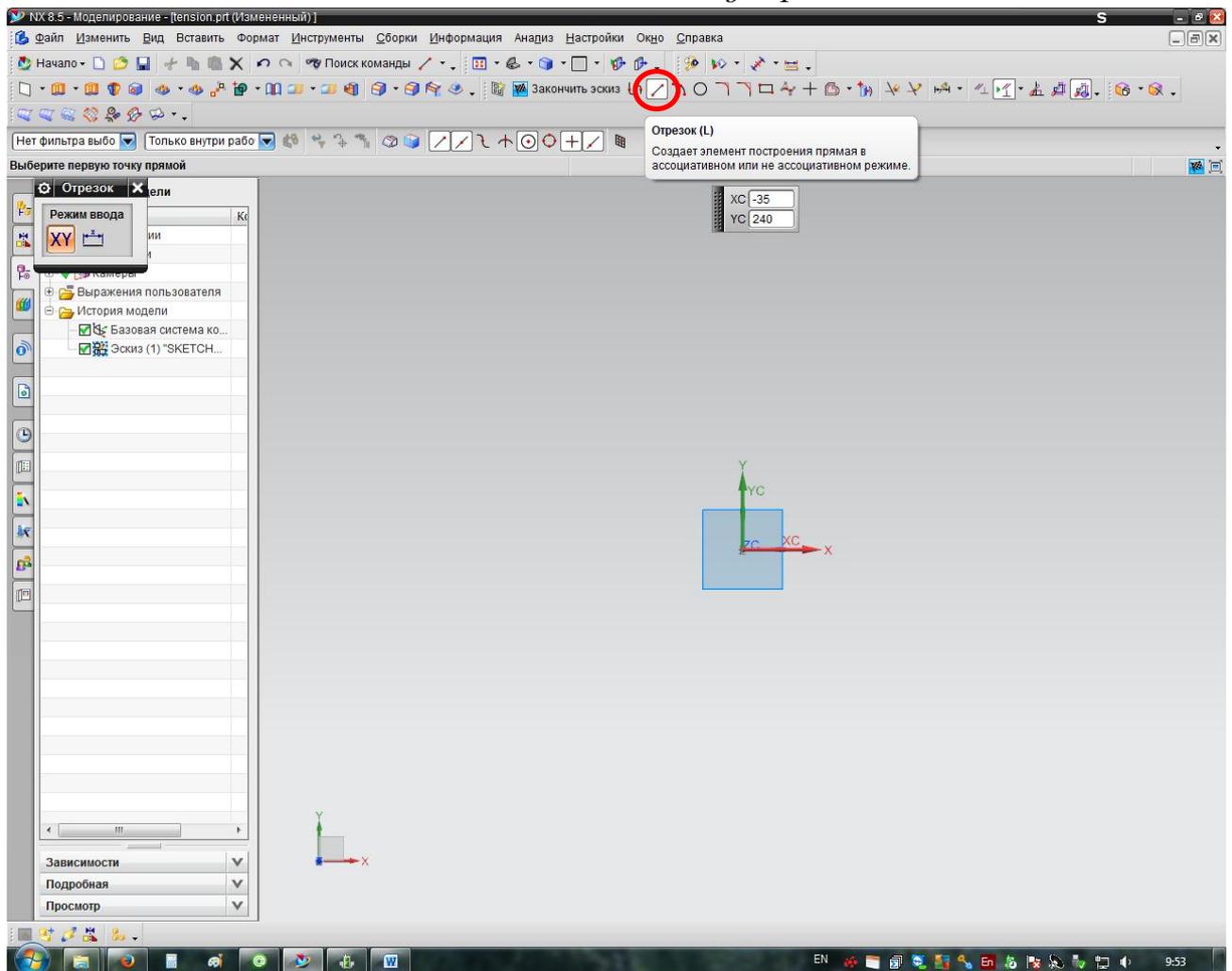
**Найти:** коэффициент запаса прочности стержня, в случае необходимости принять мероприятия по обеспечению соответствующего коэффициента запаса прочности исходя из характера разрушения материала

Первоначально необходимо построить модель прямоугольного стержня с параметрами: **толщина**  $h = 40$  мм, **ширина**  $b = 20$  мм, **длина**  $l = 500$  мм.

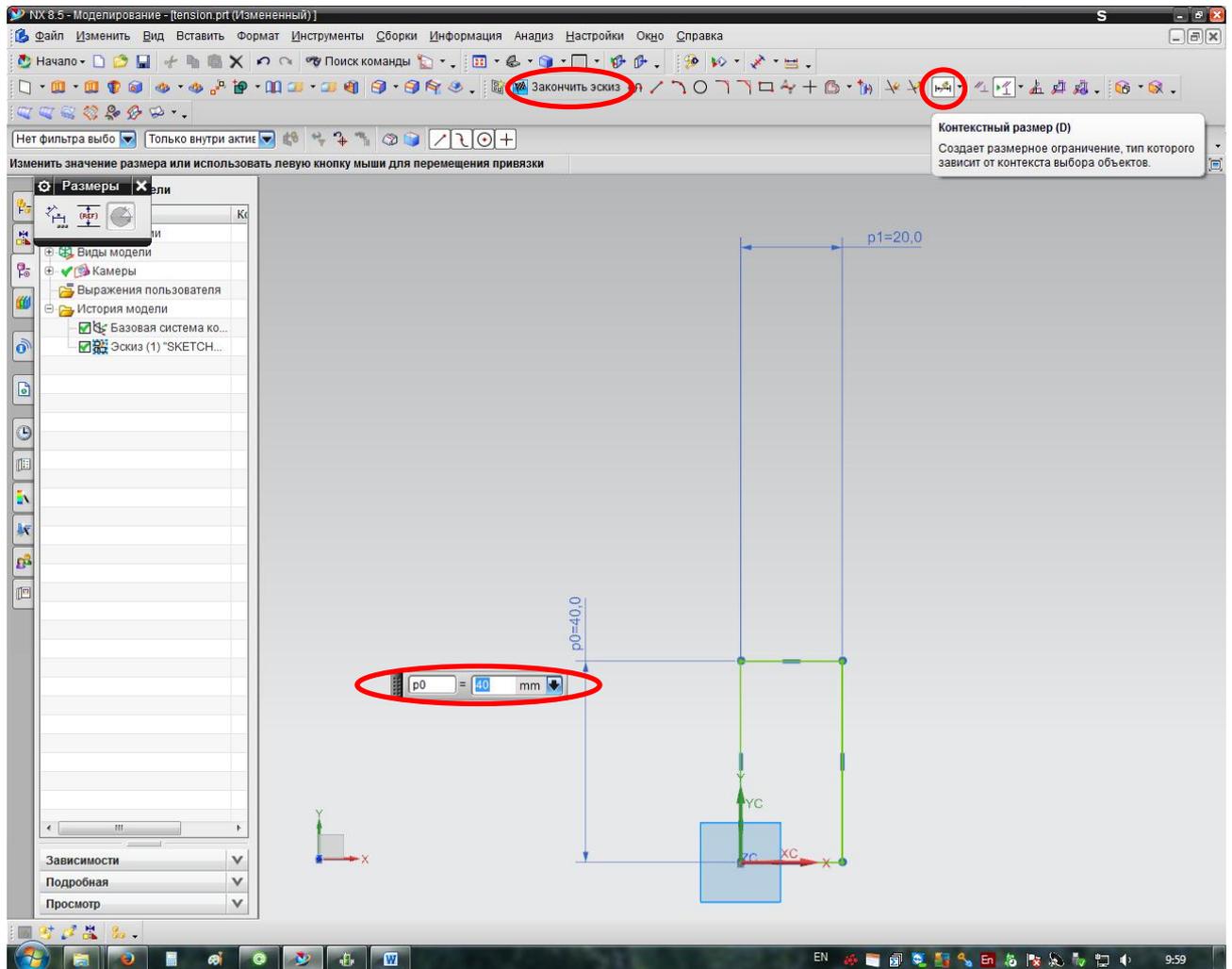
Для этого необходимо нажать кнопку «Эскиз» (см. рис. далее), выбрать плоскость **ХОУ** и нажать ОК.



Выбираем «Отрезок» и чертим произвольный прямоугольник, у которого соотношение сторон примерно соответствует заданному (т.е.  $\frac{h}{b} \approx \frac{2}{1}$ ).

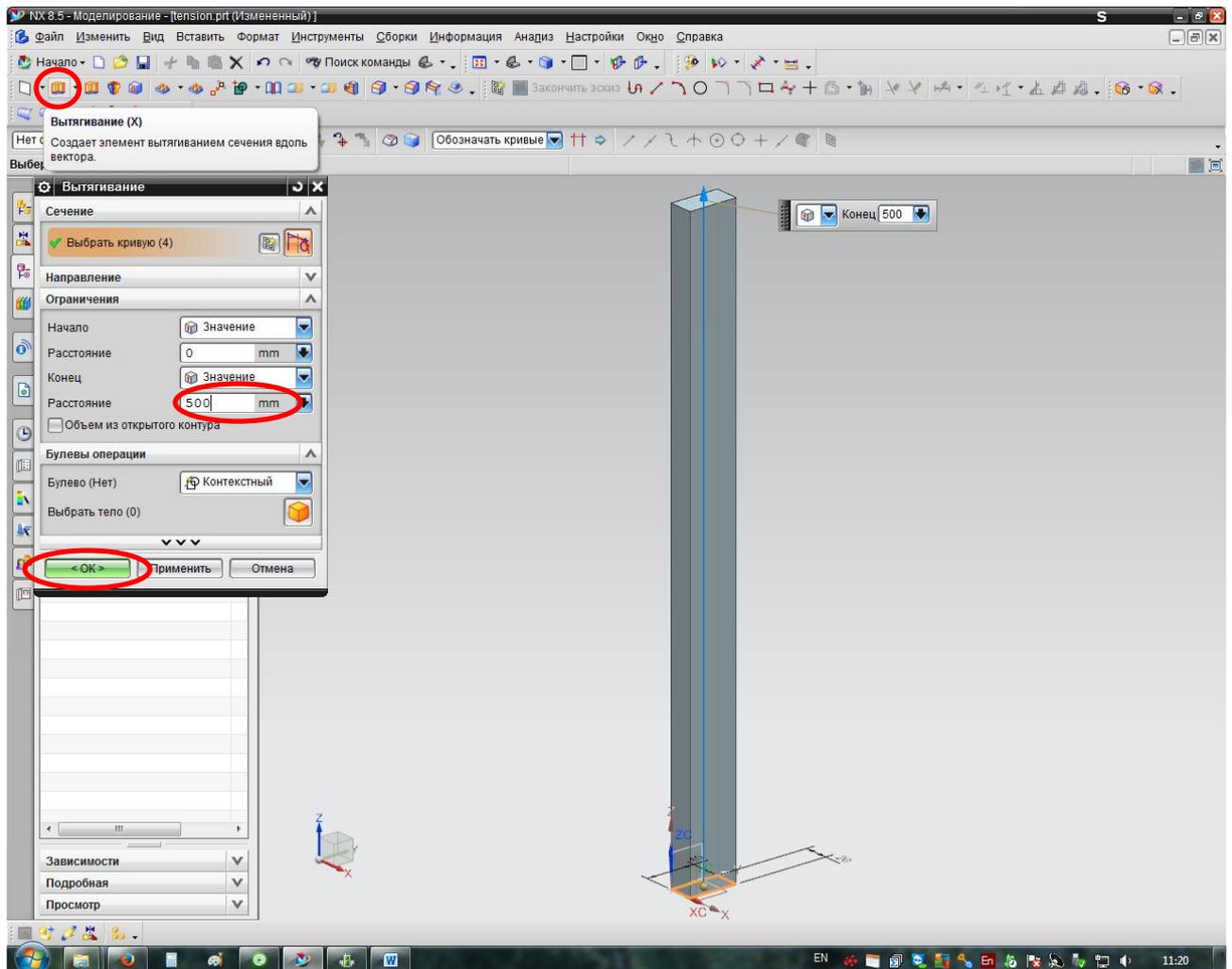


Производим образмеривание чертежа с помощью опции «Контекстный размер» и задаем необходимые размеры поперечного сечения. После образмеривания необходимо нажать «Закончить эскиз» и выйти из эскиза.

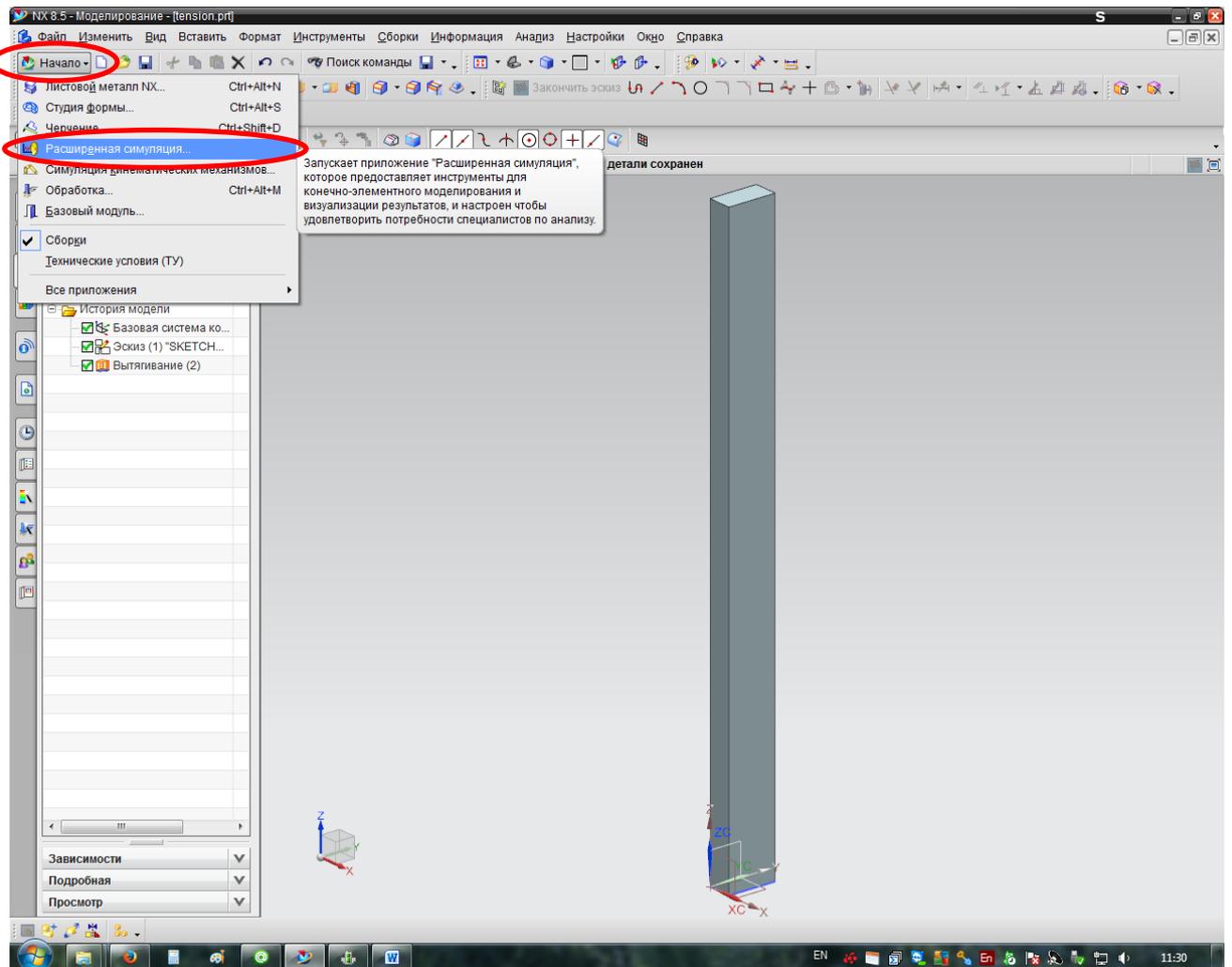


Далее с помощью операции «Вытягивание» получаем трехмерную модель стержня заданной длины.

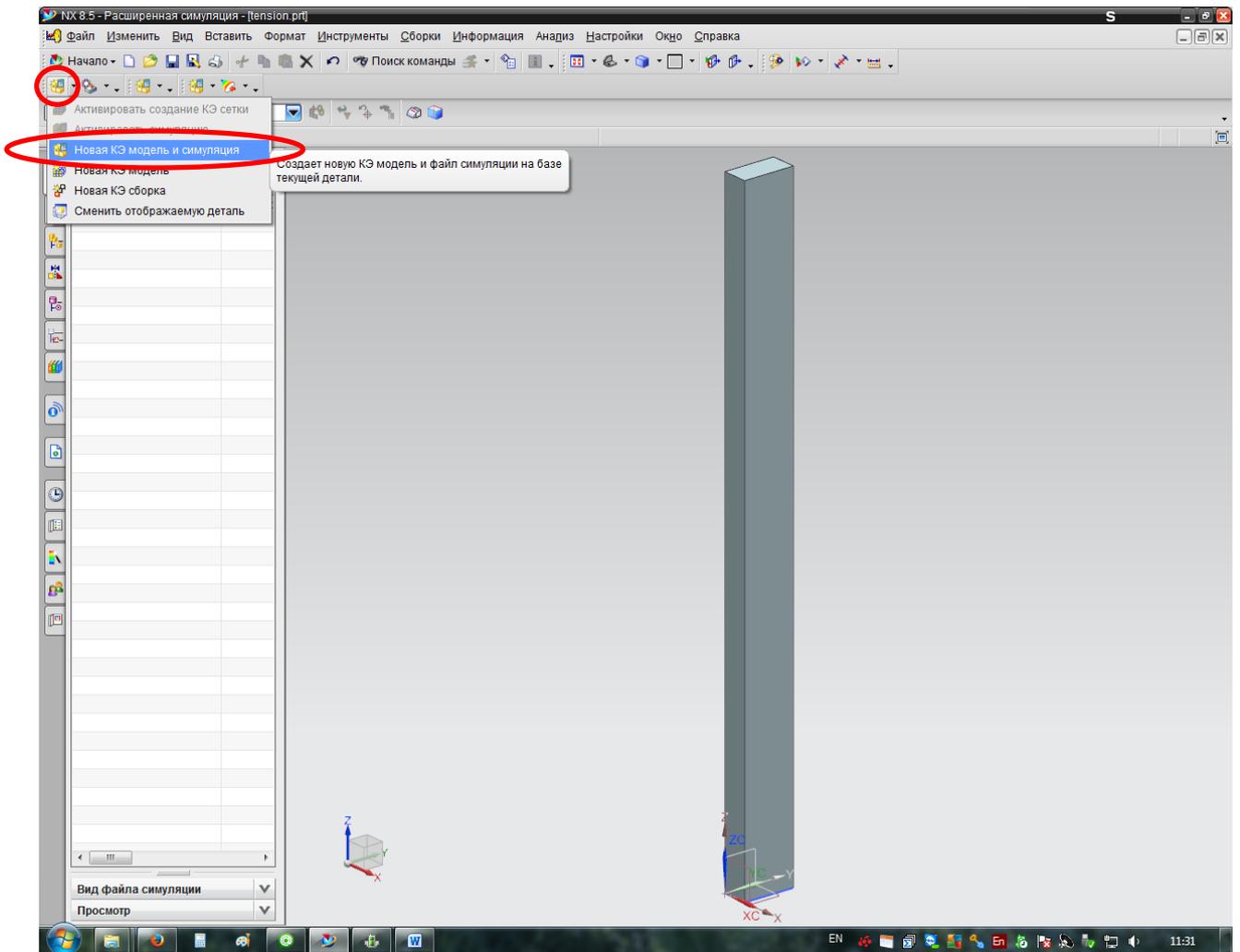
На этом геометрическая сторона задачи заканчивается. Переходим к созданию конечно-элементной расчетной модели стержня.



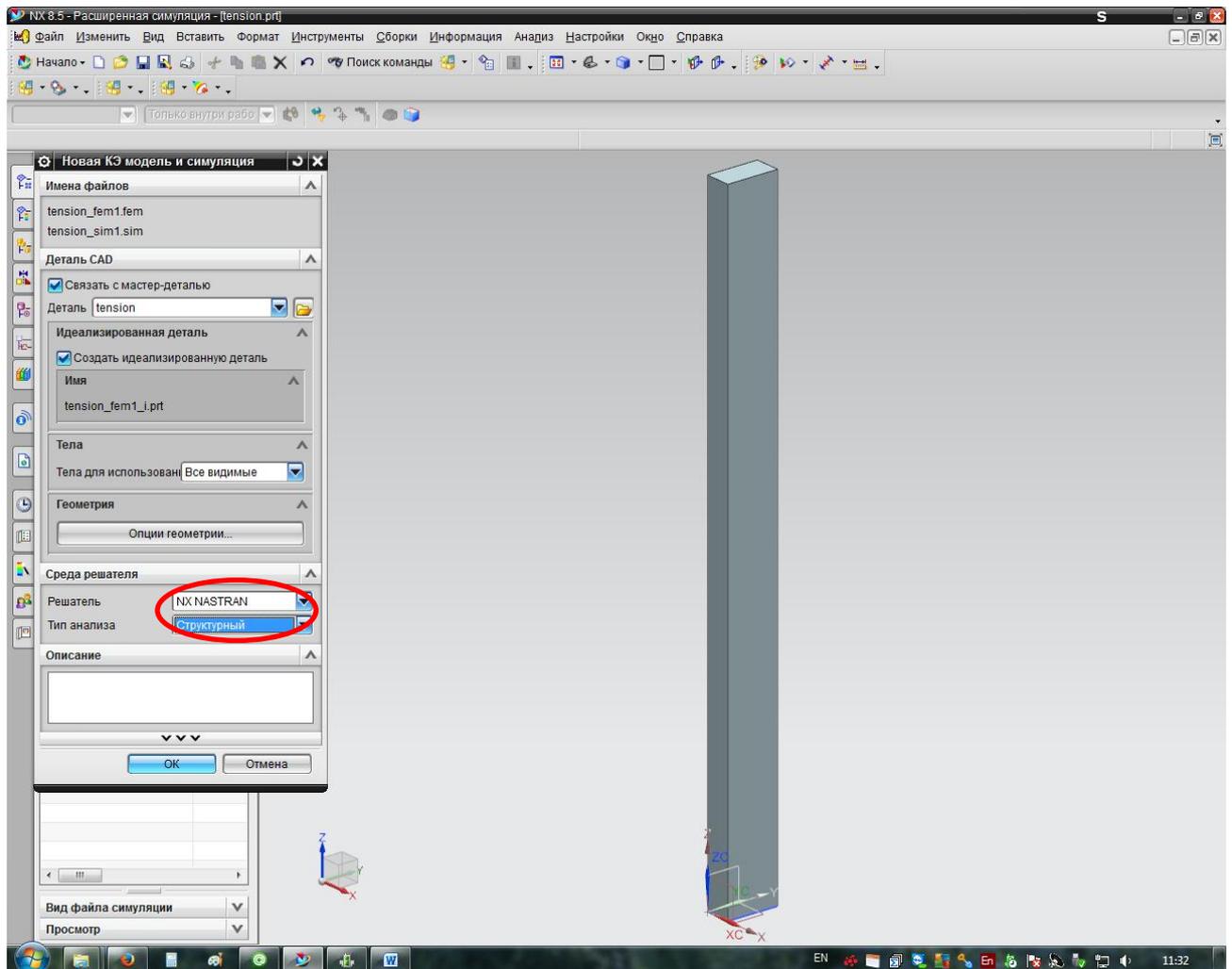
Для перехода к созданию конечно-элементной модели необходимо переместиться в расчетный модуль. Для этого нажимаем **Начало** → **Расширенная симуляция**.



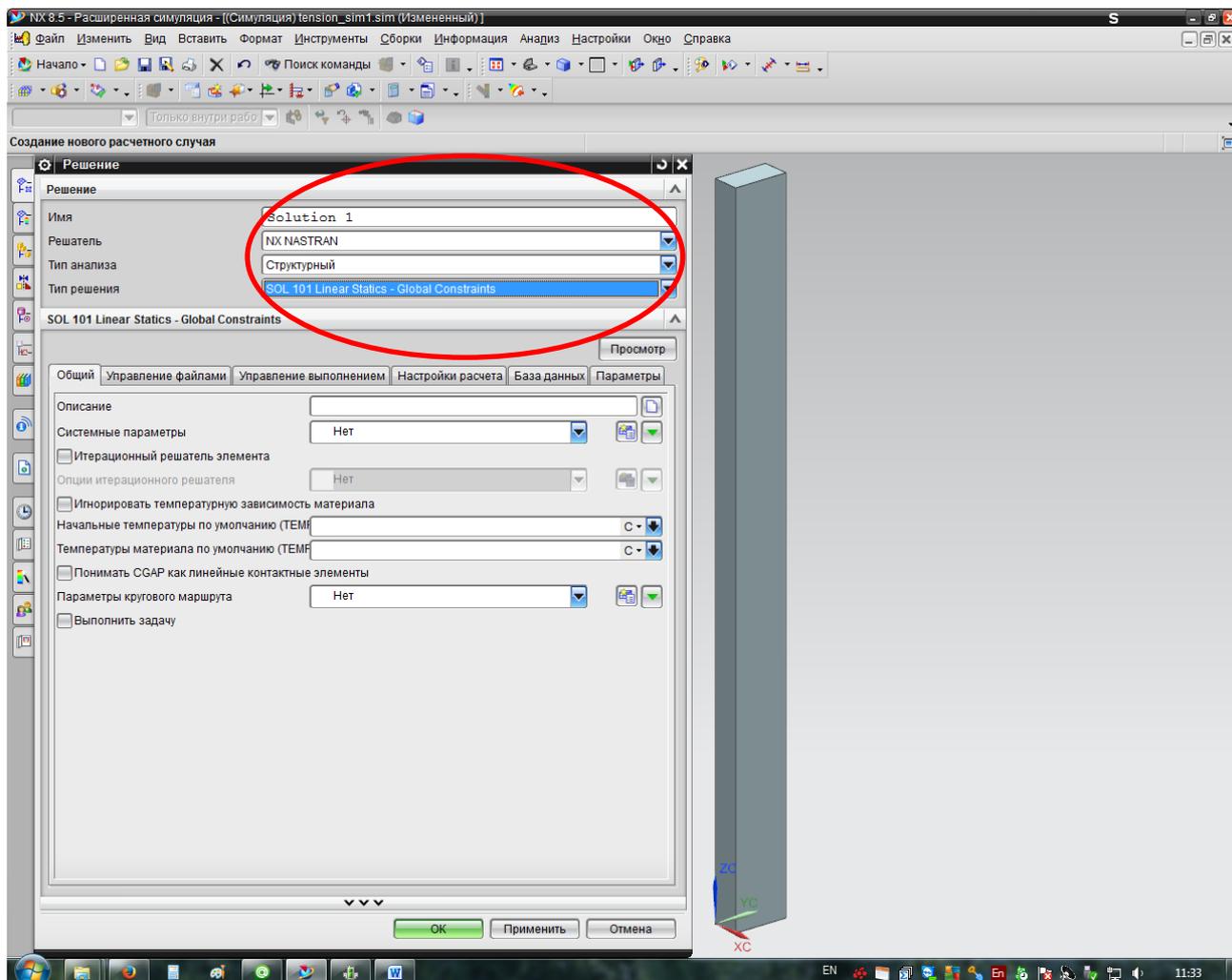
Далее активируем выпадающее меню «Создание КЭ сетки» и выбираем «Новая КЭ модель и симуляция».



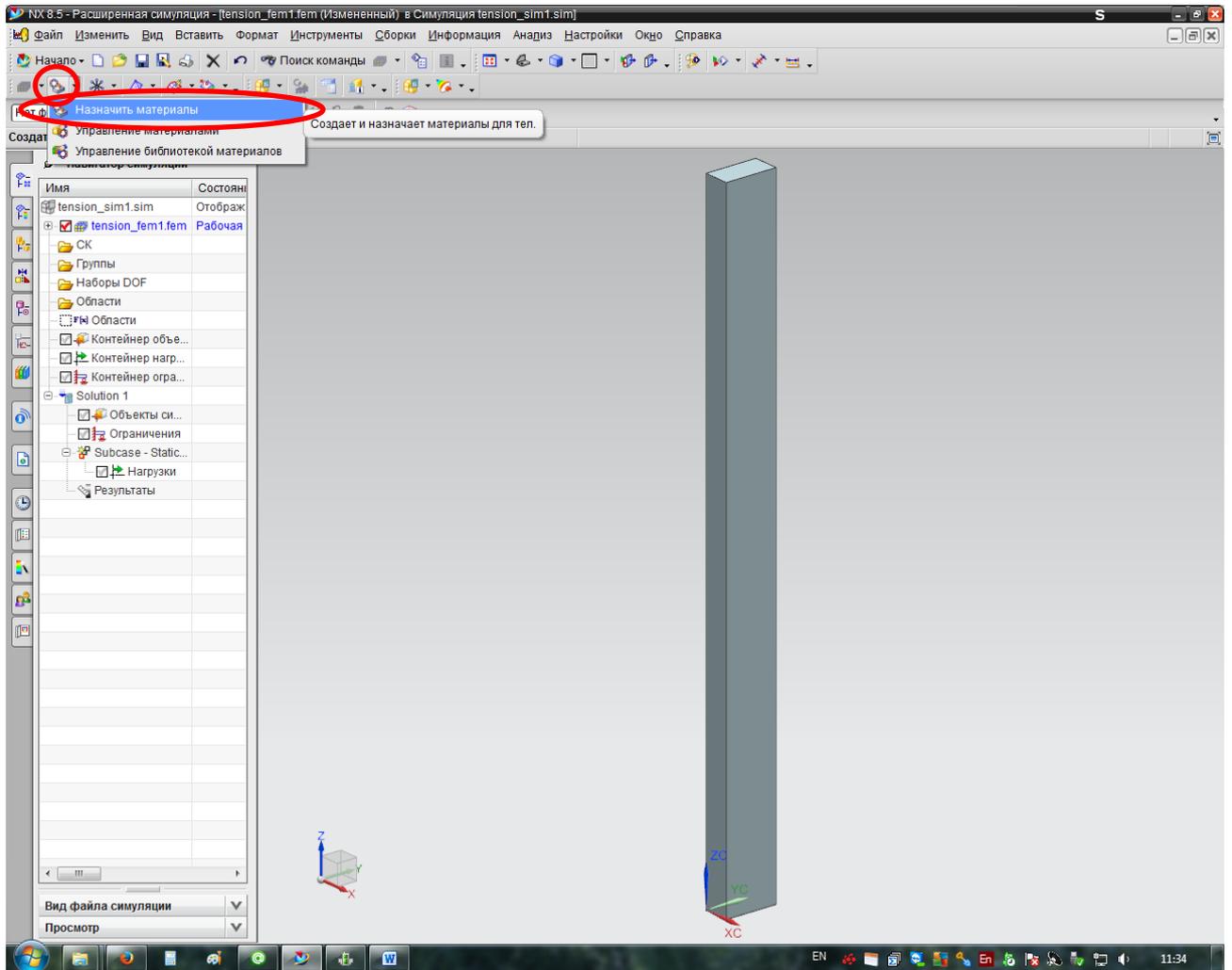
В окне симуляции обычно менять ничего не нужно, однако необходимо проследить, чтобы в окне «Решатель» был выбран “NX Nastran”, а во вкладке «Тип анализа» – «Структурный». После выбора всех параметров нажимаем **ОК** (далее этот пункт будет опускаться из описания, т.к. является очевидным).



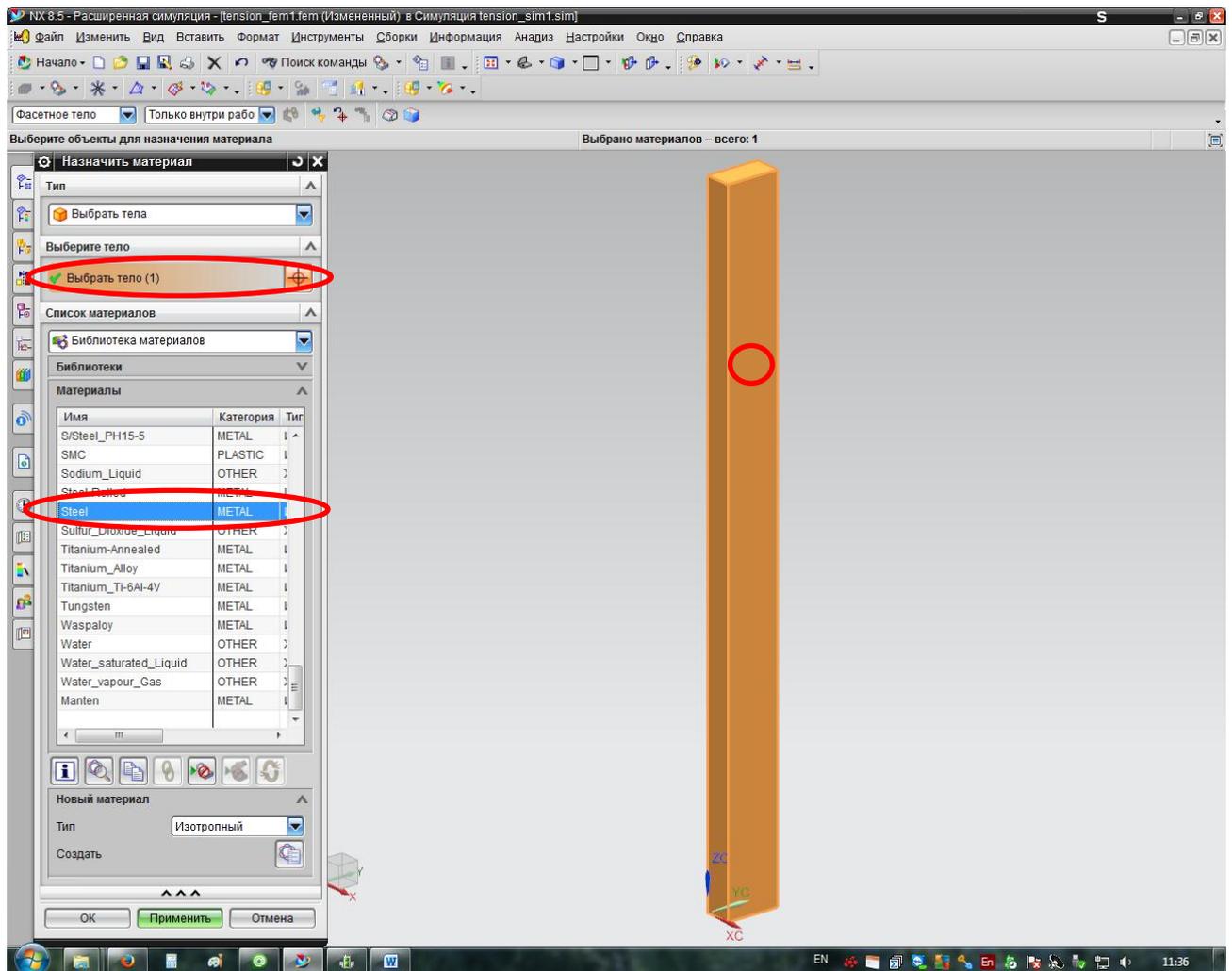
В окне «Решение» также следим за пунктами «Решатель» – «NX Nastran», «Тип анализа» – «Структурный». Во вкладке «Тип решения» выбираем **SOL 101 Linear Statics – Global Constraints**. Этот тип решения хорошо подходит для решения задач в статической постановке для определения кратковременной статической прочности. В данном пункте есть еще множество дополнительных опций, но пользоваться ими имеет смысл лишь при решении узко специализированных задач (например, с учетом особого контактного взаимодействия, натяга или зазора). Кроме того, необходим высокий уровень владения программными продуктами семейства NX.



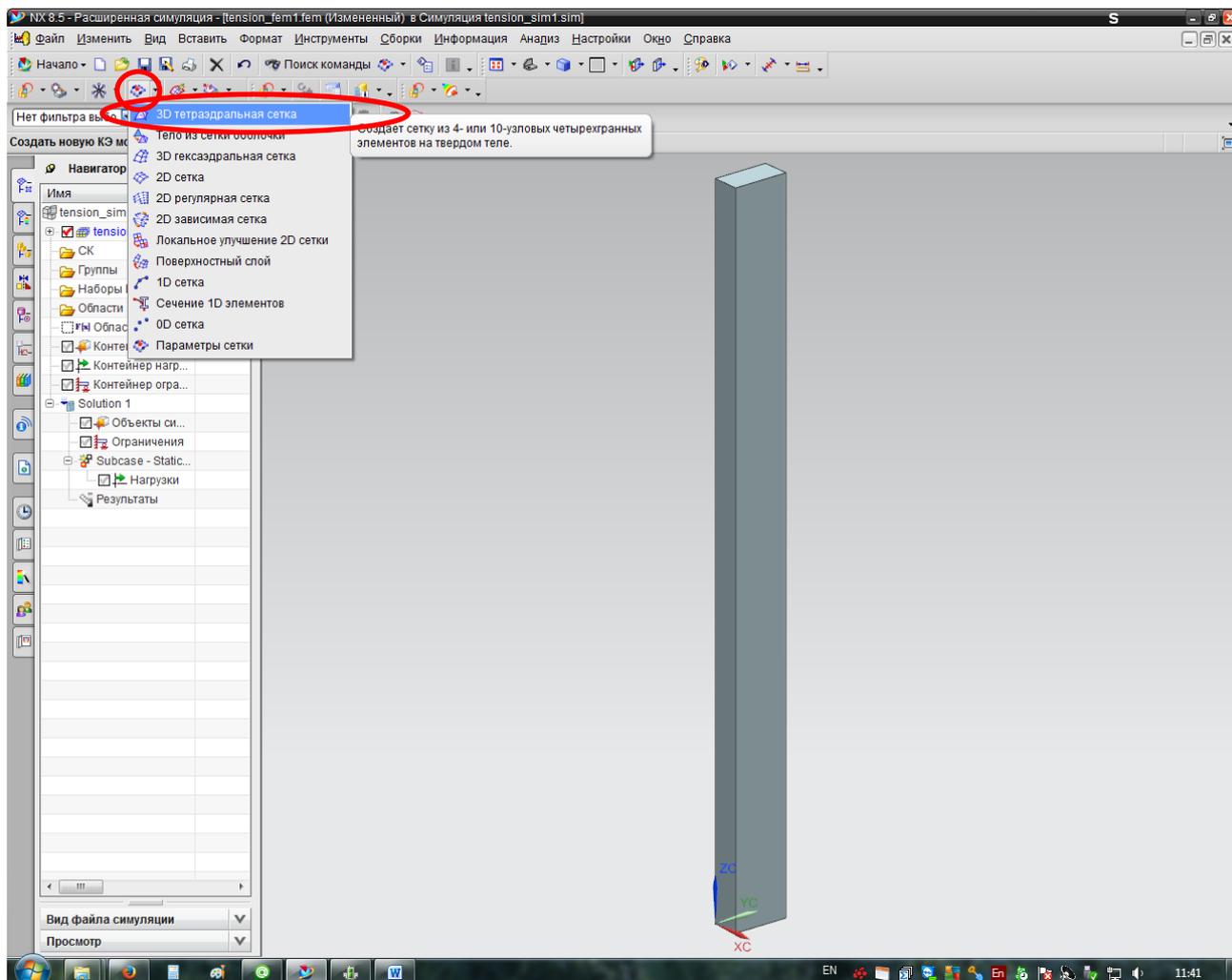
Следующий шаг – назначение материала. Для этого необходимо выбрать «**Назначить материалы**».



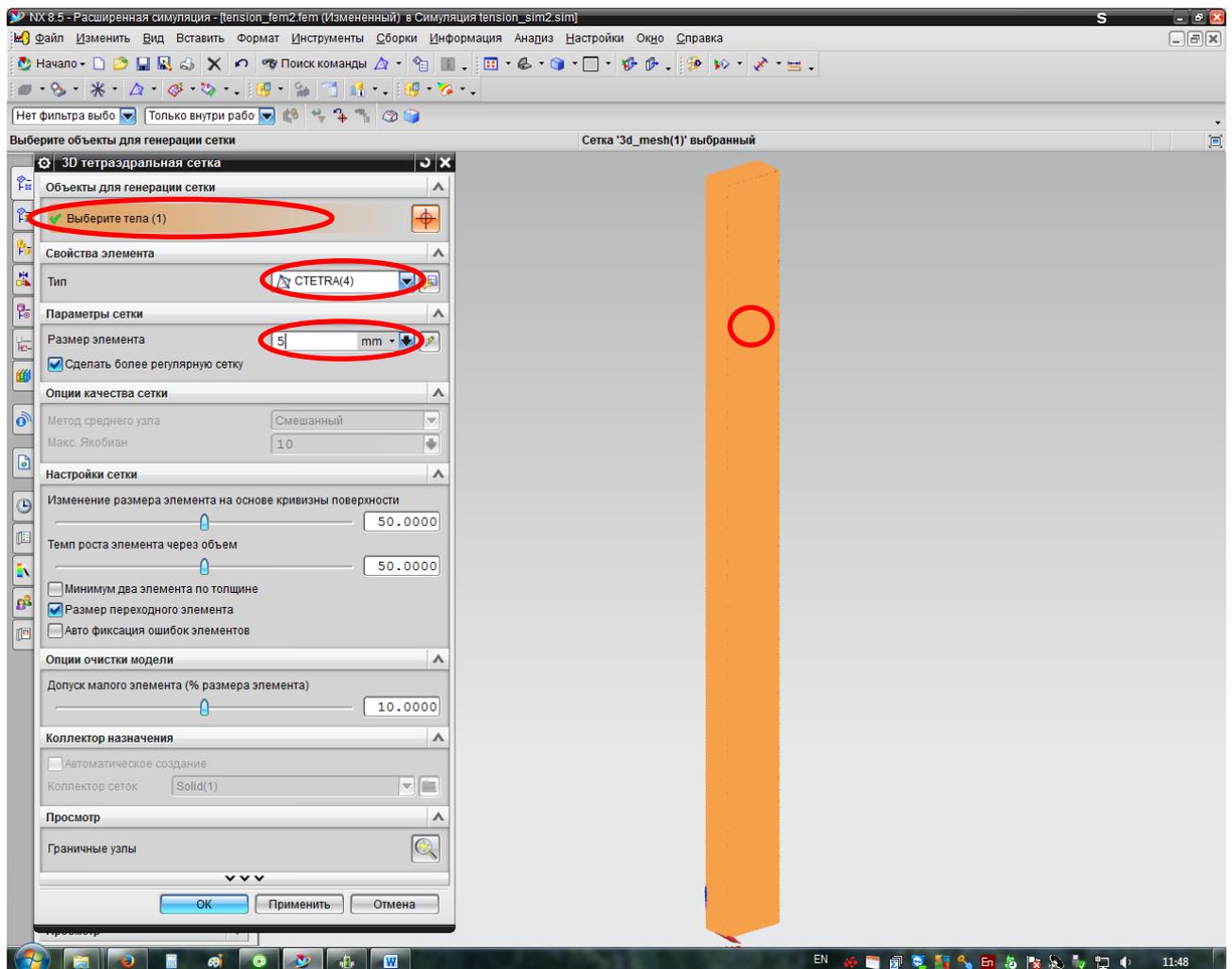
Выбираем тело, для которого будем назначать материал, нажав на него левой кнопкой мышки (ЛКМ), далее из библиотеки материалов выбираем сталь (**Steel**).



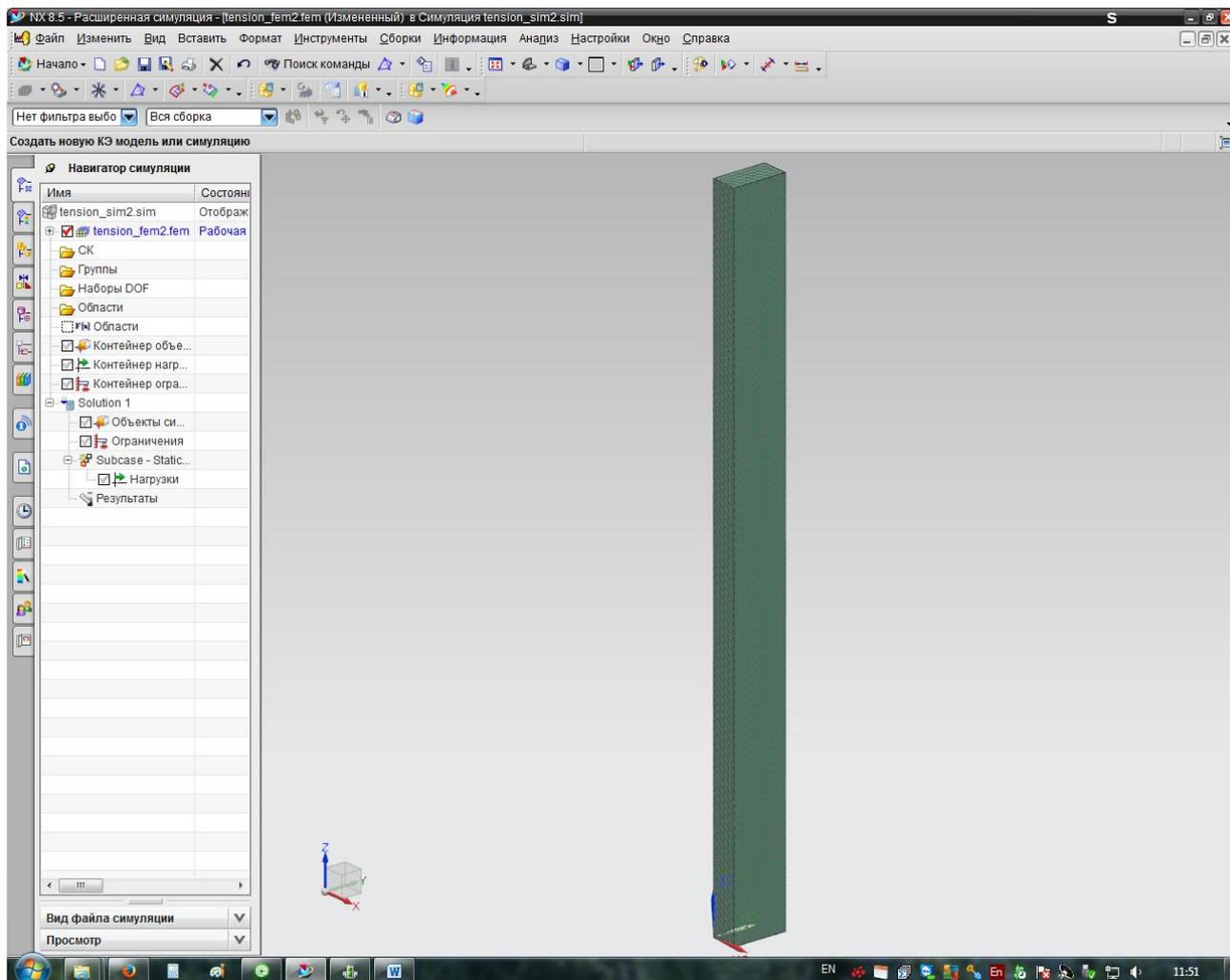
Следующий шаг – создание КЭ сетки. Генерация сетки – очень важный этап. От качества сетки будет зависеть правильность полученных результатов и производительность расчетов. Слишком грубая сетка (большие элементы) не дает достоверных результатов, однако слишком мелкая сетка (маленькие элементы) приводит к достаточно долгим вычислениям. Необходимо искать оптимум для достижения максимальной производительности вычислений при обеспечении должной достоверности расчета. Тип элементов сетки может варьироваться в зависимости от задачи. В нашем случае, выбираем «3D тетраэдральная сетка».



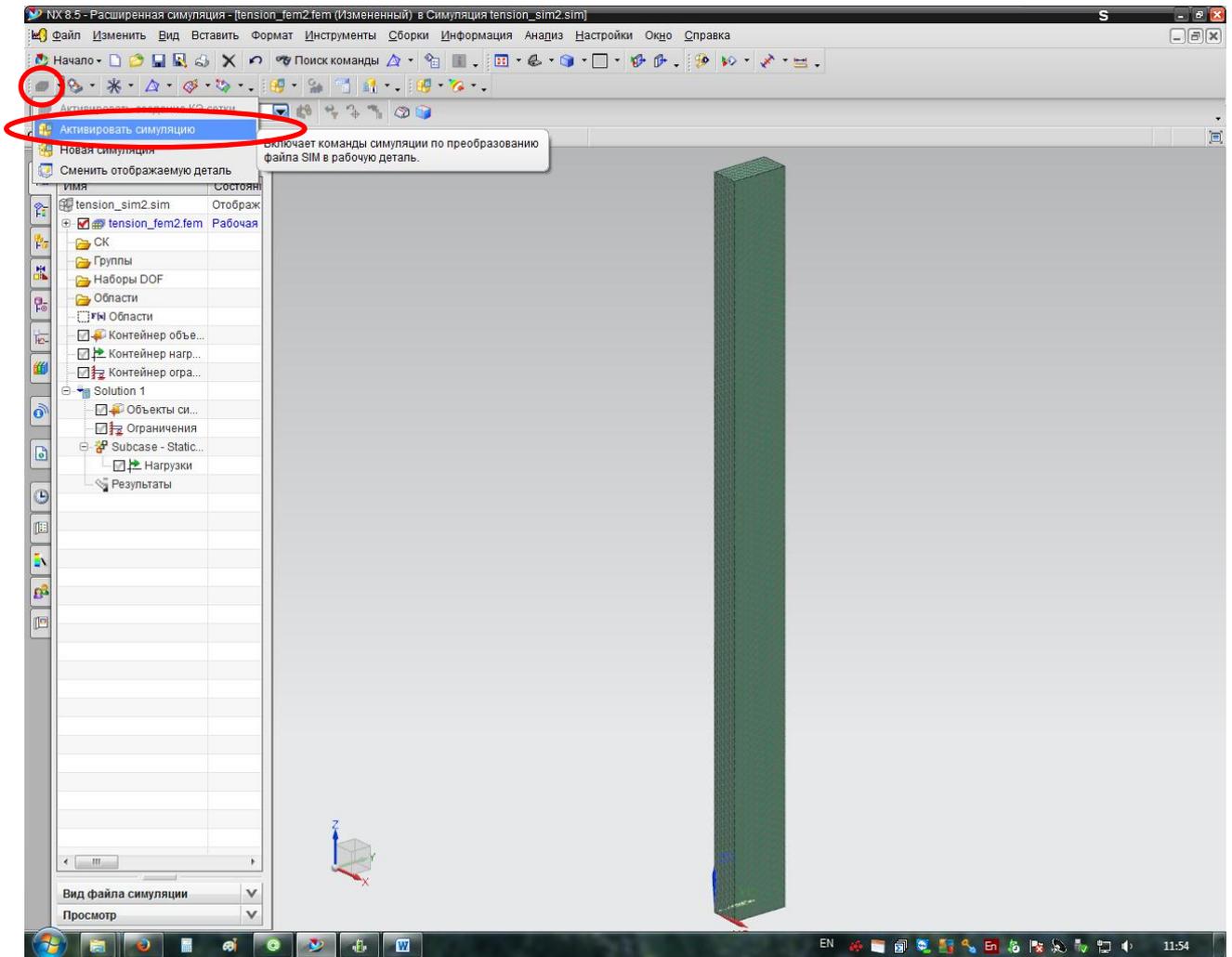
В окне параметров сетки выбираем тело, которое будем разбивать на конечные элементы, **тип сетки – “СТЕТРА(4)”** – четырехузловые элементы; для решения данной задачи эти элементы пригодны, однако для решения больших объемных сборок лучше выбирать элементы **СТЕТРА(10)**. Необходимо также указать средний **размер элемента** порядка **5 мм**. Из опыта конечно-элементного моделирования следует, что для получения достоверных результатов количество элементов по самому малому размеру модели (в данном случае это толщина  $h = 20\text{мм}$ ) должно быть не менее 5, рекомендуется не менее 10. В нашем случае это условие не выполняется. Мы специально делаем относительно грубую сетку, чтобы повысить скорость расчетов.



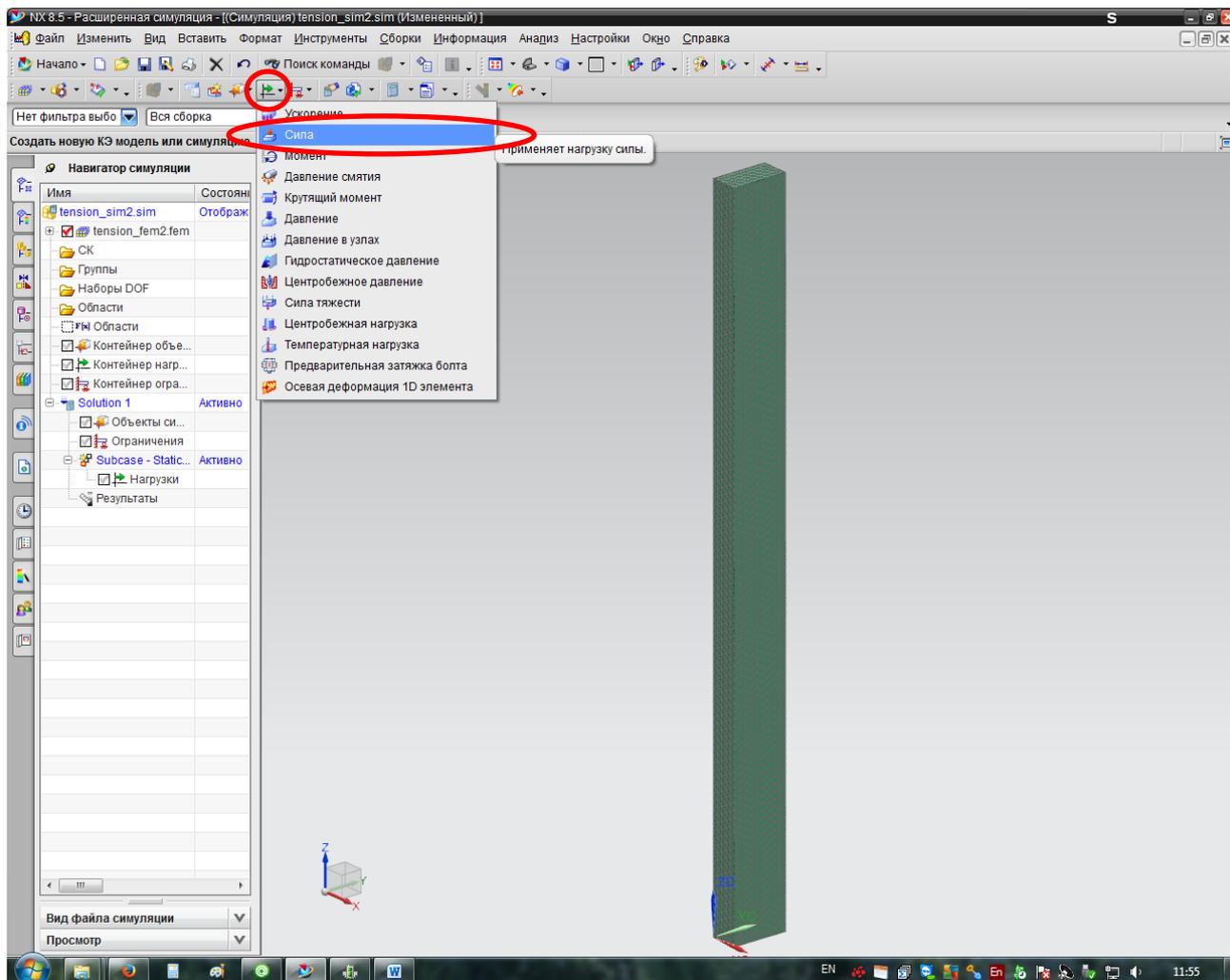
Результат генерации КЭ сетки представлен на рис. далее.



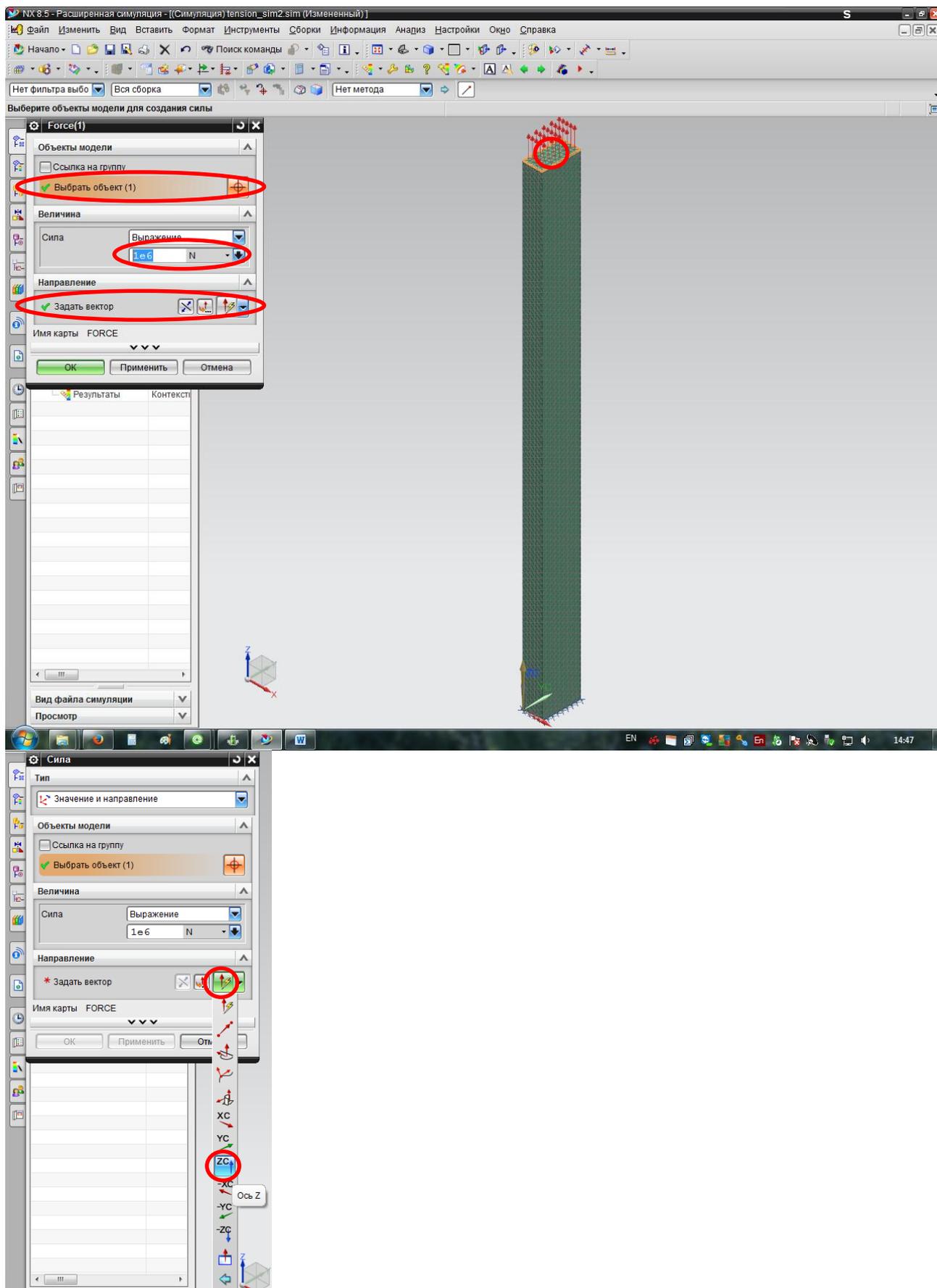
Следующий шаг – переход в симуляцию для создания граничных условий (приложение нагрузок и условия закрепления). Для этого выбираем пункт «Активировать симуляцию».



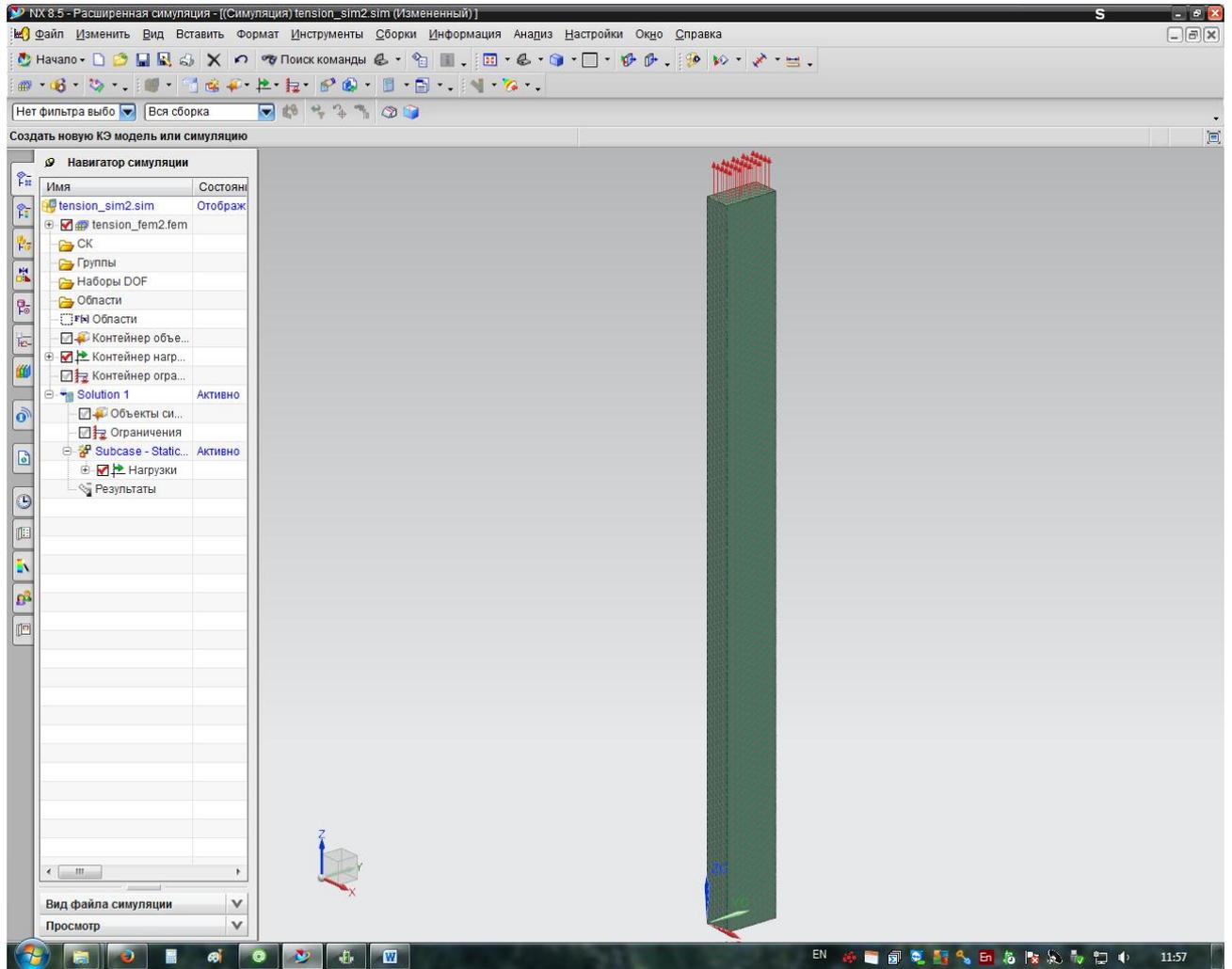
Для приложения нагрузки выбираем пункт меню «Тип нагрузки» → Сила.



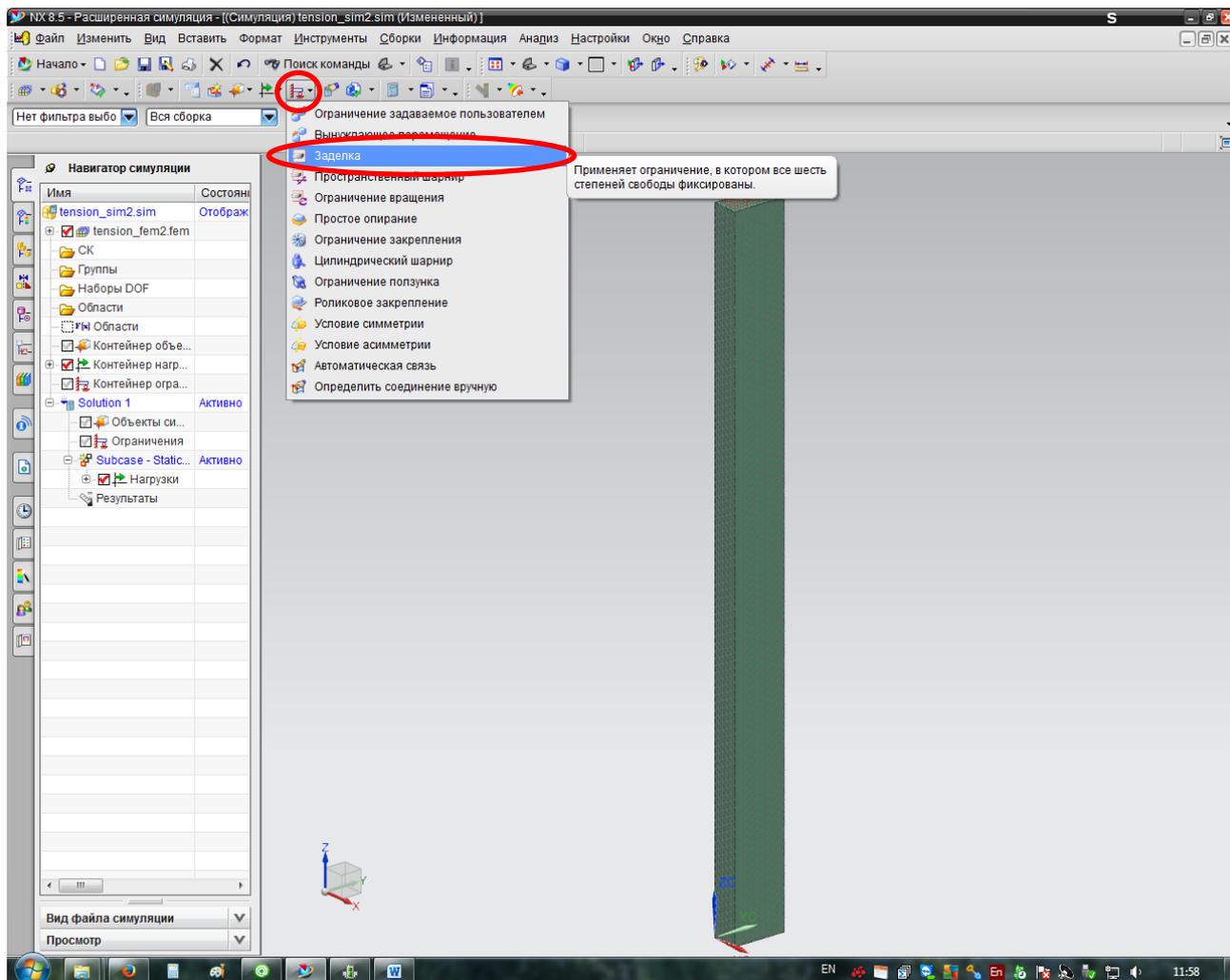
Выбираем торец, по которому будем прикладывать силу, задаем значение силы  $F = 1$  МН. Для правильной ориентации вектора силы в пространстве выбираем ориентацию в направлении соответствующей из глобальных осей координат (в данном случае оси Z).



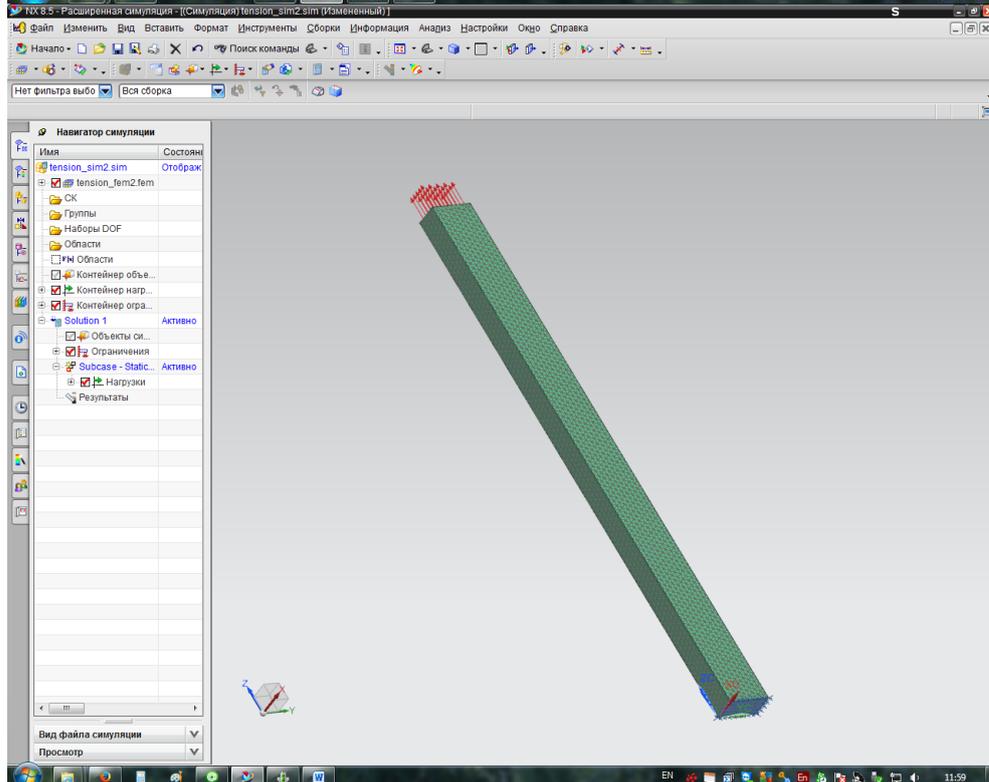
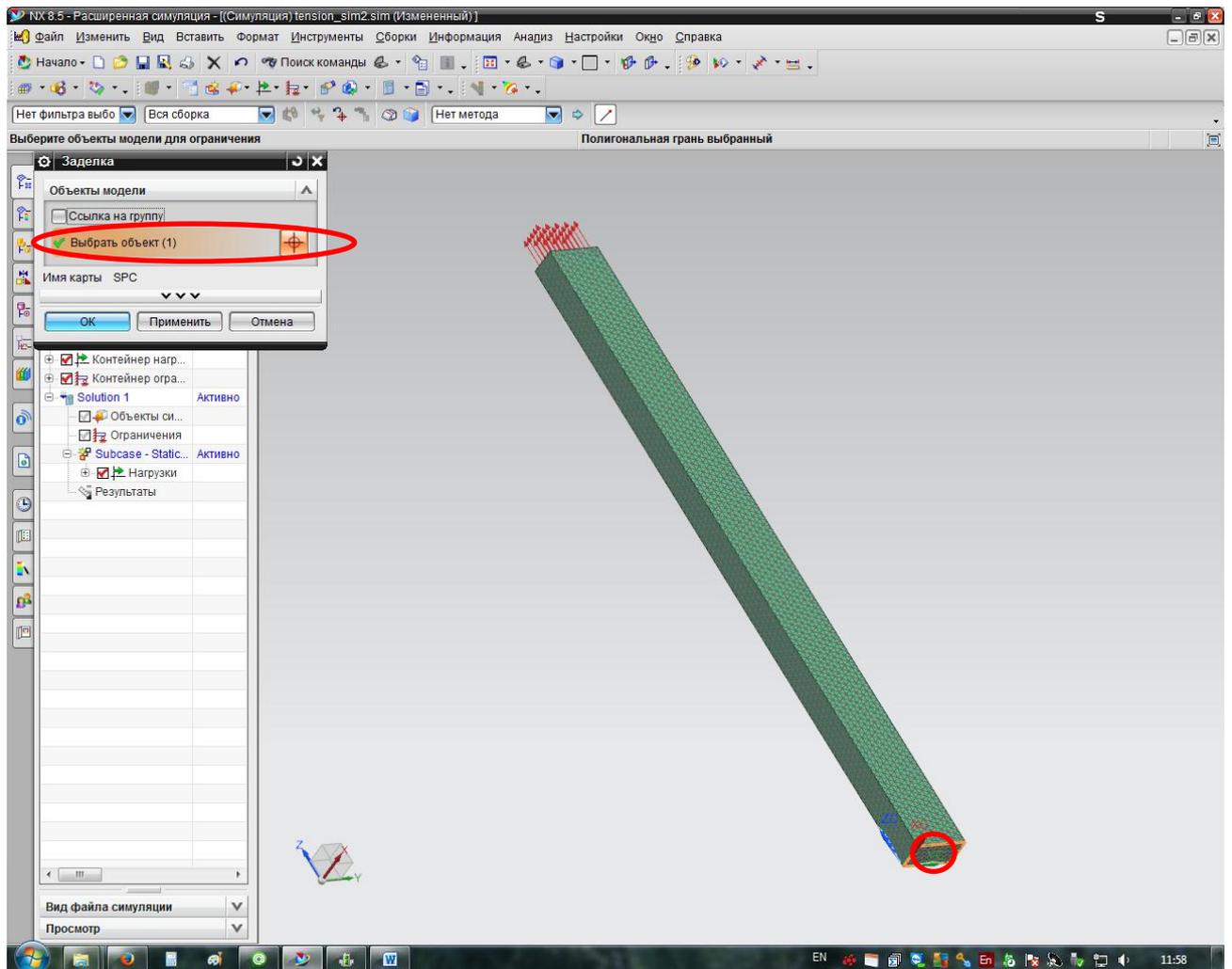
Результат приложения силы представлен на рис. далее.



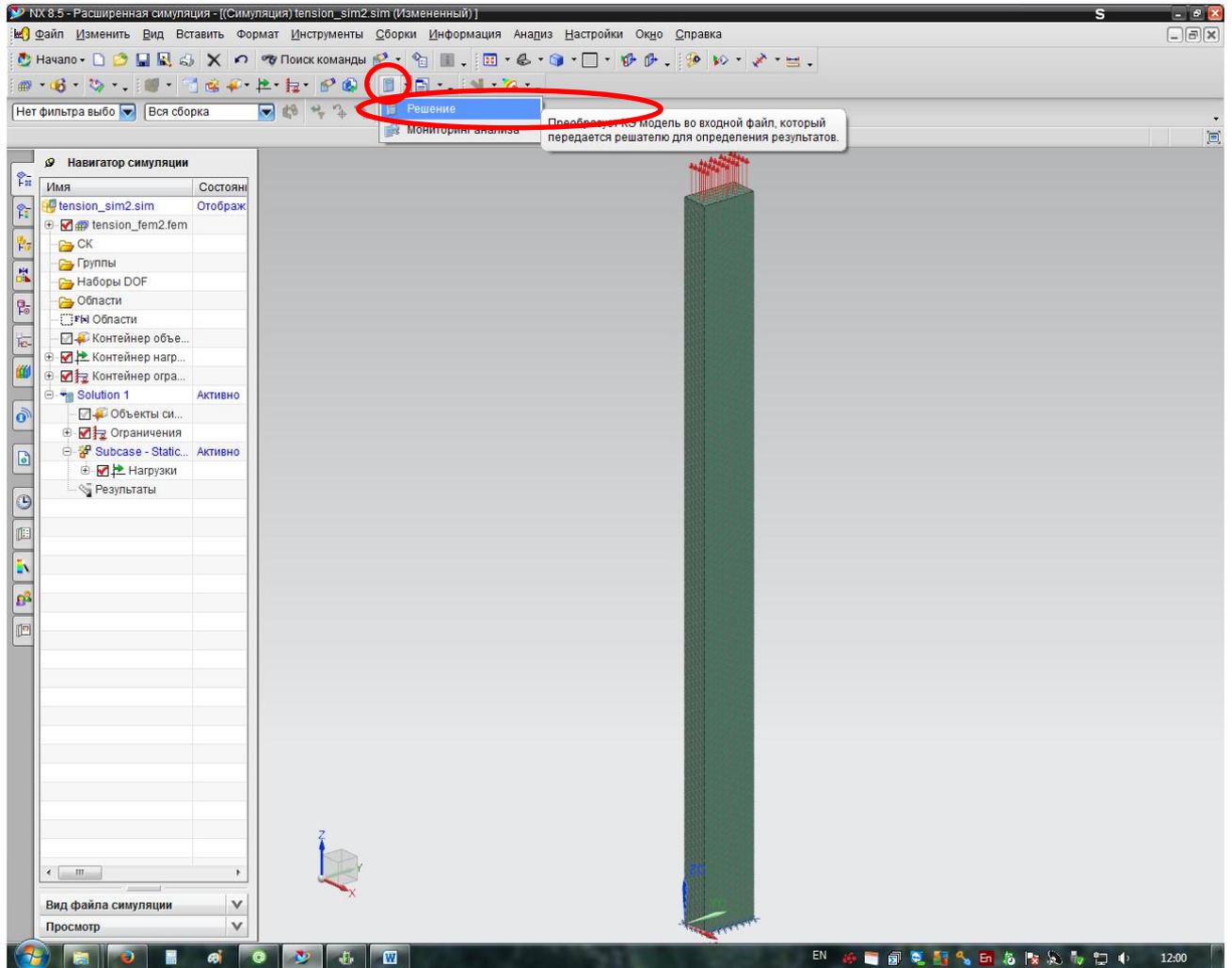
Для приложения нагрузки выбираем пункт меню «Тип ограничения» → Заделка.



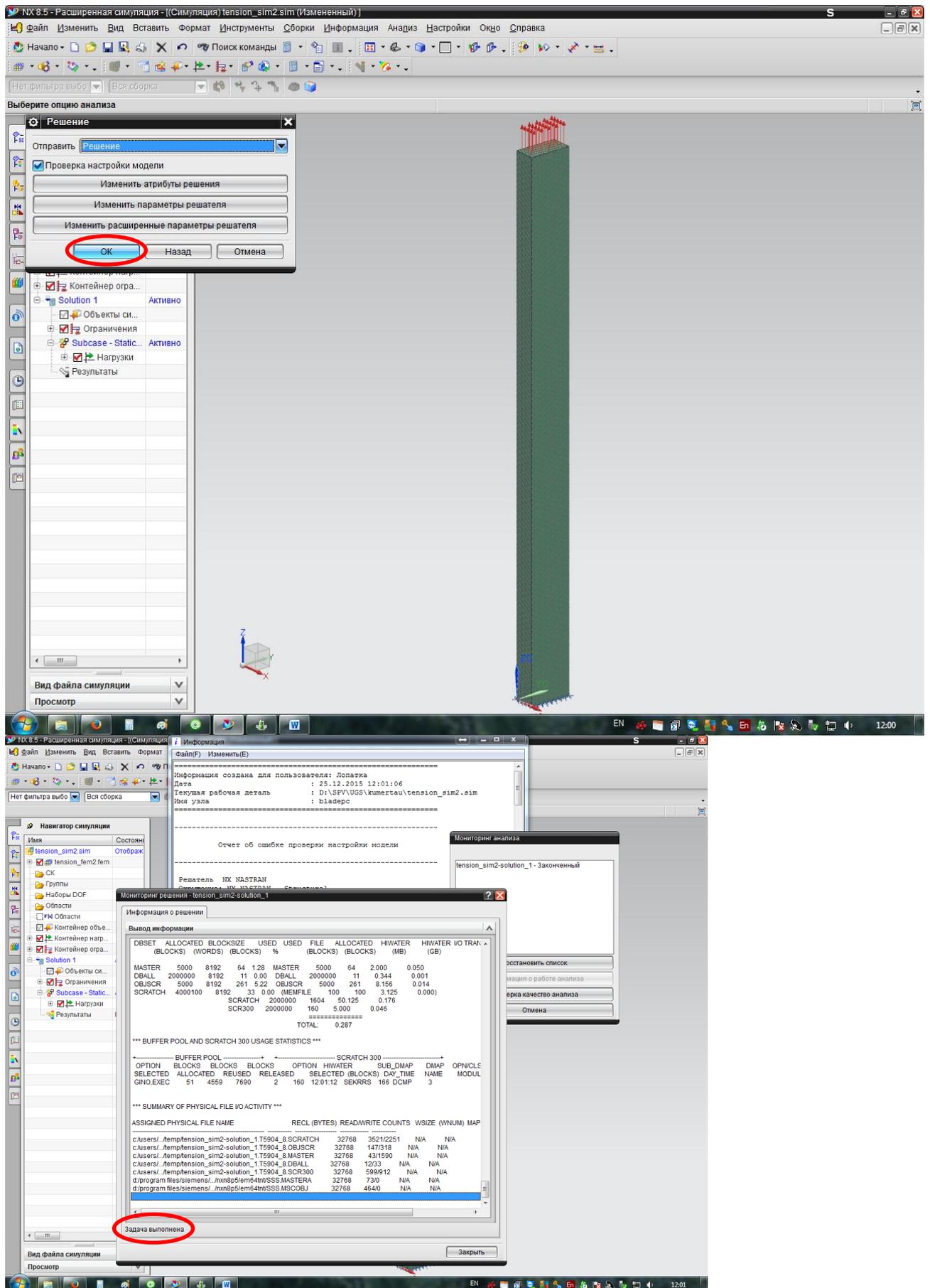
Выбираем другой торец, по которому будем осуществлять заделку. Для вращения модели можно использовать среднюю кнопку мышки (СКМ). Результат представлен ниже.



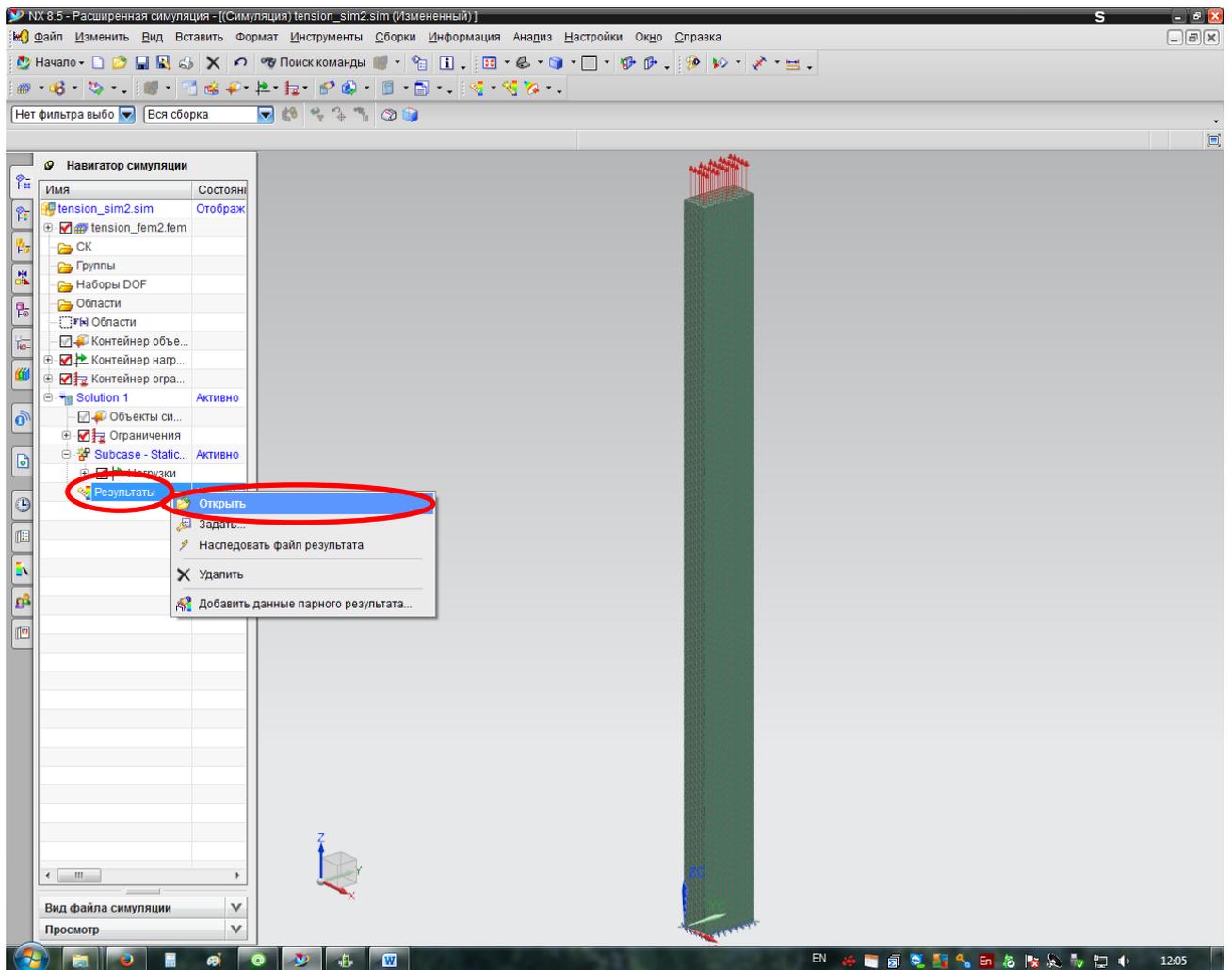
Далее решаем задачу, выбрав пункт «Решение».



При решении специфических задач в данном можно изменить некоторые параметры решателя, однако в нашем случае оставляем все, как есть.



Переходим к анализу результатов. Для этого ПКМ на пункте «Результаты» → Открыть.



Чтобы просмотреть деформационную картину стержня, выбираем «**Перемещение по узлам**» → **Z**.

**Задание:** сопоставить результаты конечно-элементного моделирования деформированного состояния с аналитически полученными данными по второй формулировке закона Гука:

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{E \cdot A}, \quad (1)$$

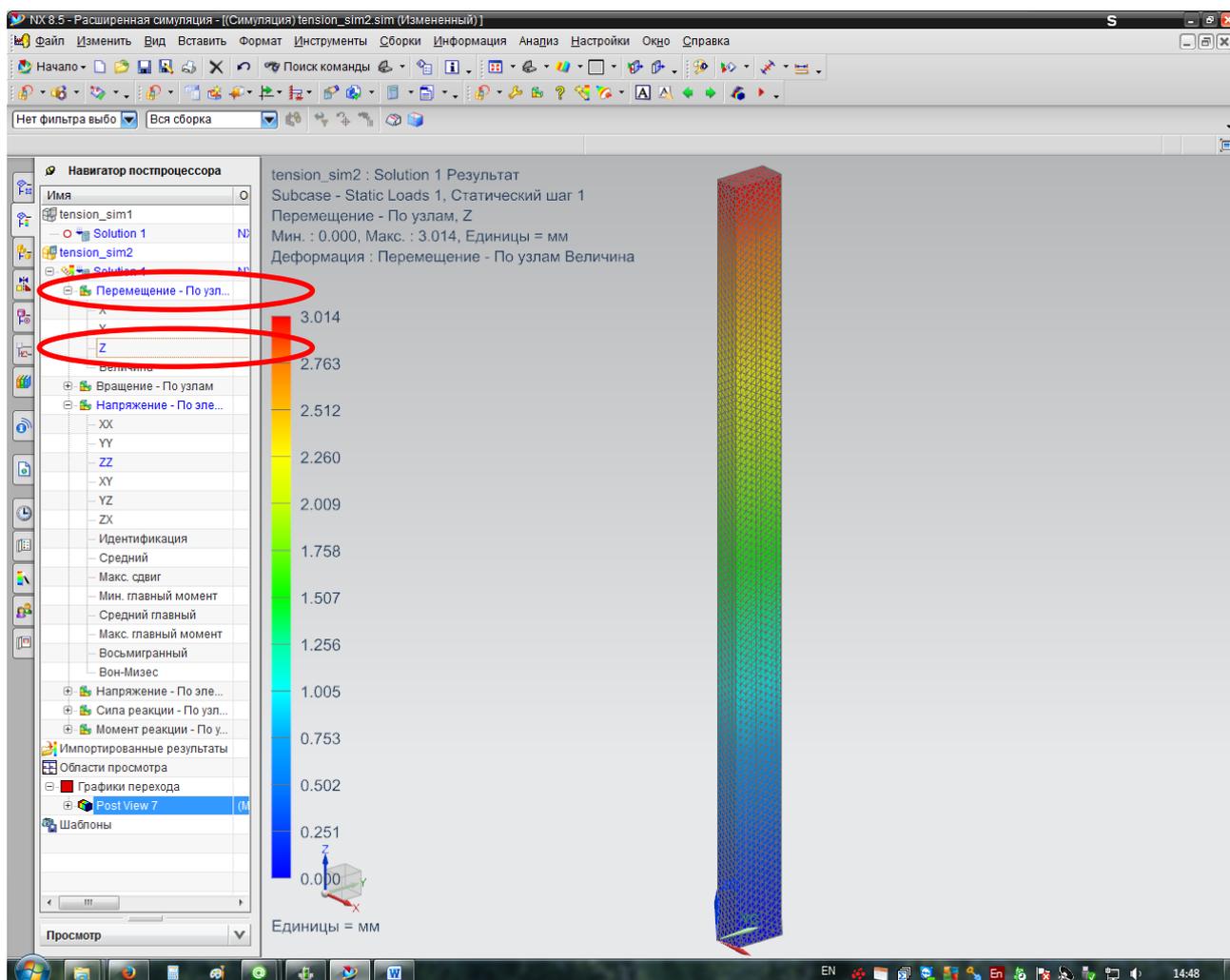
где  $\Delta l$  – абсолютное удлинение стержня;  $F$  – усилие;  $l$  – длина стержня до деформации;  $E$  – модуль упругости материала стержня;  $A$  – площадь поперечного сечения стержня.

**Подсказка!** Модуль упругости для выбранного материала посмотреть в библиотеке материалов.

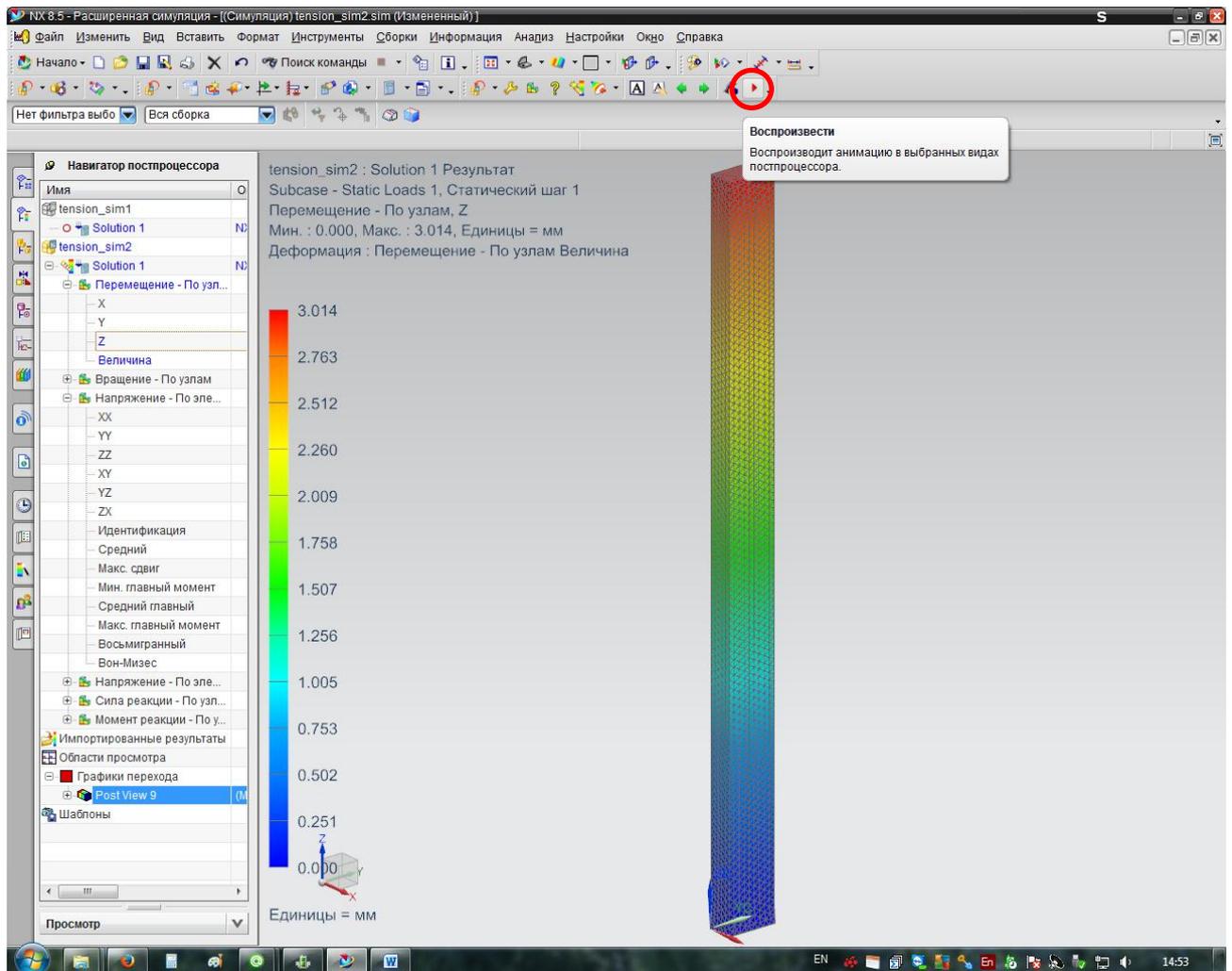
Вычислить *относительную погрешность* по формуле:

$$\delta = \frac{|\Delta l_{\text{теор}} - \Delta l_{\text{КЭ}}|}{\Delta l_{\text{теор}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

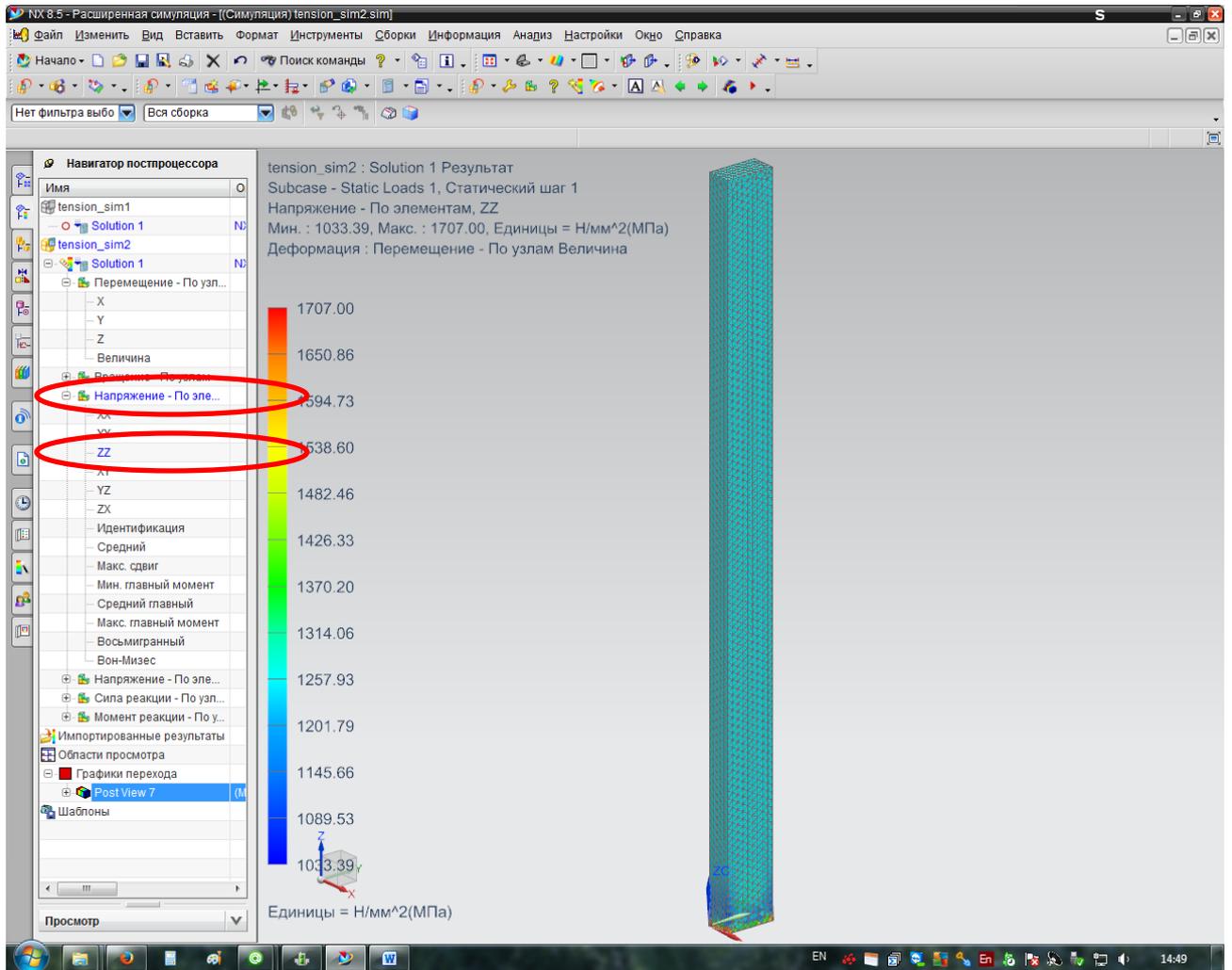
где  $\Delta l_{\text{теор}}$  и  $\Delta l_{\text{КЭ}}$  – соответственно абсолютные удлинения, полученные аналитическим и конечно-элементным способом. Максимально допустимая погрешность инженерных расчетов  $[\delta] \leq 5\%$ .



Для анимации деформаций стержня можно воспользоваться пунктом «Воспроизвести».



Чтобы просмотреть напряженное состояние стержня, выбираем «Напряжения по элементам» → ZZ.



Вблизи заделки имеет место концентрация напряжений вследствие влияния граничных условий.

**Задание:** определить *коэффициент концентрации напряжений* в заделке по формуле:

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{сред}}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальные напряжения в заделке;  $\sigma_{\text{сред}}$  – средние напряжения в стержне на некотором отдалении от заделки.

Средние напряжения в стержне вычисляются по формуле:

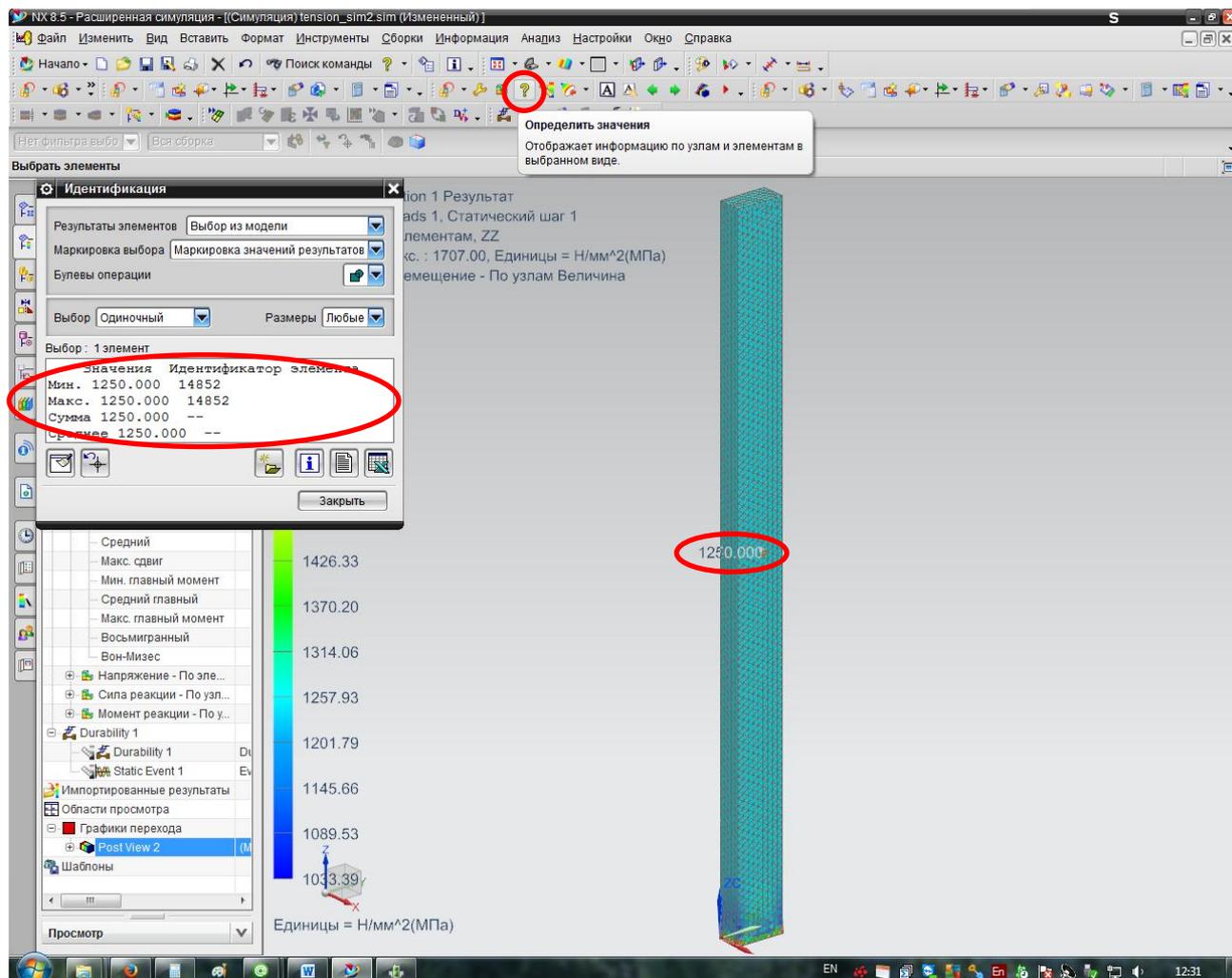
$$\sigma_{\text{сред}} = \frac{F}{A}, \quad (4)$$

$F$  – усилие;  $A$  – площадь поперечного сечения стержня.

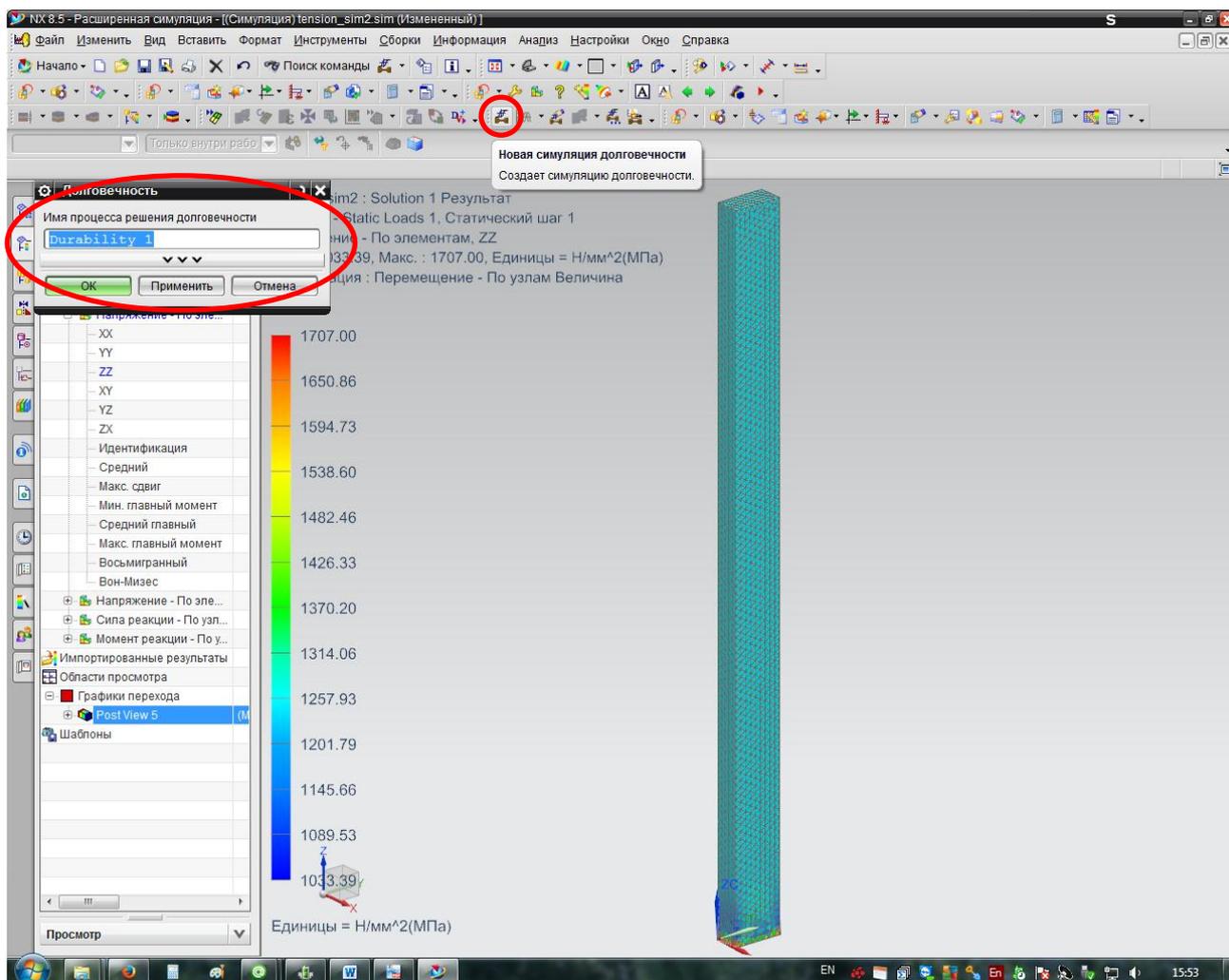
**Задание:** сопоставить *результаты* конечно-элементного моделирования напряженного состояния по средним напряжениям с аналитически полученными данными по формуле (4).

Чтобы отобразить напряжения в любом элементе, выбираем пункт «**Определить значения**» и нажимаем ЛКМ на интересующий нас элемент.

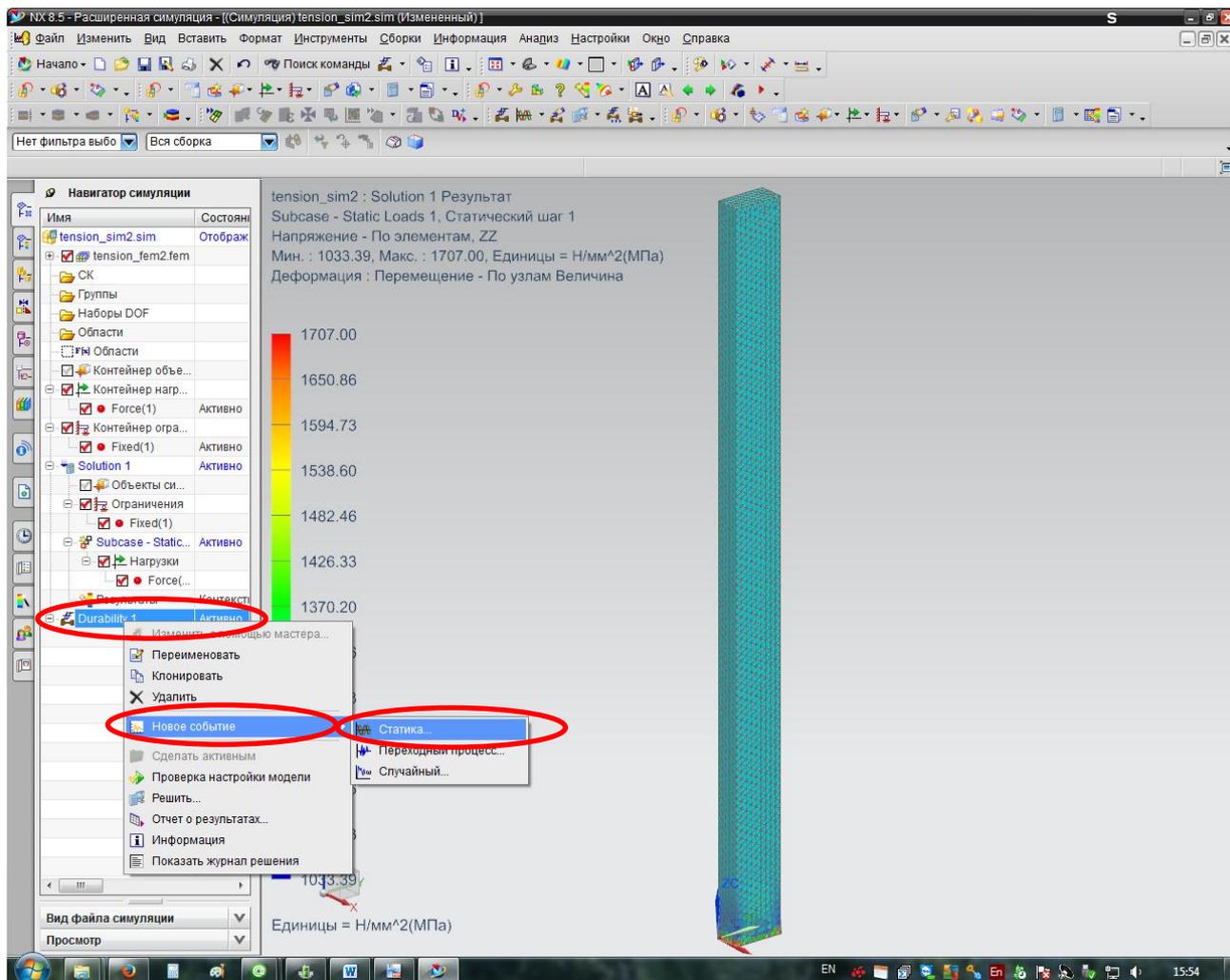
Вычислить *относительную погрешность* средних напряжений по формуле (2).



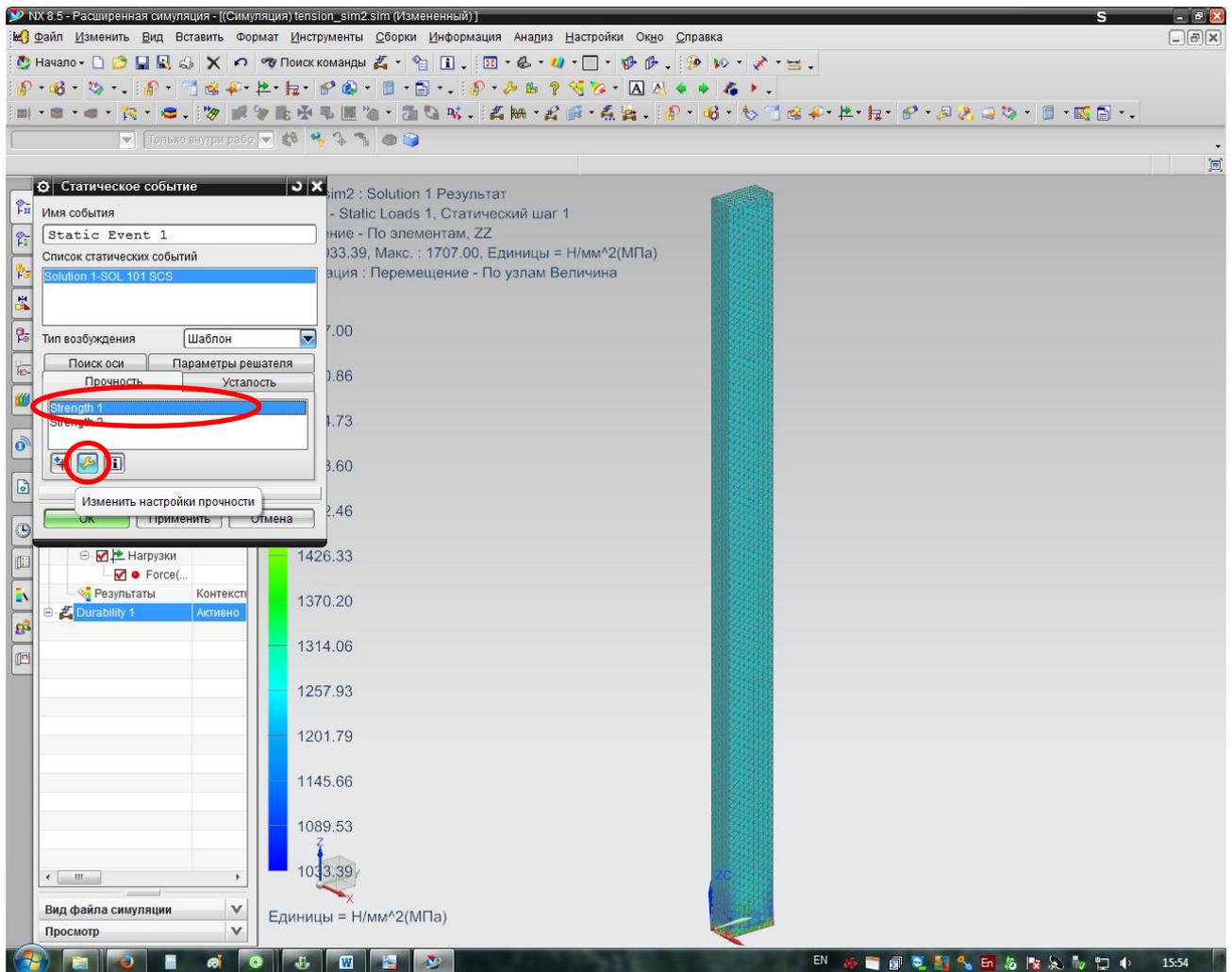
Для оценки прочности необходимо выбрать пункт «Новая симуляция долговечности».



Добавляем «Новое событие» → Статика в модуль оценки прочности.



Необходимо проверить правильность выбора критериев прочности. Для этого выбираем **Strength 1** → **Изменить настройки прочности**.



Для оценки прочности пластичных материалов в качестве предельного напряжения рекомендуется пользоваться **пределом текучести**. В соответствии с IV-й теорией прочности, дающей хорошие результаты для пластичных материалов, эквивалентные напряжения **по Мизесу** определяются по формуле:

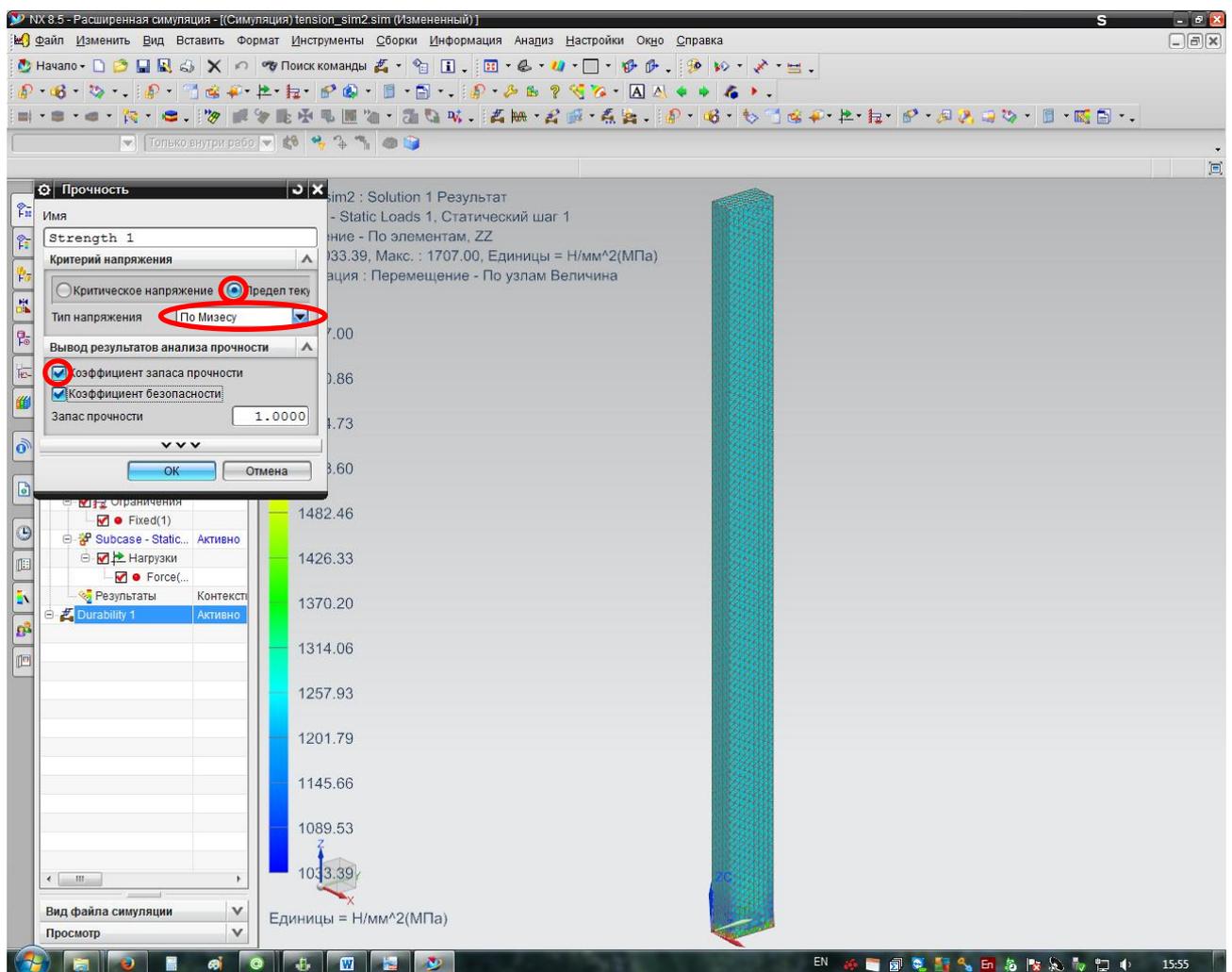
$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (5)$$

или

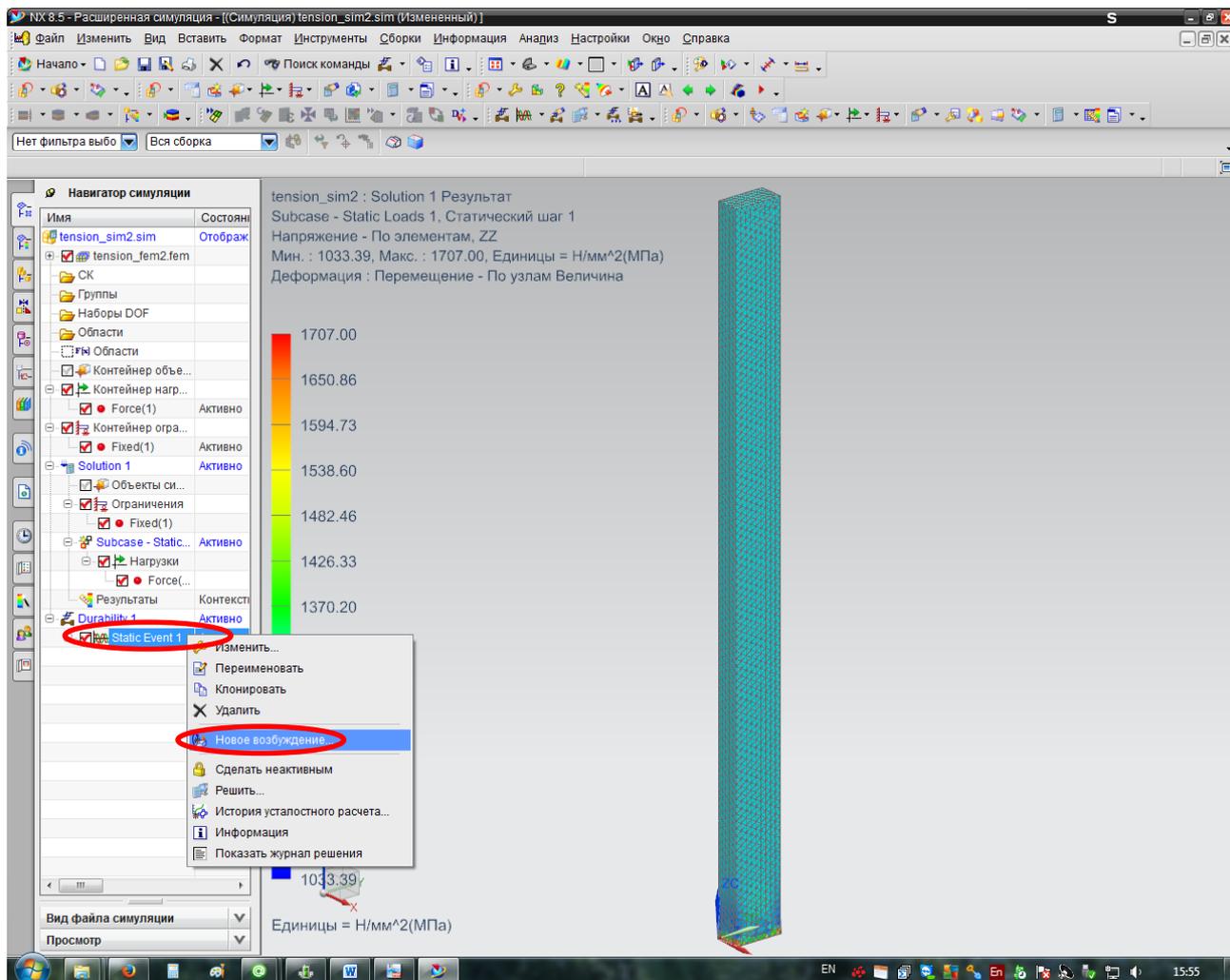
$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}, \quad (6)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  – соответственно нормальные и касательные напряжения в произвольной системе координат.

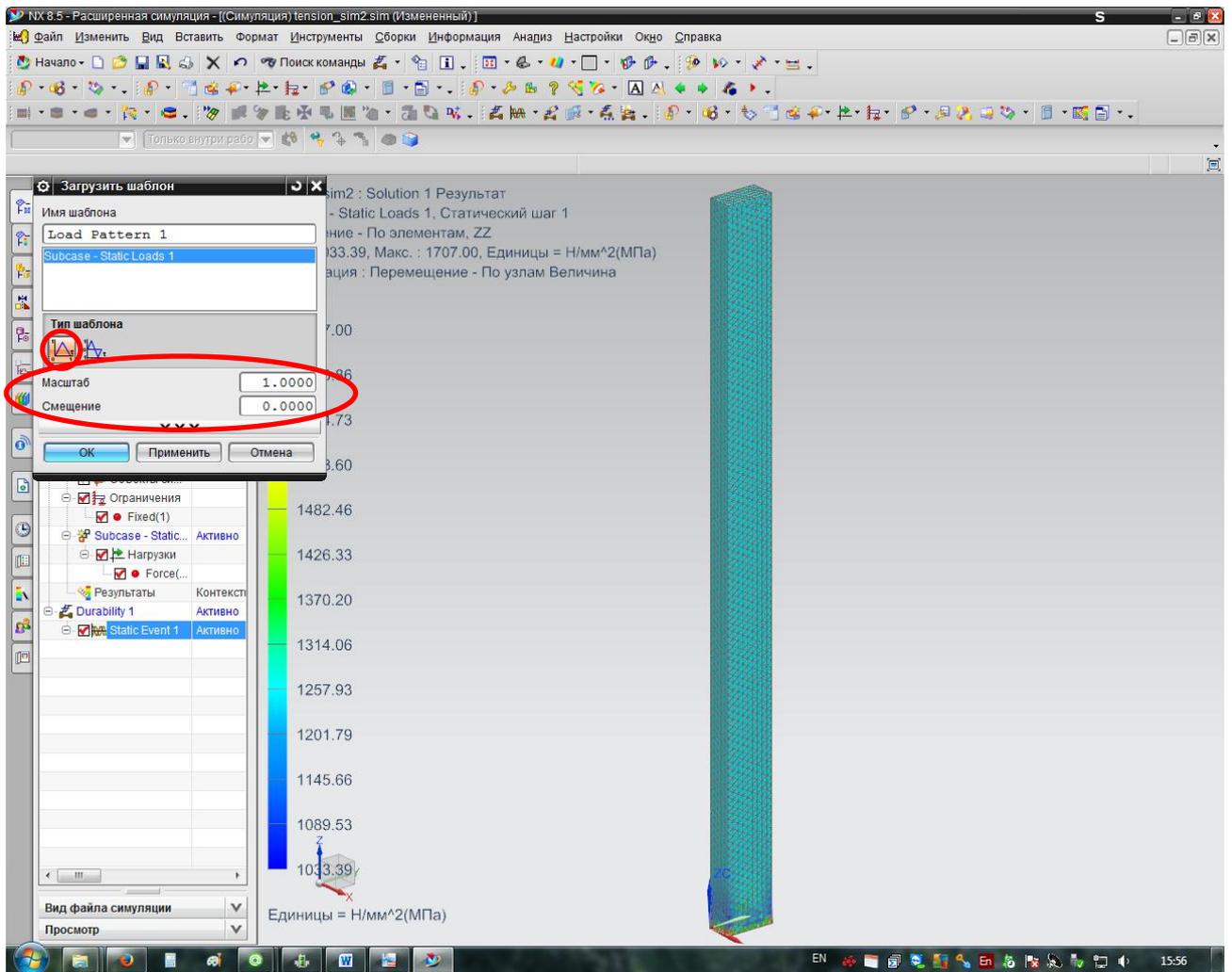
Выбираем галочкой также пункт «Коэффициент запаса прочности».



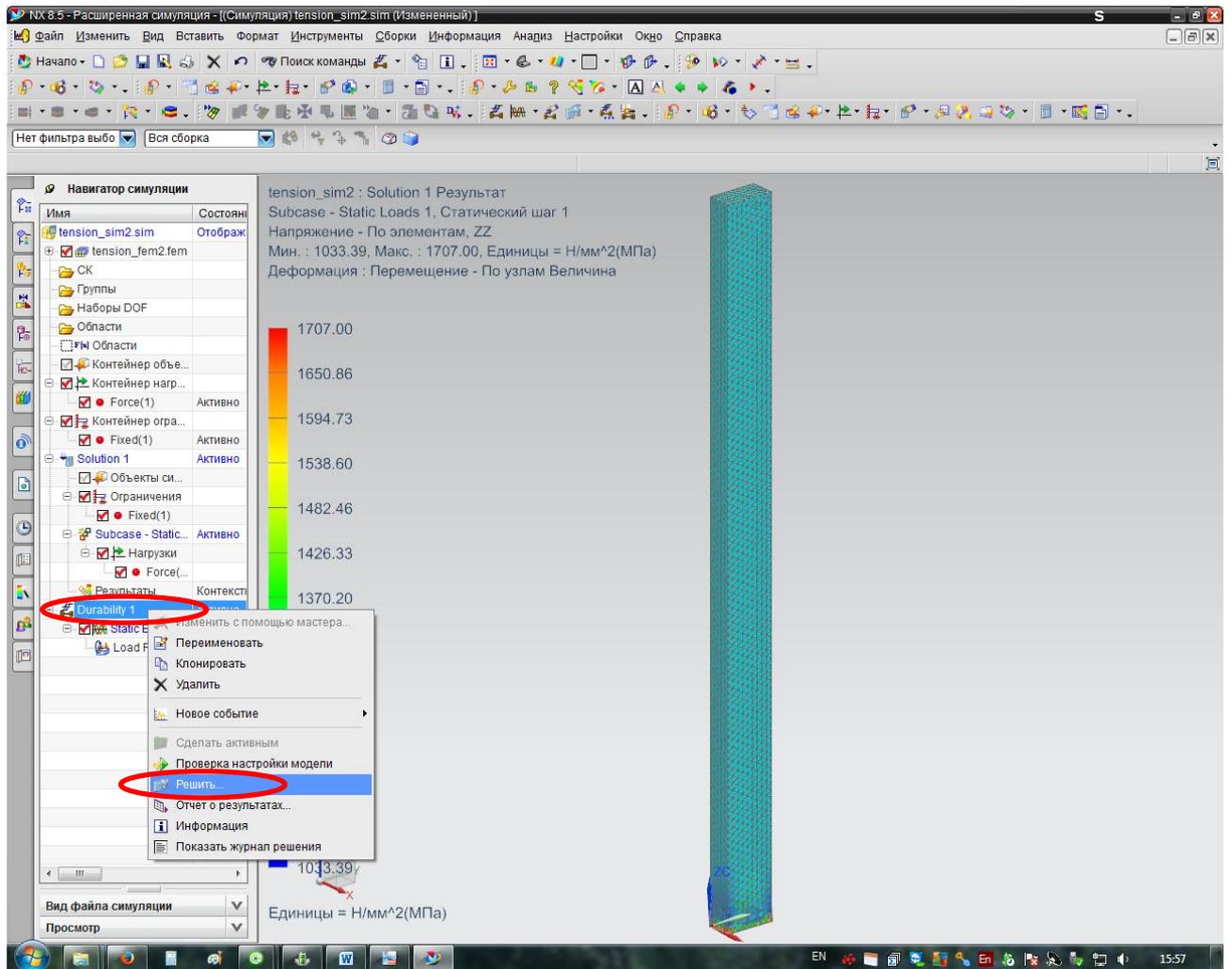
Добавляем характер действующей нагрузки: **Static Event** → **Новое возбуждение**.



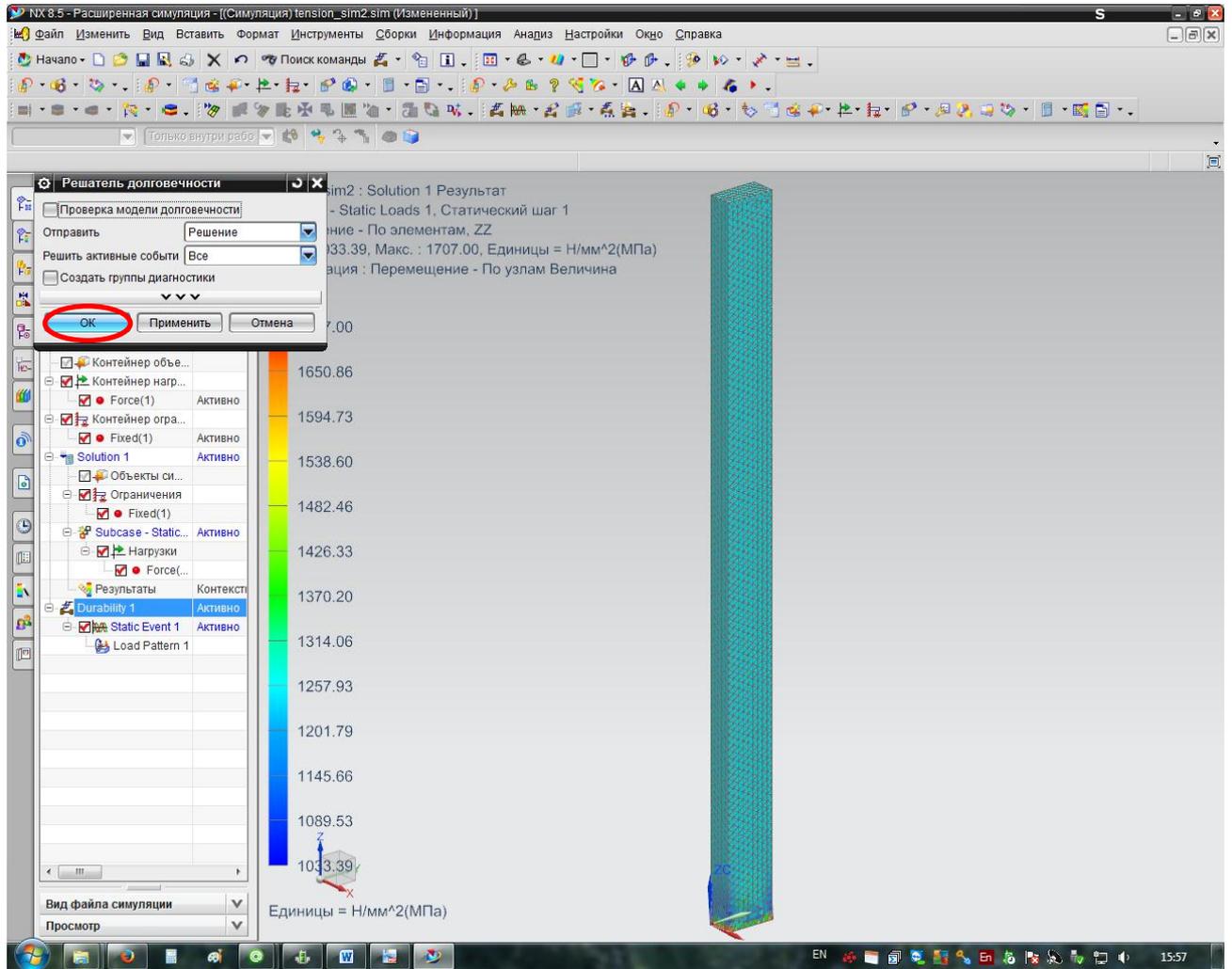
Выставляем следующие параметры: **Тип шаблона – Цикл половины единицы;**  
**Масштаб = 1;** **Смещение = 0.**



Производим оценку прочности: **Durability** → Решить.



Далее нажимаем ОК.



Переходим в результаты и оцениваем запас прочности стержня **Durability** → **Коэффициент запаса прочности – по элементам.**

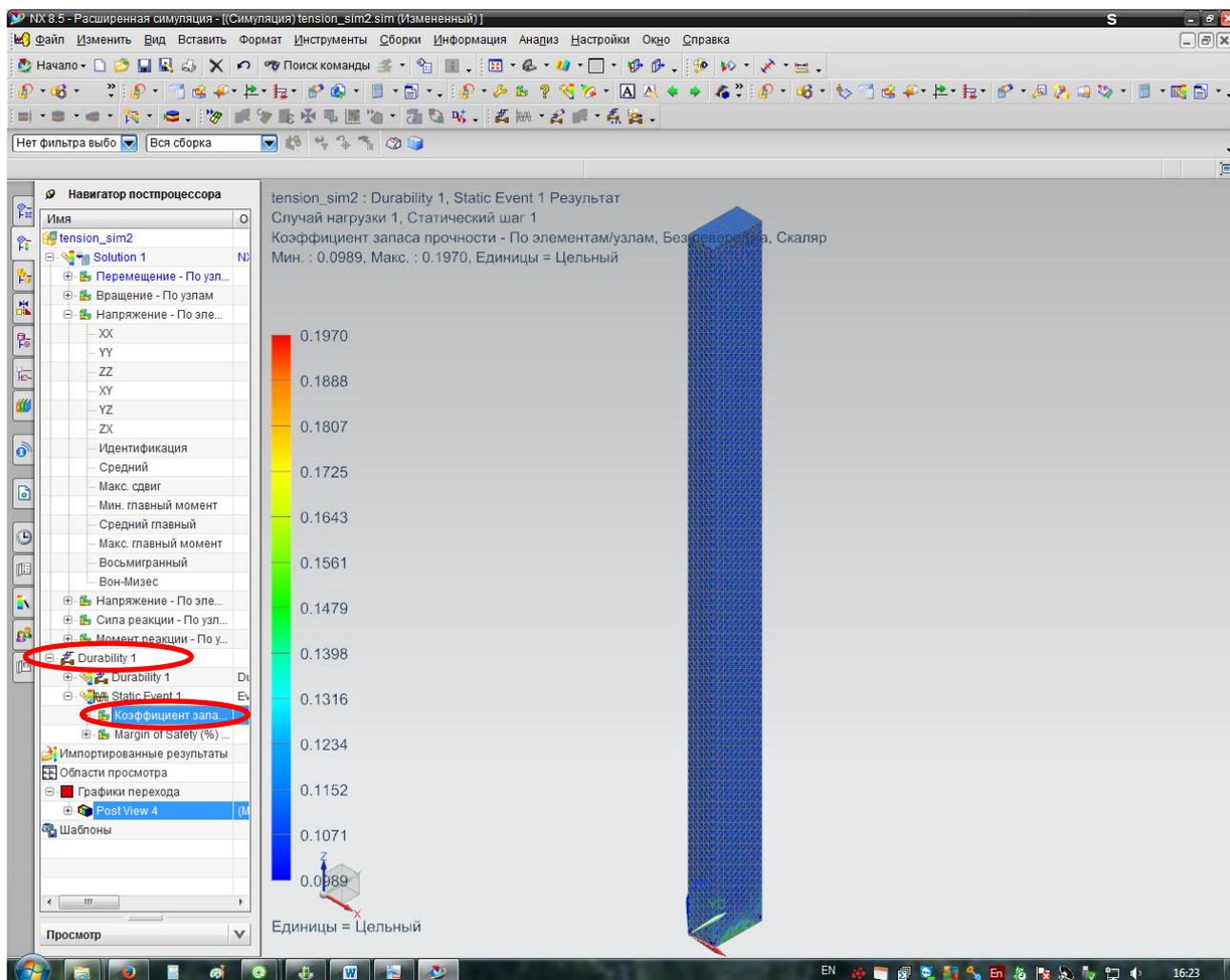
**Задание:** определить *коэффициент запаса прочности* по средним напряжениям по формуле:

$$n = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\text{сред}}}, \quad (7)$$

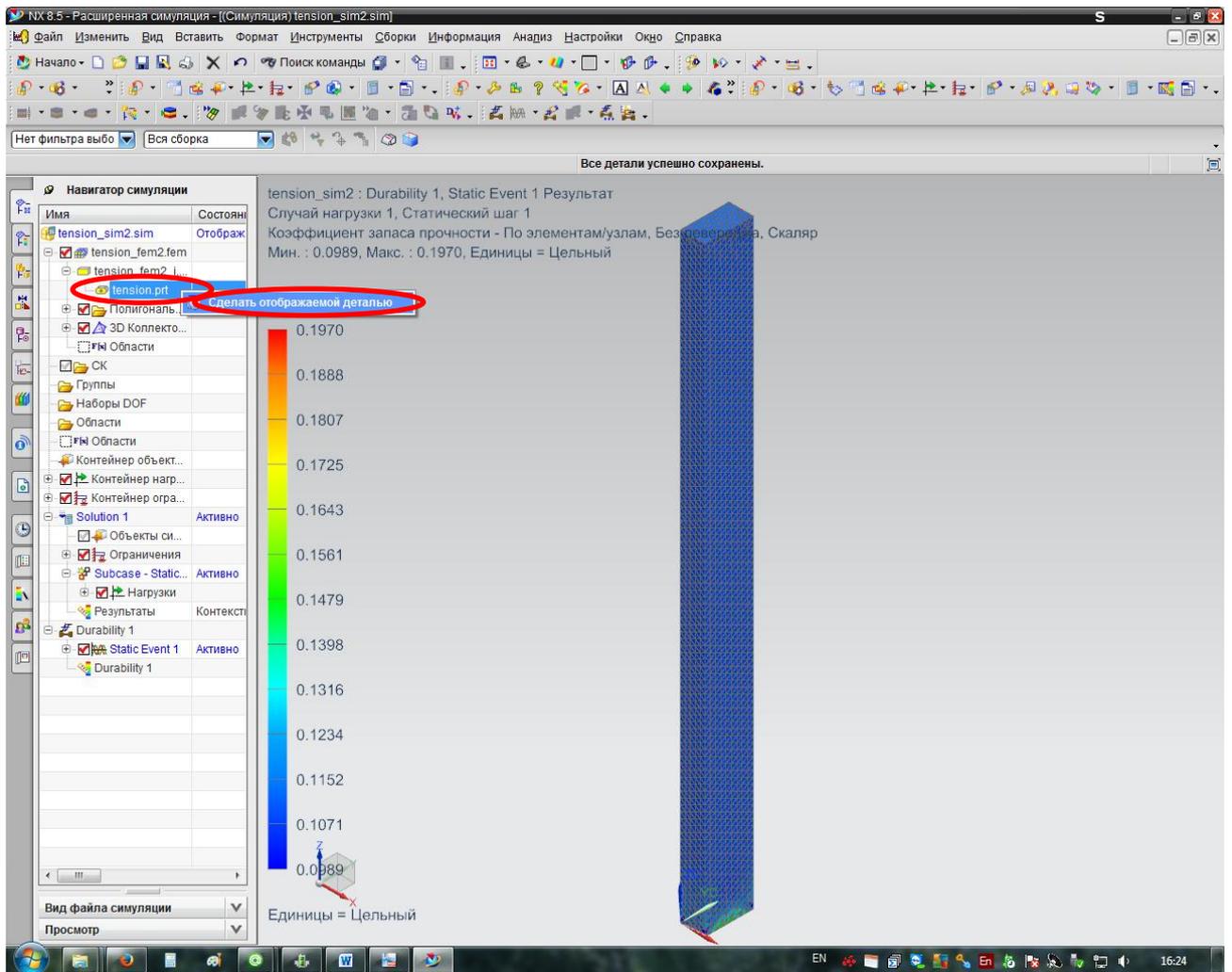
где  $\sigma_T$  – предел текучести материала;  $\sigma_{\text{сред}}$  – средние напряжения в стержне на некотором отдалении от заделки. Рекомендованные значения коэффициента запаса прочности для пластичных материалов  $[n] = 1,5 \div 2,5$ .

**Подсказка!** Предел текучести для выбранного материала посмотреть в библиотеке материалов.

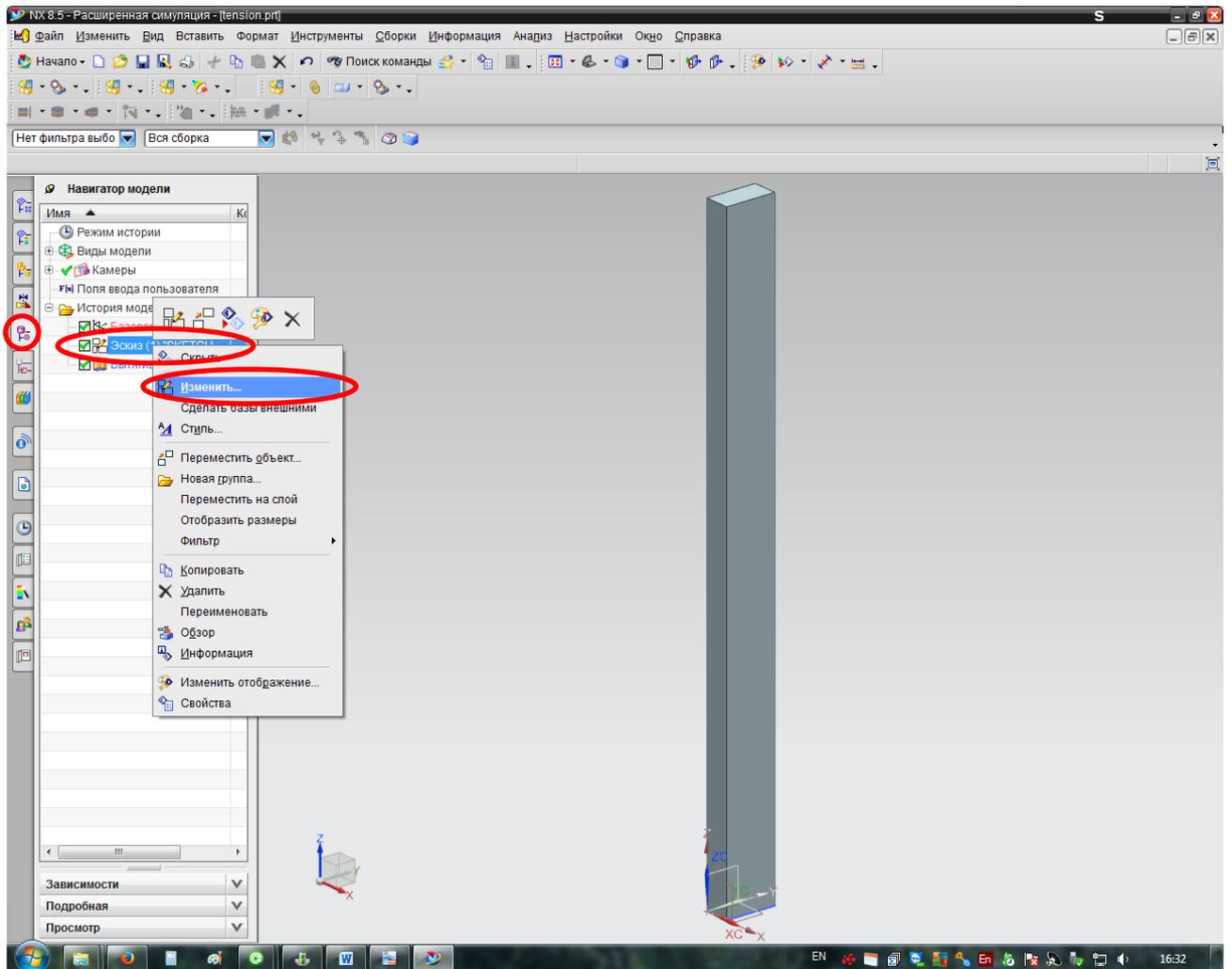
**Задание:** на основе анализа коэффициента запаса прочности необходимо сделать выводы о прочности стержня и, в случае необходимости, принять мероприятия по обеспечению запаса прочности.



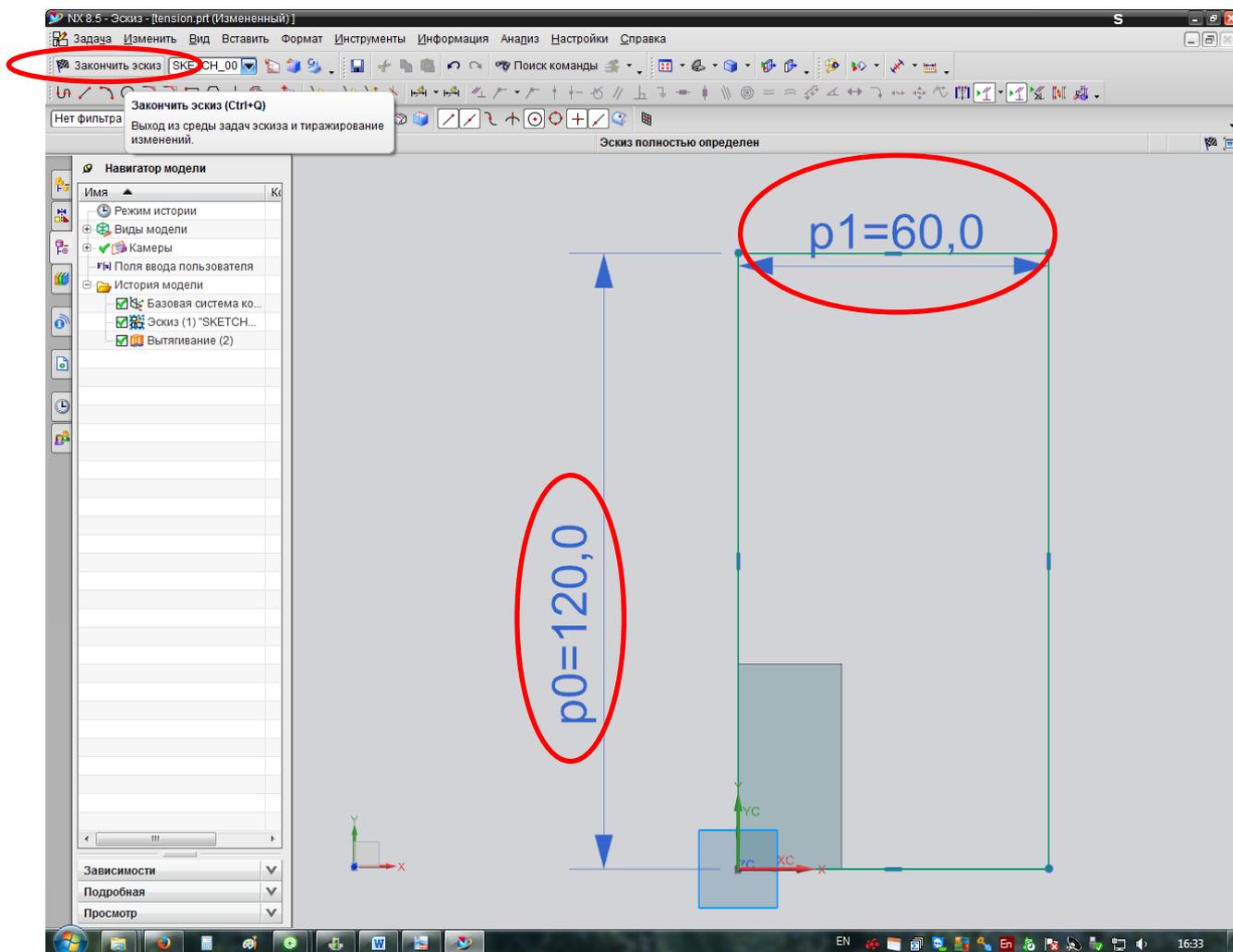
Чтобы изменить геометрию изделия, необходимо сделать модель отображаемой деталью.



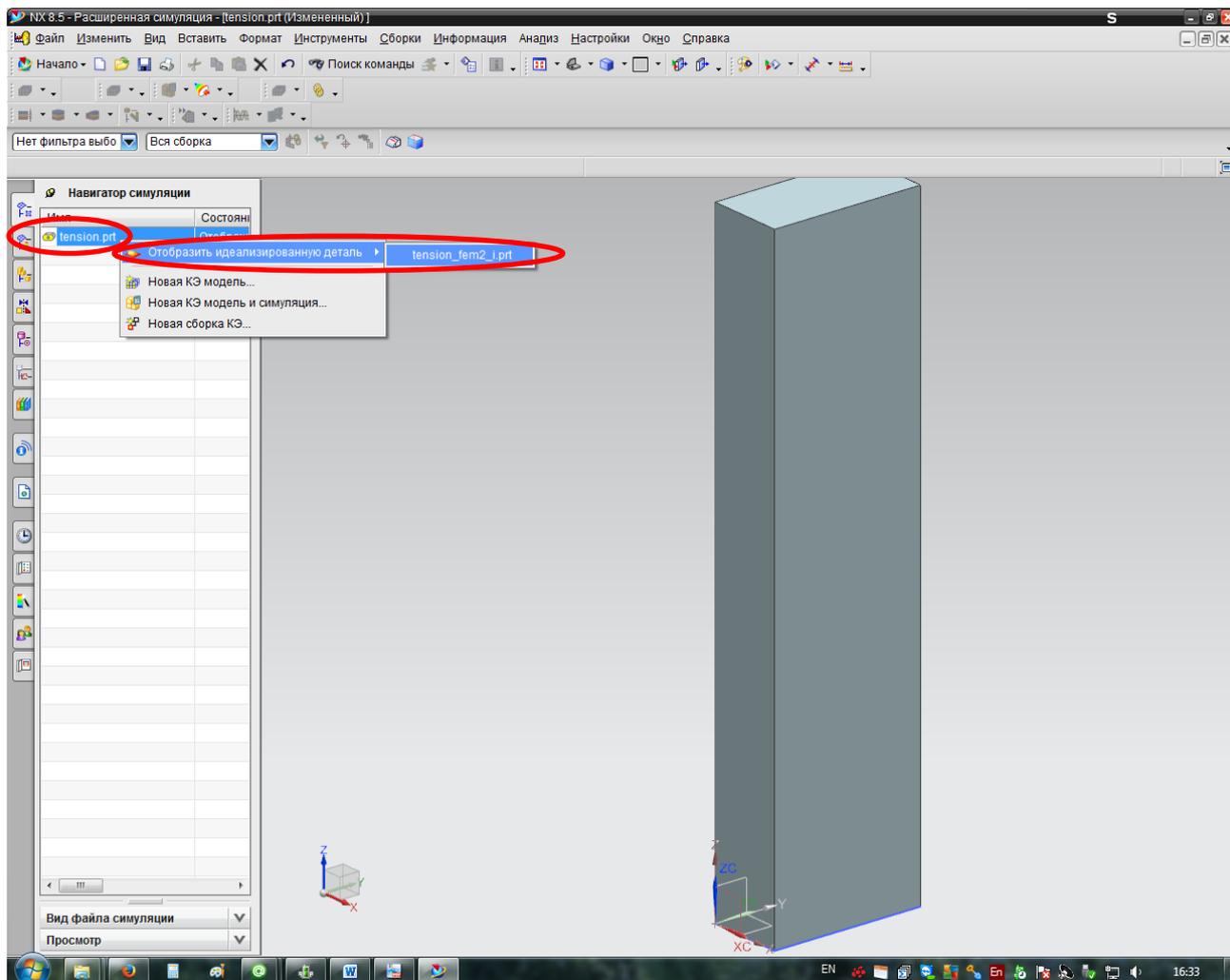
Далее изменяем эскиз.



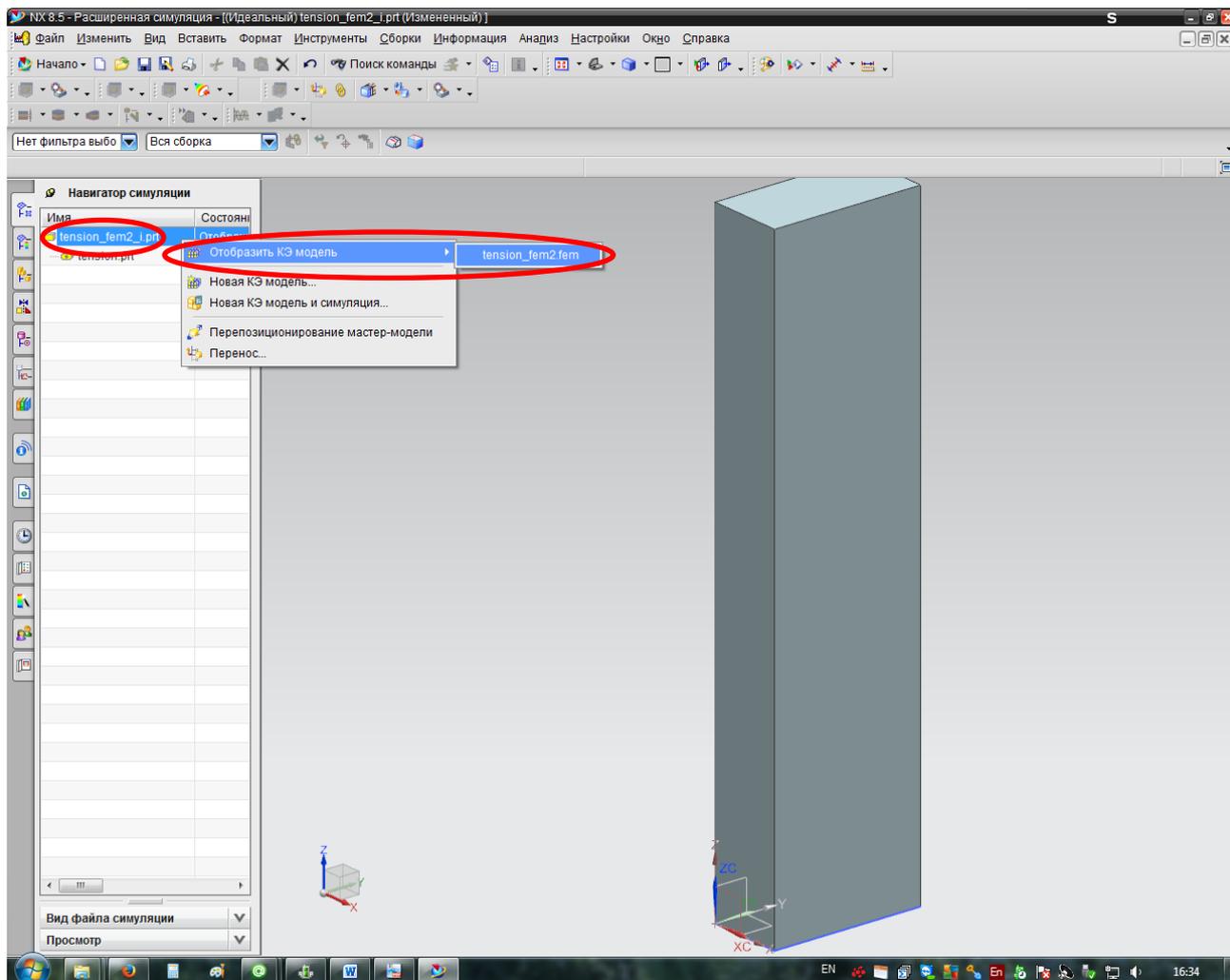
При изменении эскиза необходимо сохранять заданное соотношение между толщиной и шириной стержня  $\frac{h}{b} = 2$ . После окончания нажимаем кнопку «Закончить эскиз».



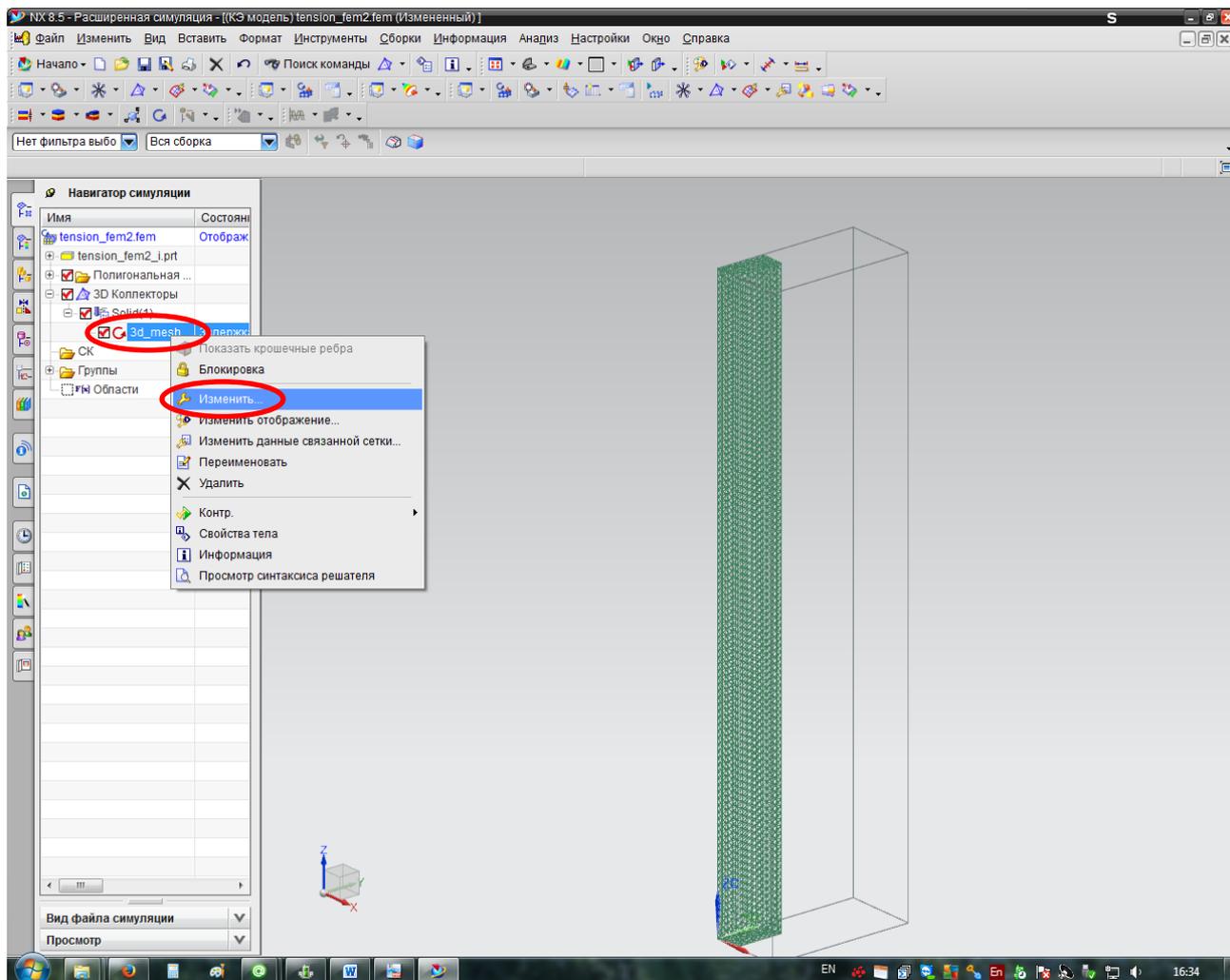
Возвращаемся к симуляции.



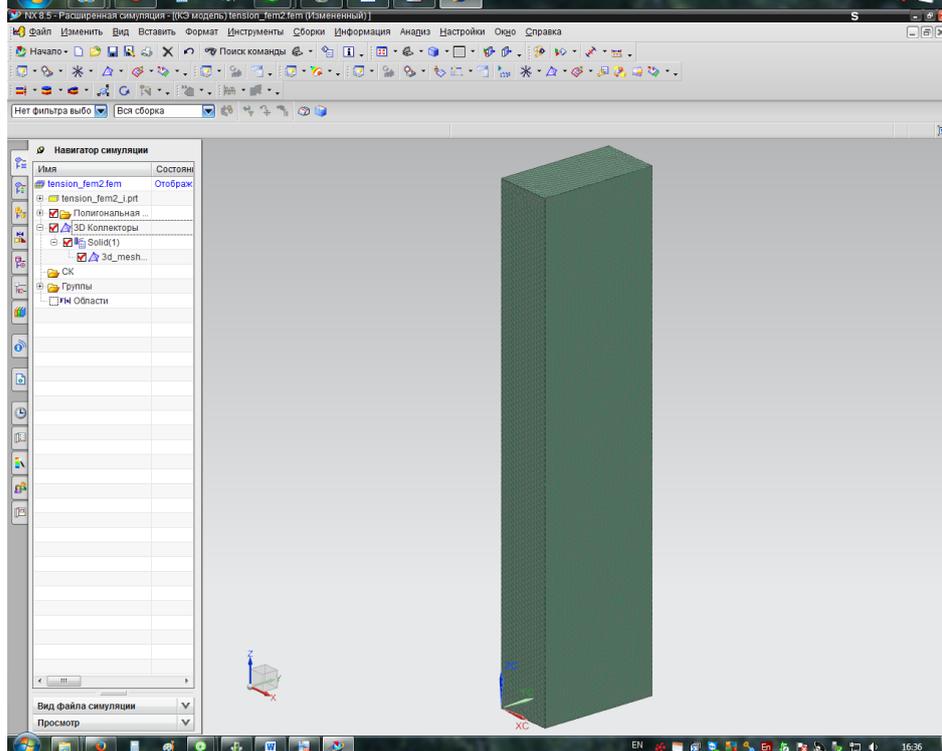
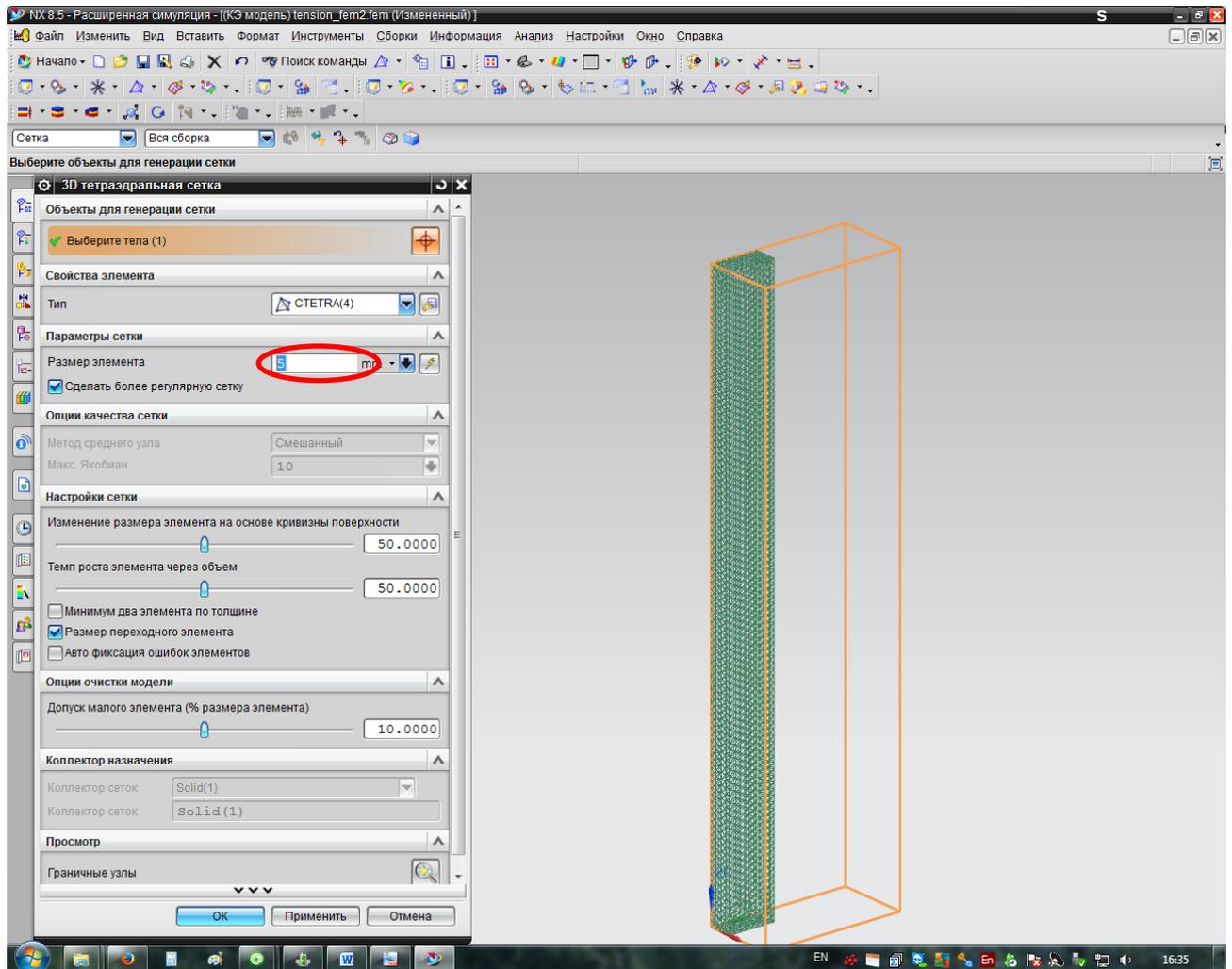
Возвращаемся к КЭ модели.



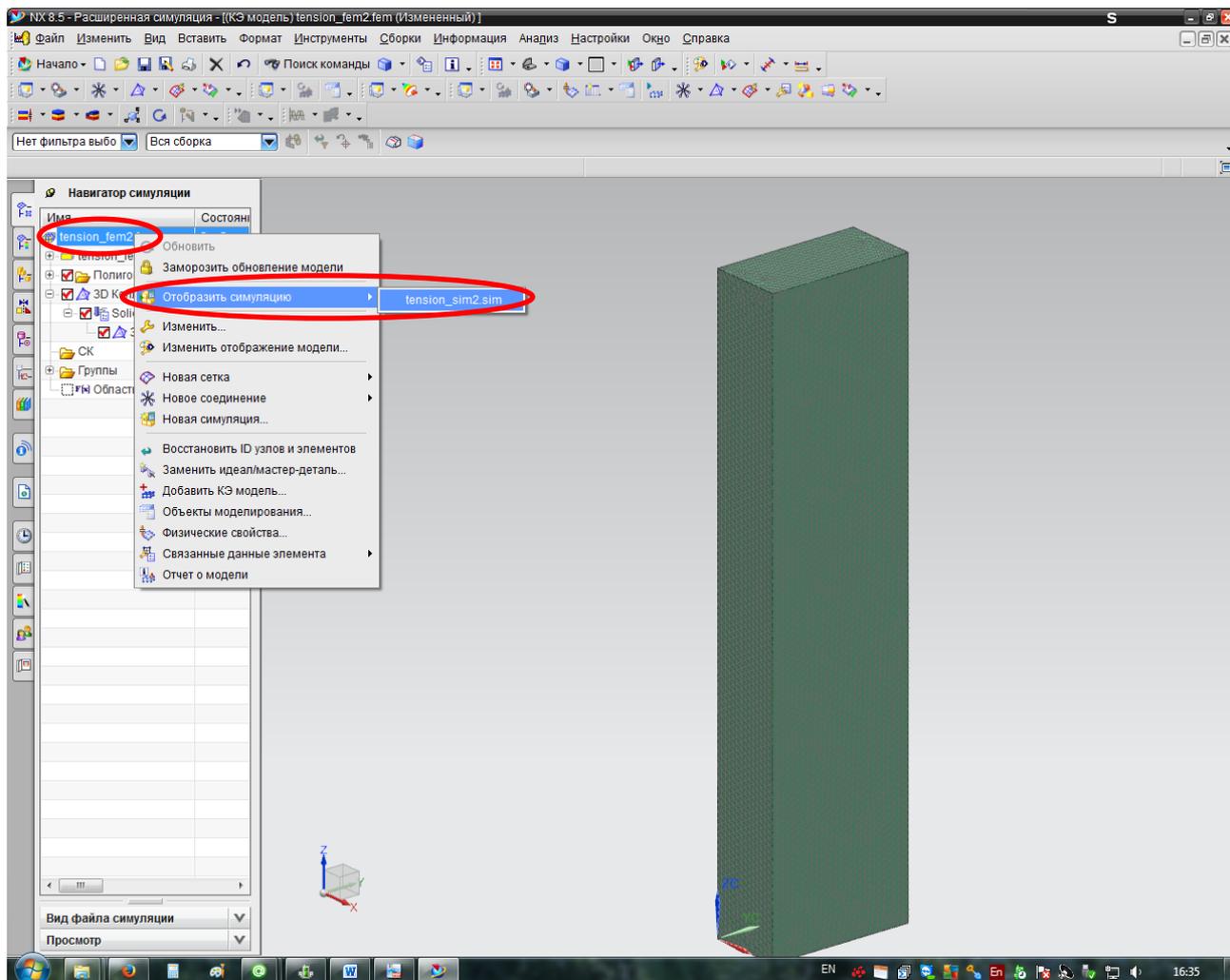
Производим повторное построение КЭ сетки.



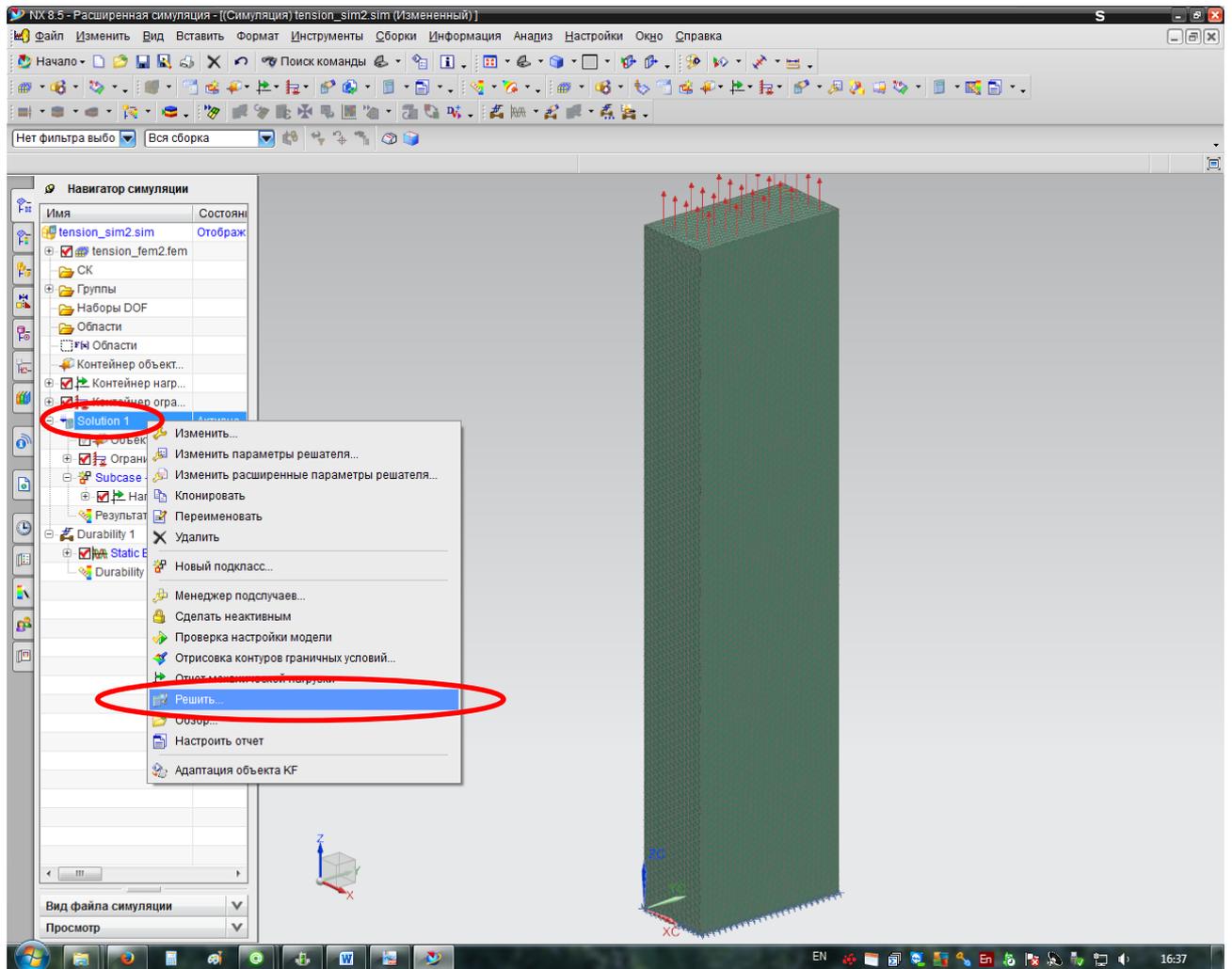
Действия с сеткой производим аналогично вышеописанным. Целесообразно является некоторое укрупнение размера элемента (10-15мм) для сохранения быстроты расчетов на высоком уровне.



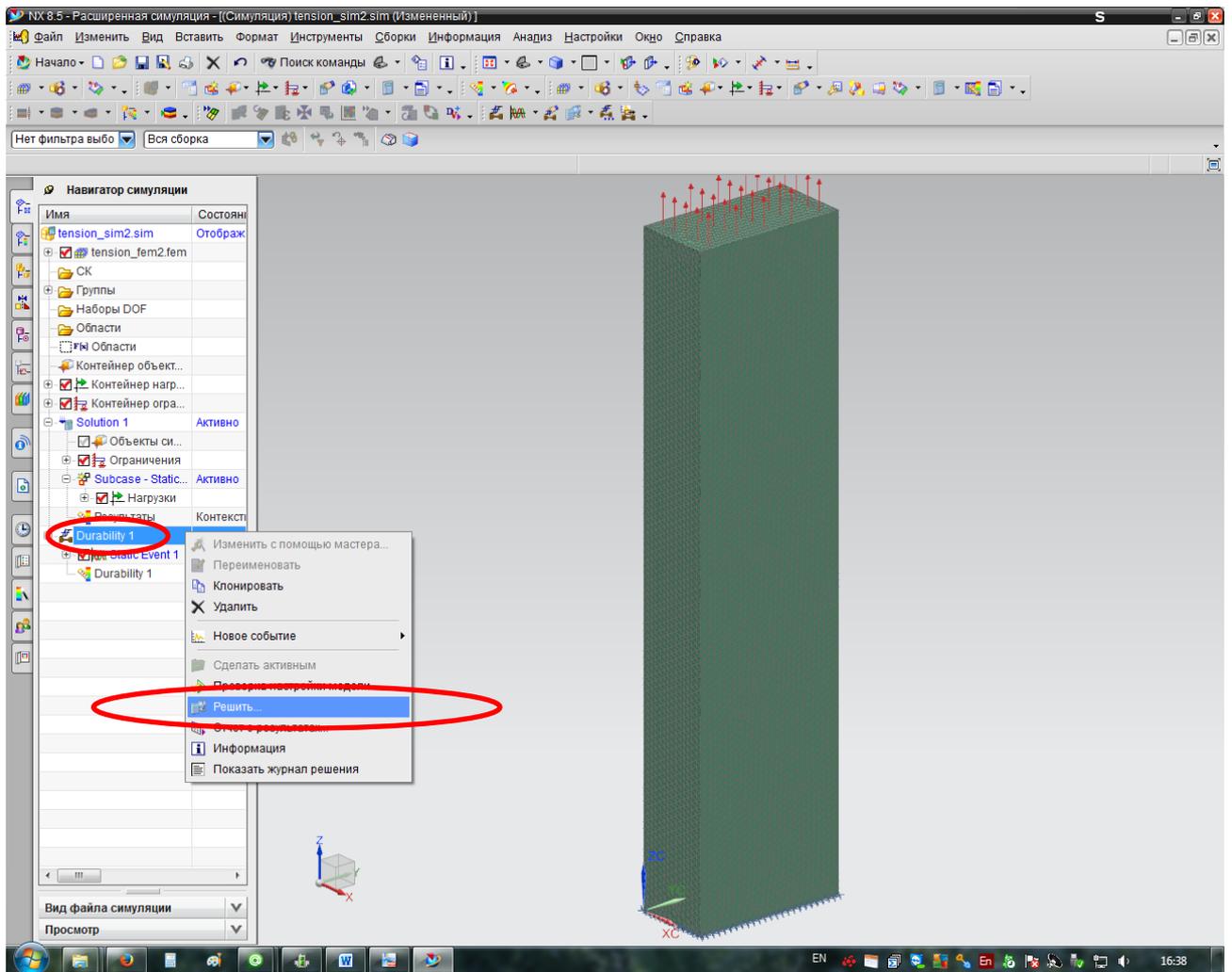
Возвращаемся в симуляцию.



Производим повторное решение задачи.



Проводим повторную оценку прочности.



Оцениваем коэффициенты запаса прочности и делаем вывод о прочности стержня.

**Задание:** провести мероприятия по обеспечению запаса прочности стержня в диапазоне  $[n] = 1,5 \div 2,5$ .

