

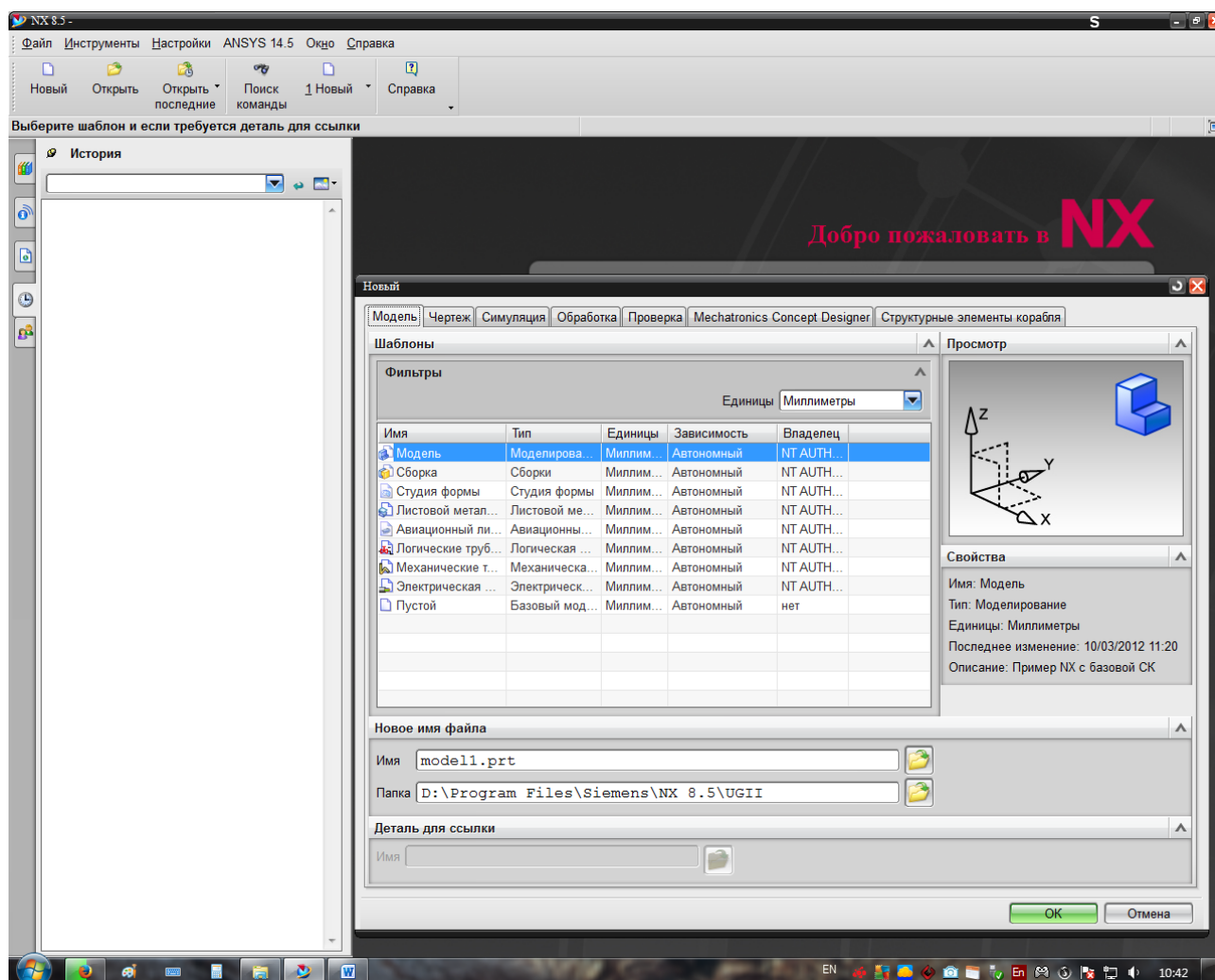
## Лабораторная работа №2

### РАСЧЕТ ВАЛА НА ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ ПРИ КРУЧЕНИИ

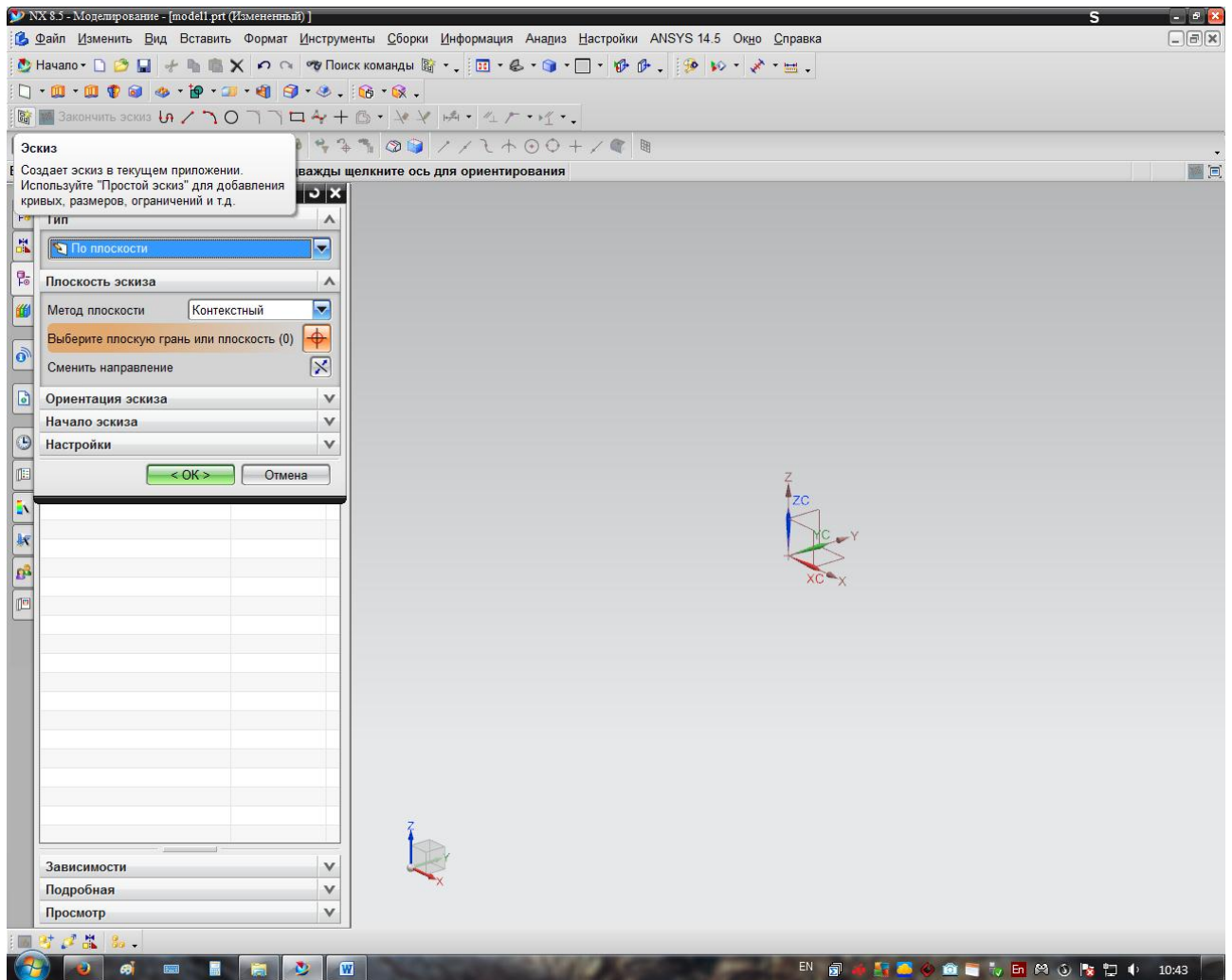
**Цель работы:** произвести проверочный и проектировочный расчеты вала на прочности и жесткость при кручении.

**Замечание:** все используемые в лабораторной работе опции программного комплекса Unigraphics NX 8.5 подробно описаны в **лабораторной работе №1**, здесь приводятся лишь основные пункты расчета с краткими пояснениями и отличия расчетов на прочность и жесткость при кручении от аналогичных при растяжении. При любых неясностях рекомендуется обратиться к **лабораторной работе №1**.

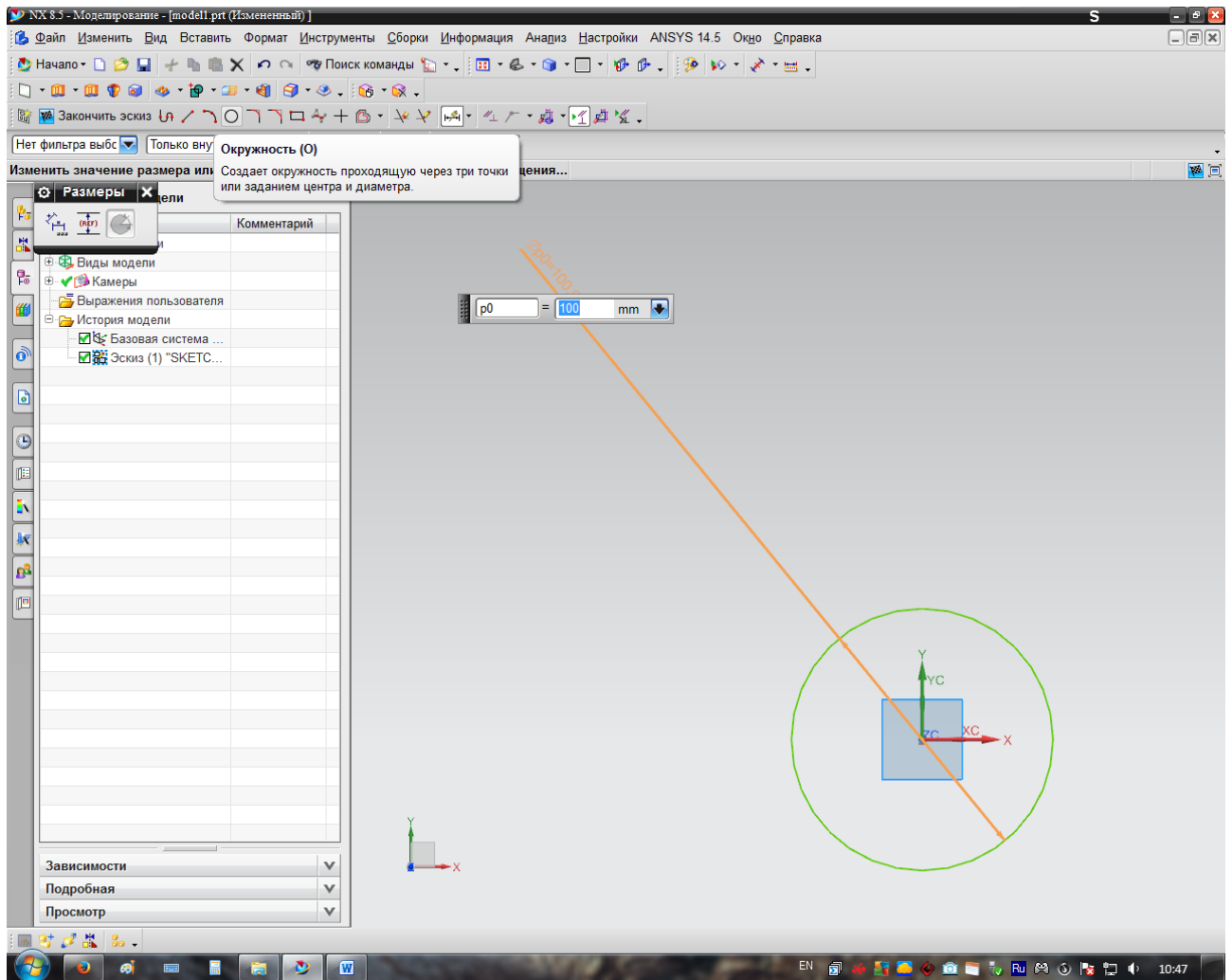
Создаем новую модель.



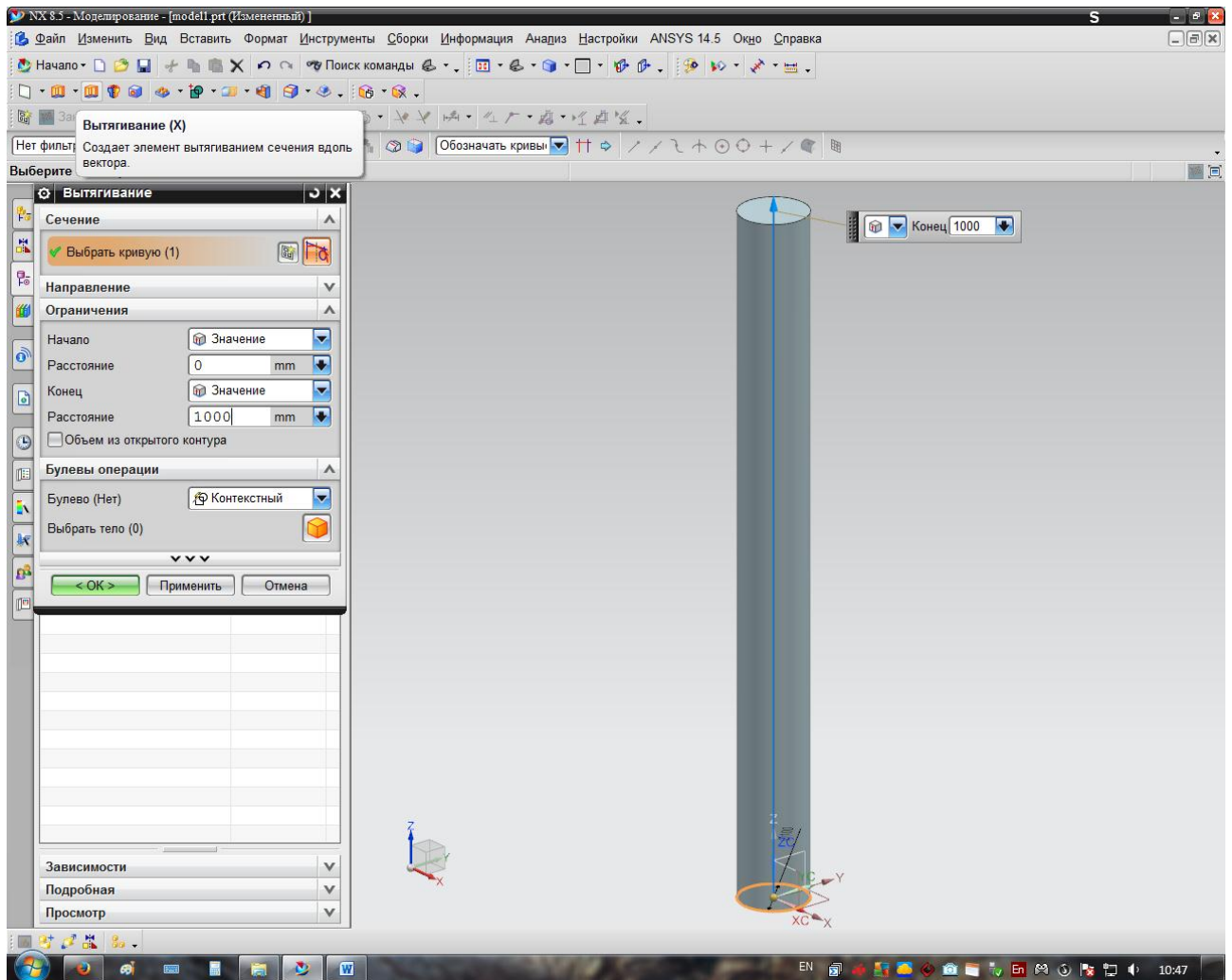
Рисуем эскиз поперечного сечения вала.



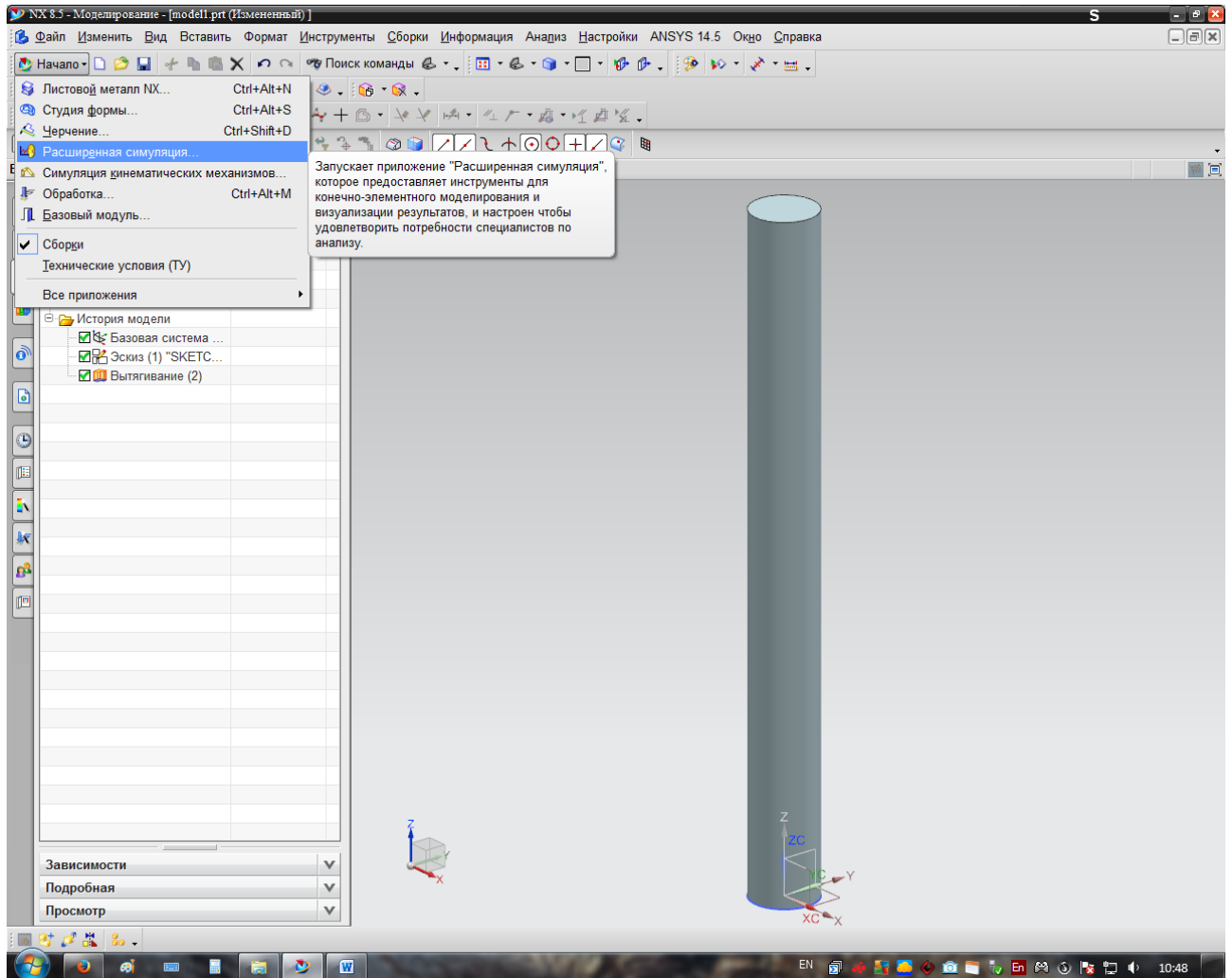
Диаметр вала при проверочном расчете  $D = 100$  мм.



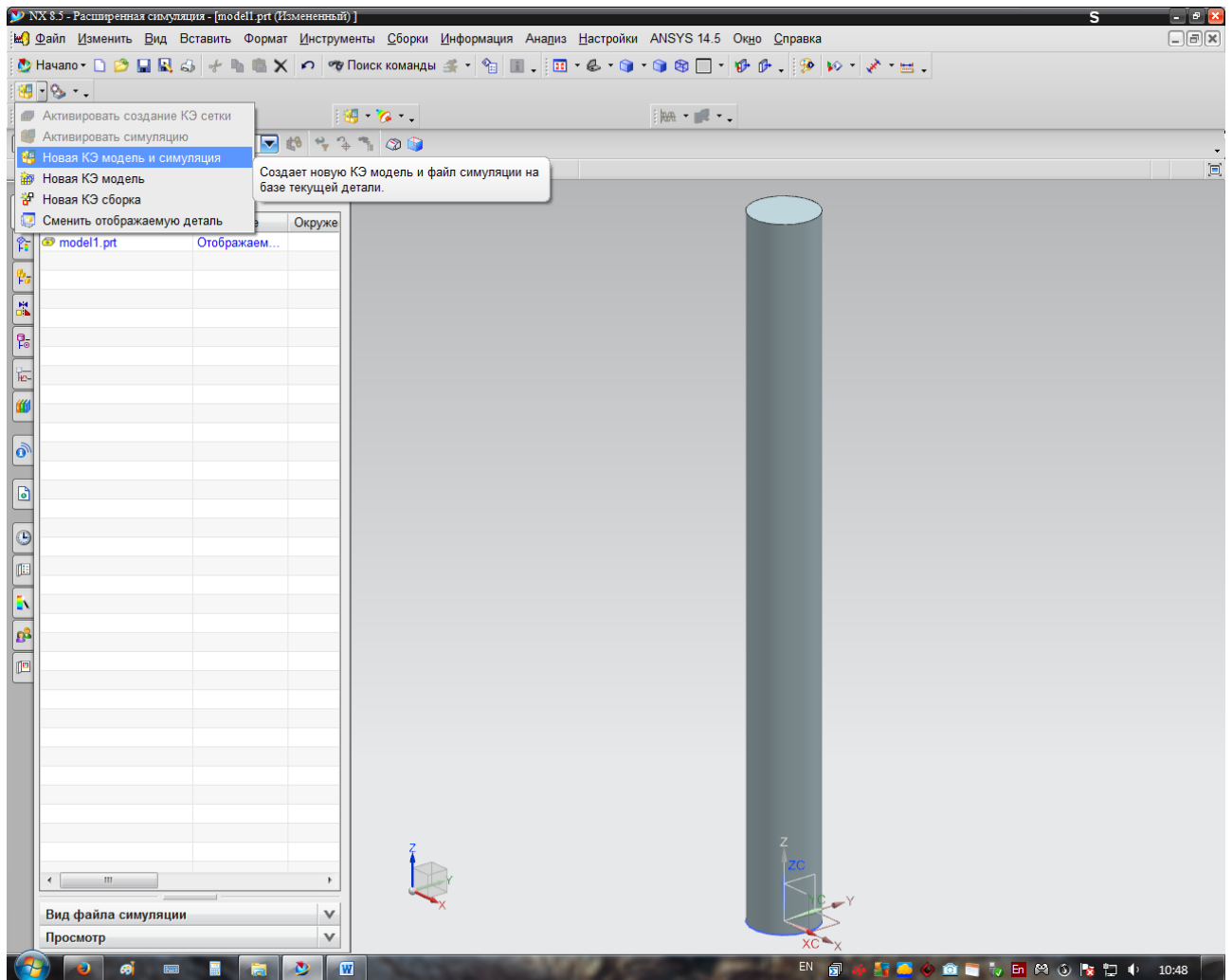
С помощью операции «Вытягивание» строим трехмерную модель вала.  
Длина вала  $l = 1$  м.



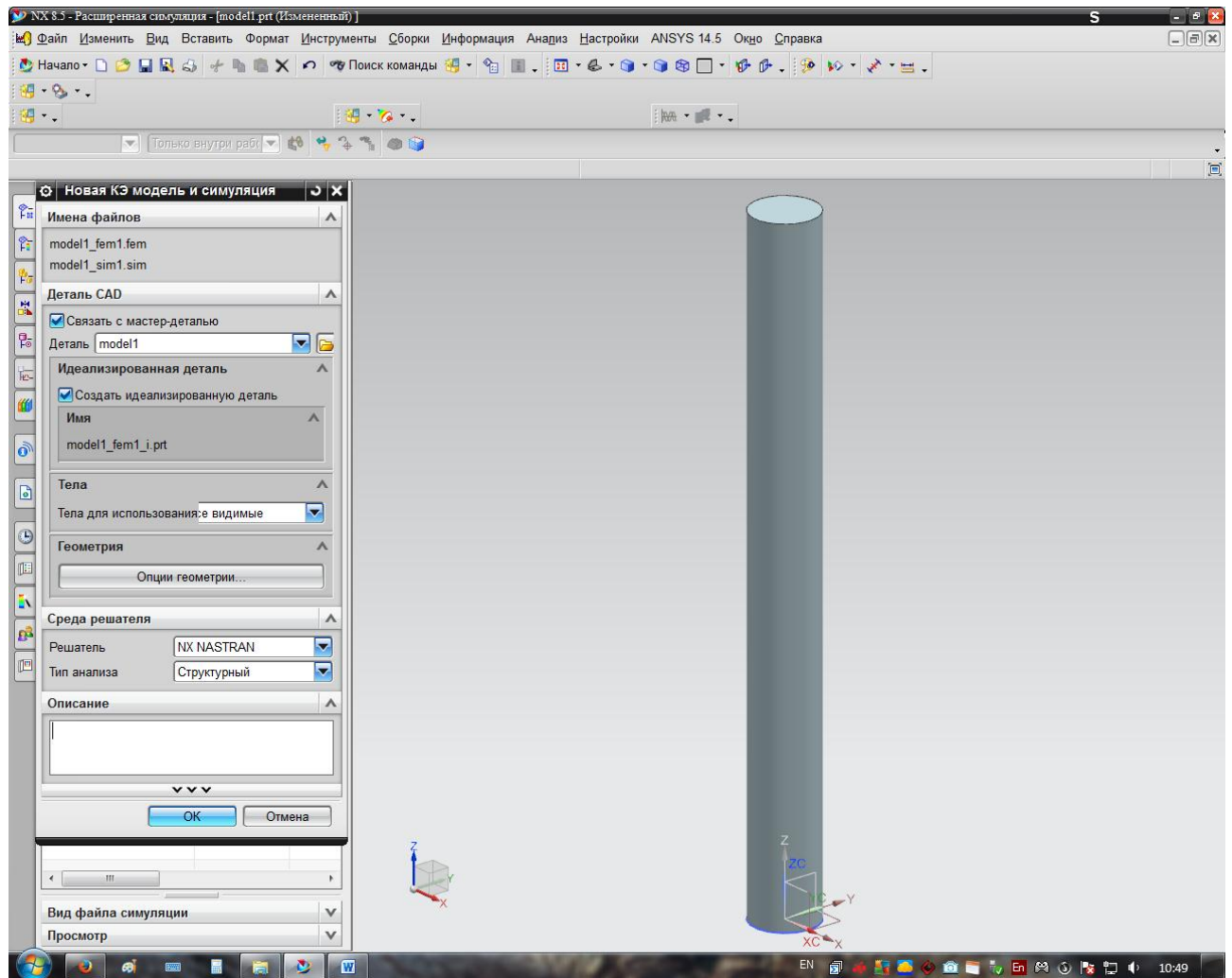
Переходим в симуляцию.



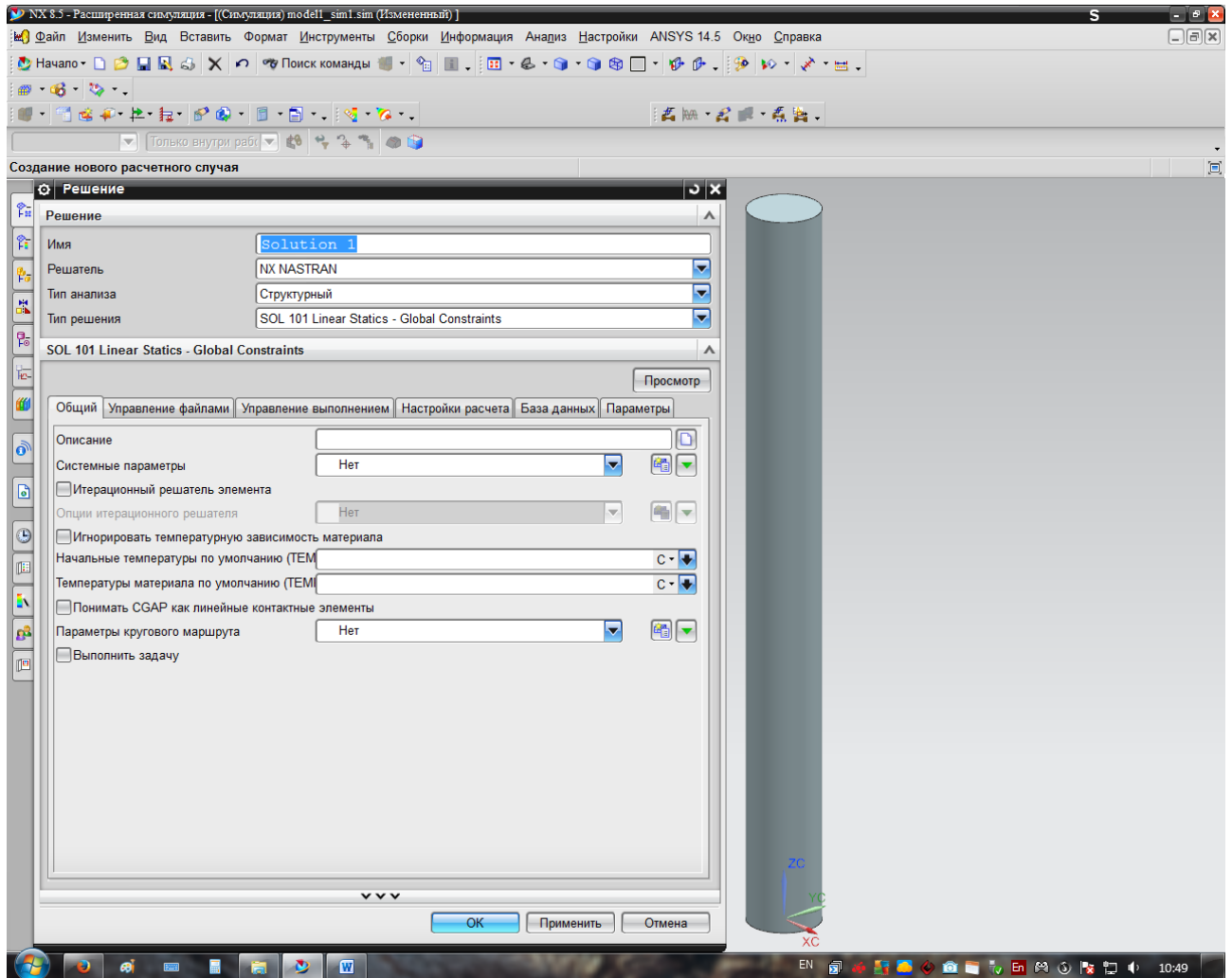
Создаем новую конечно-элементную модель и симуляцию.



Задаем: решатель – NASTRAN, тип анализа – структурный.

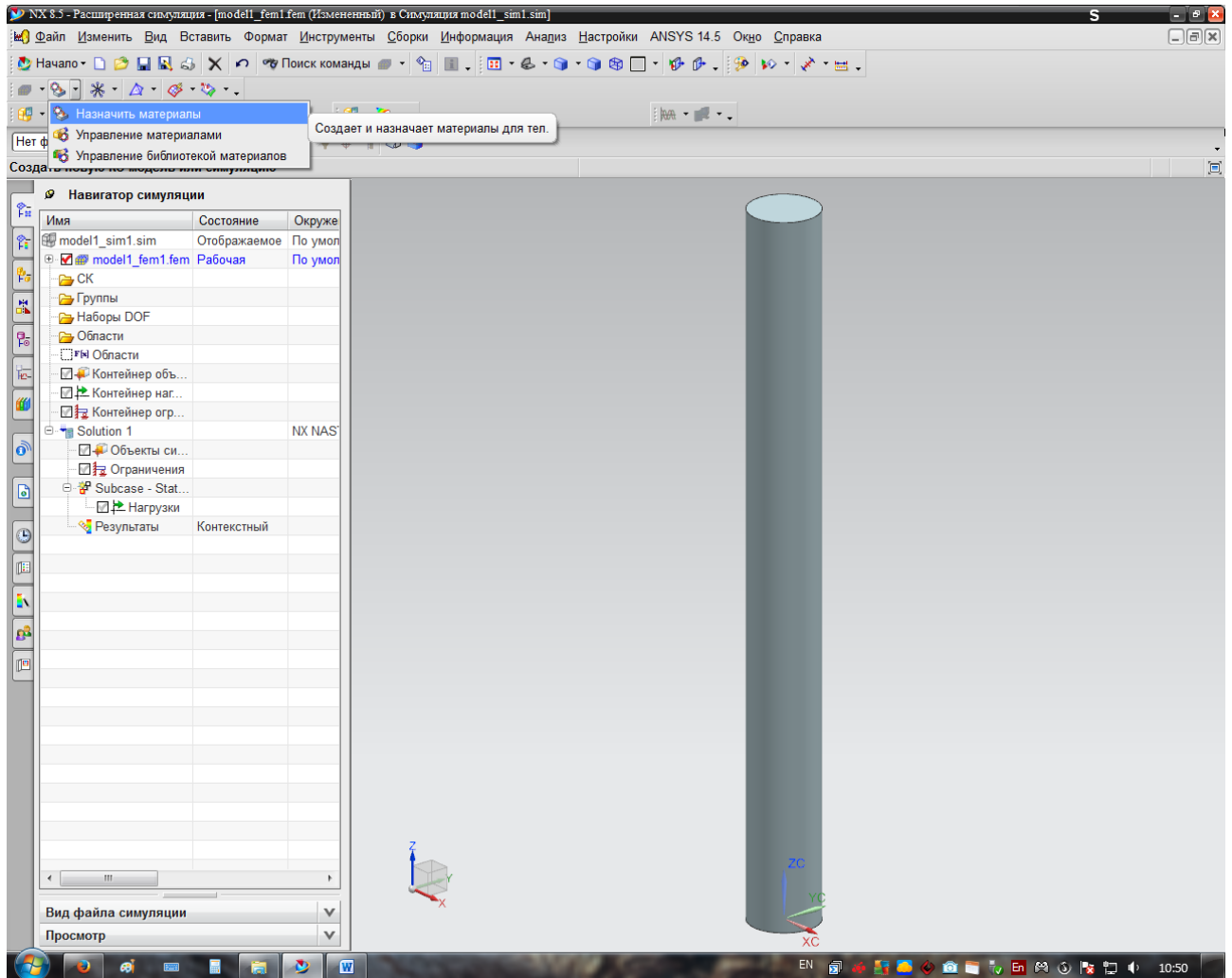


Здесь без изменений.

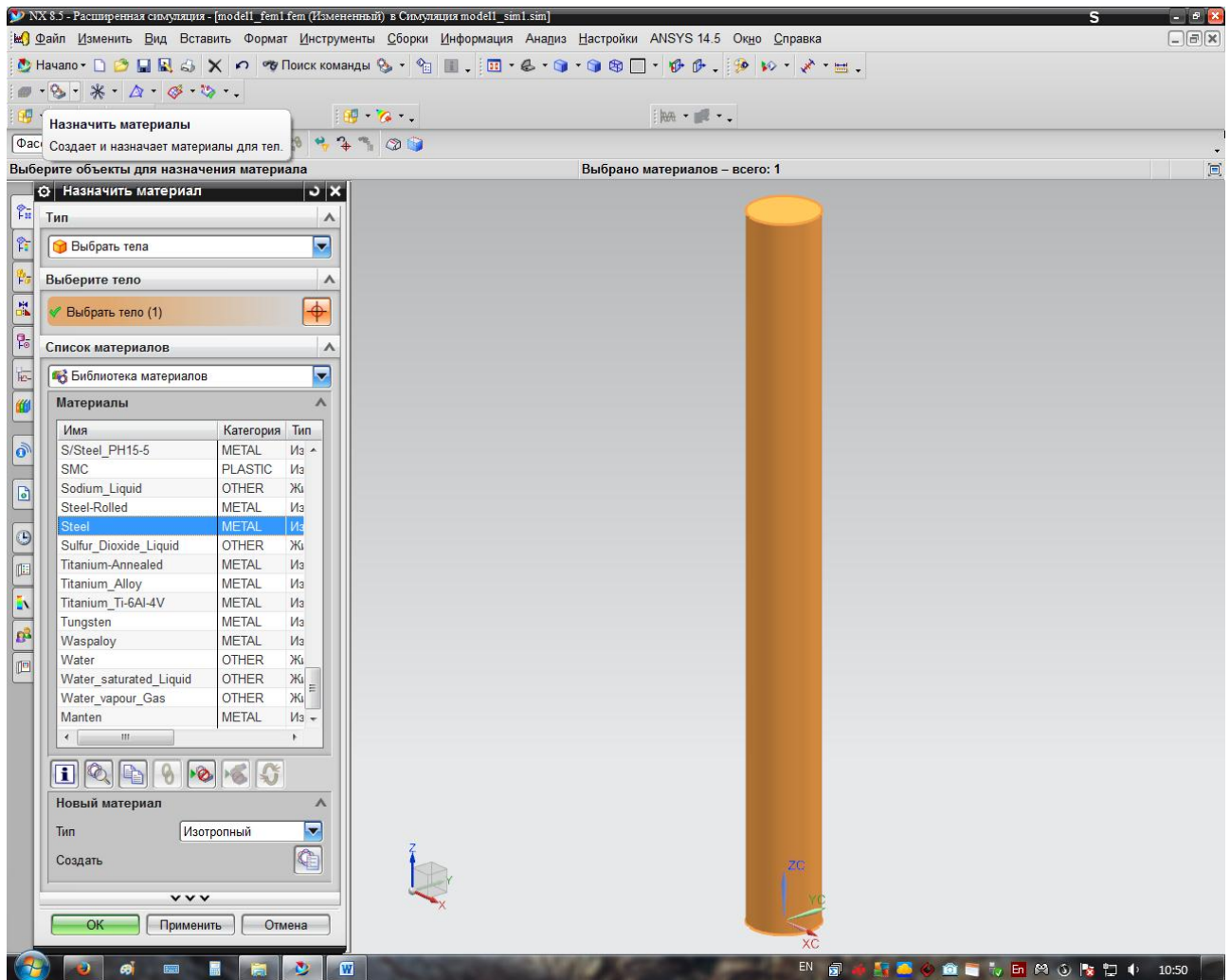




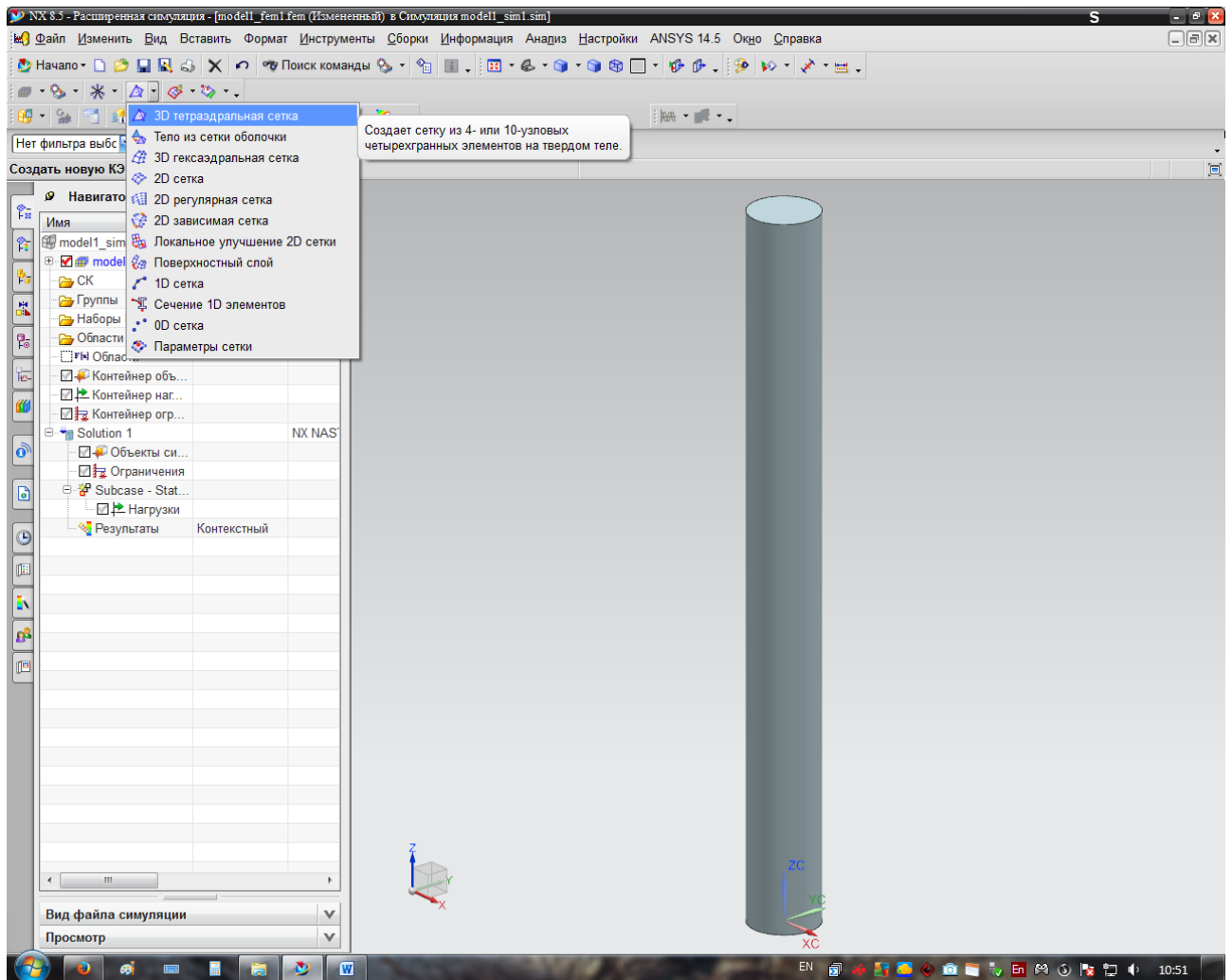
## Назначаем материал вала.



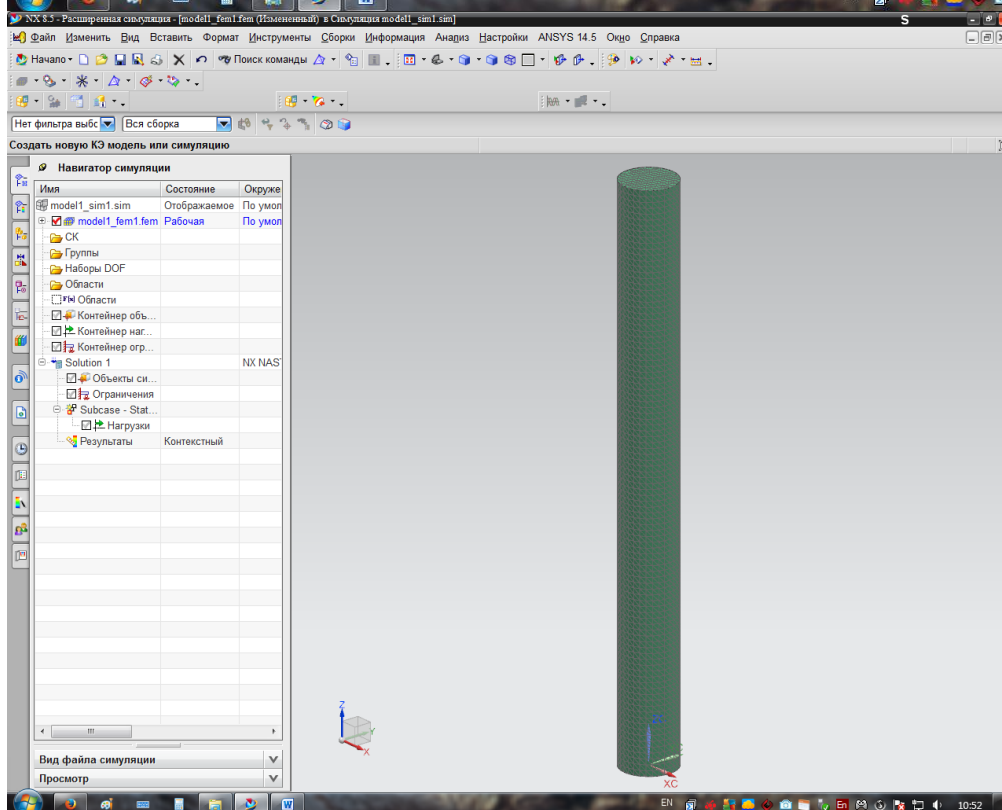
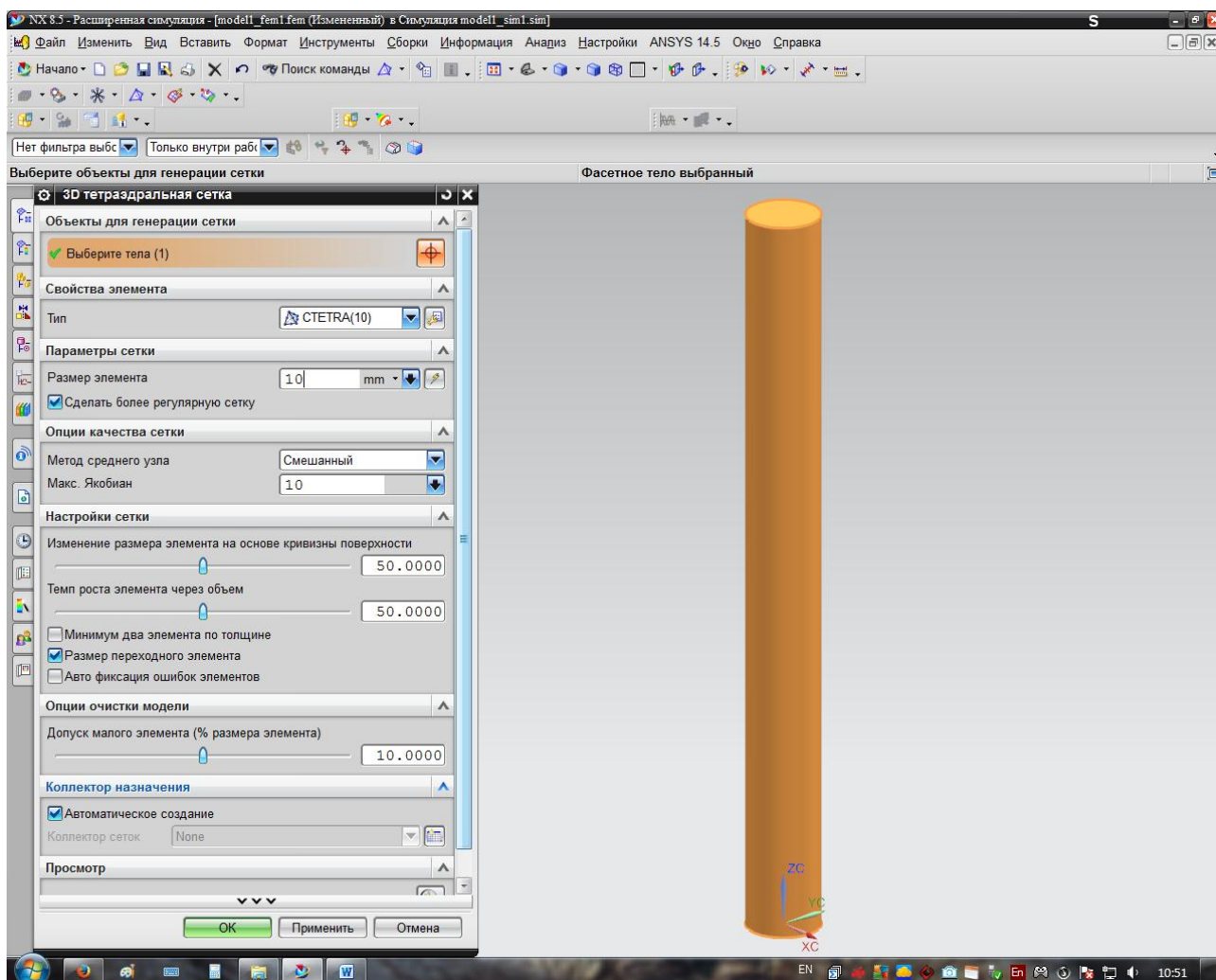
## Материал вала – сталь (STEEL).



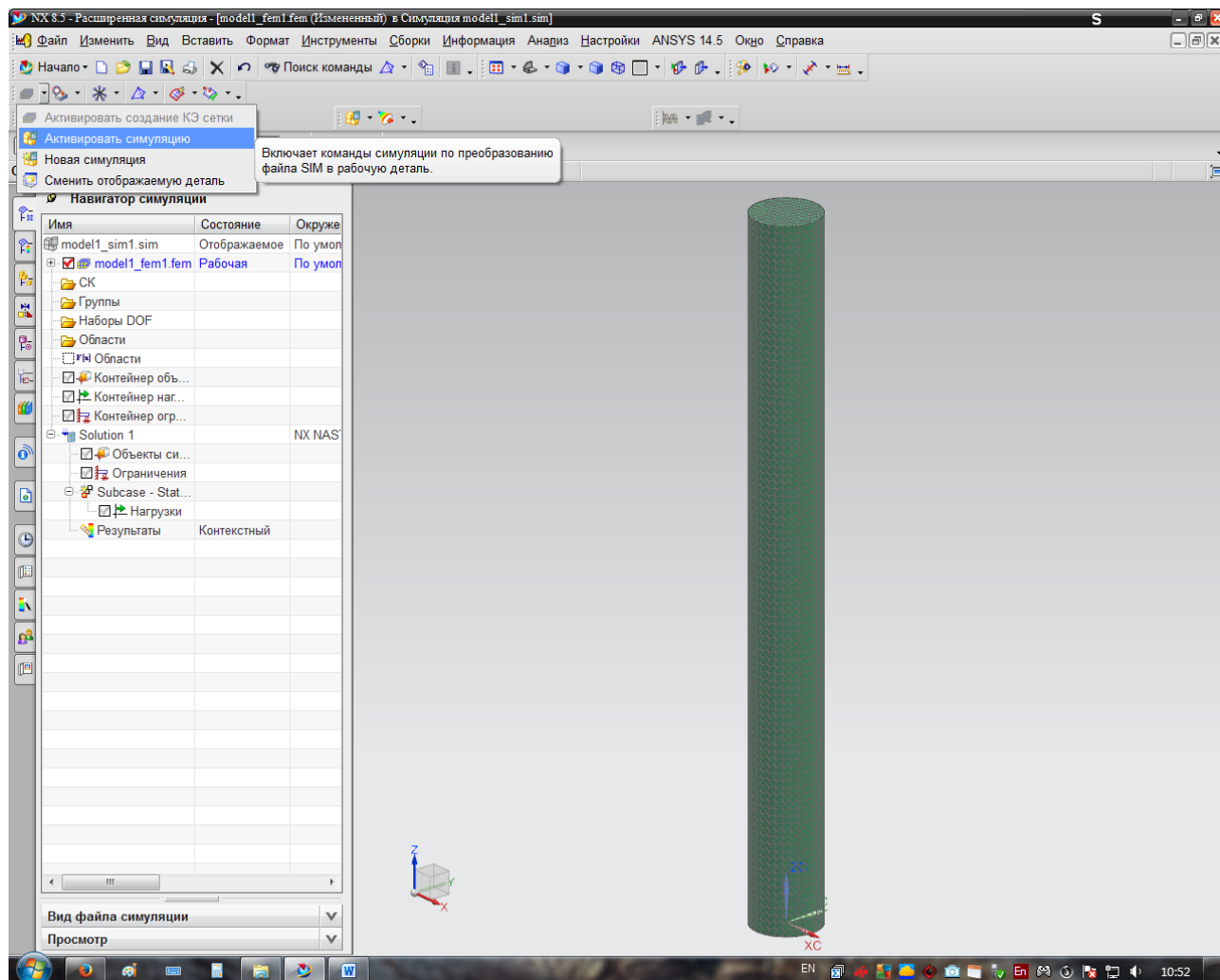
Создаем КЭ сетку.



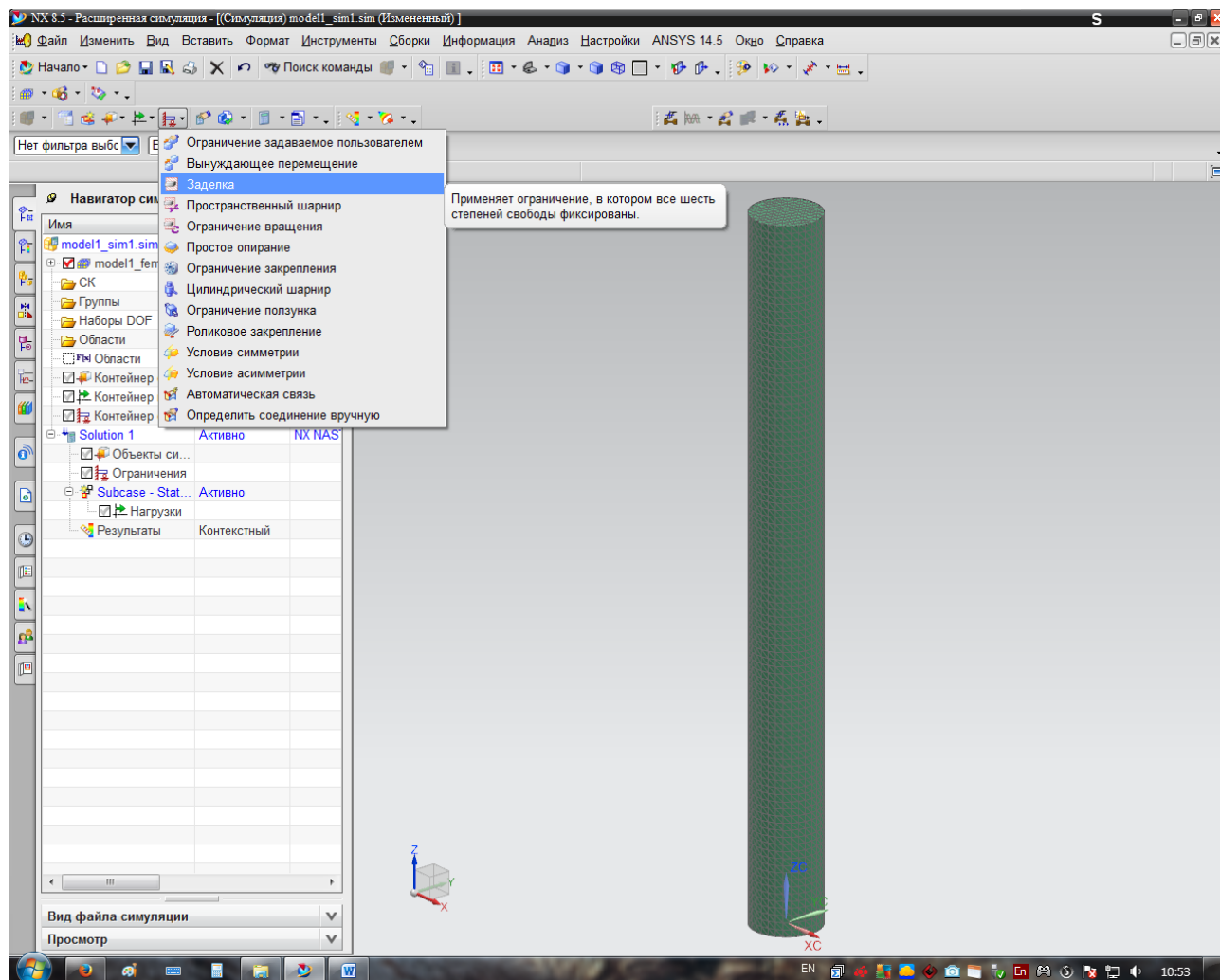
Выбираем 10-тиузловую сетку с размером элемента около 10 мм. Результат генерации сетки представлен на рис. далее.



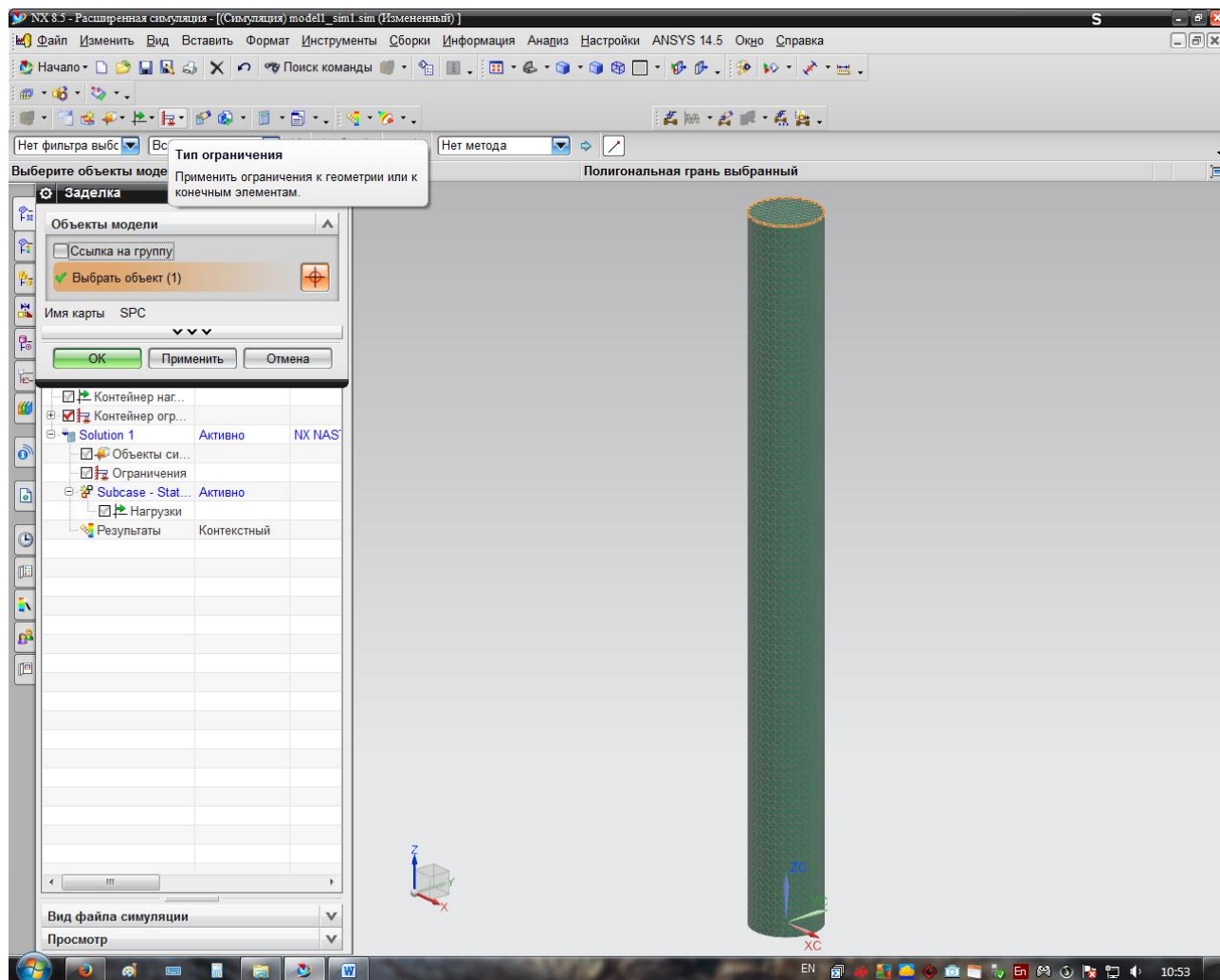
Сетка сгенерирована. Переходим в симуляцию.



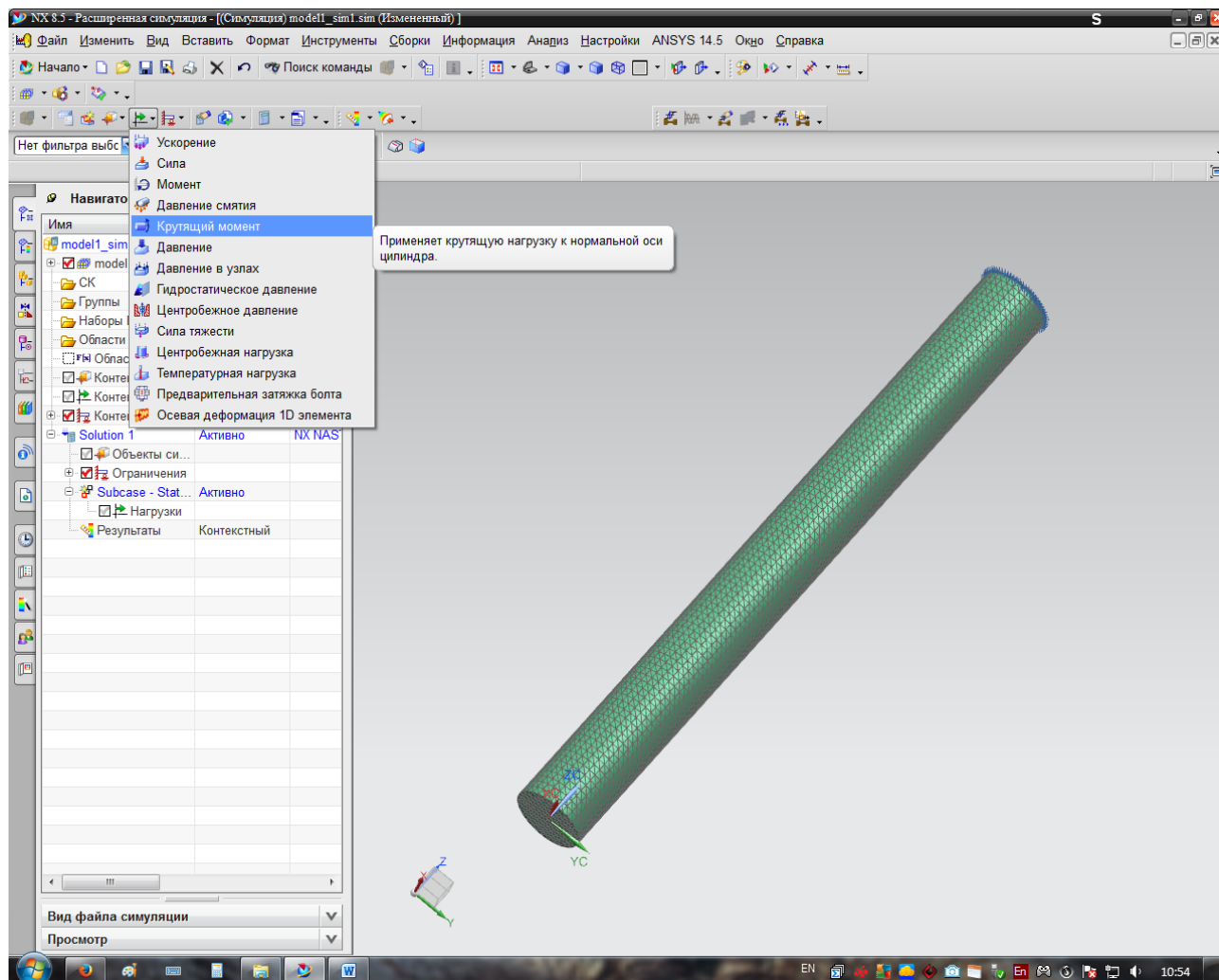
Выбираем жесткую заделку для одного из концов вала.



Выбираем торец для жесткой заделки.

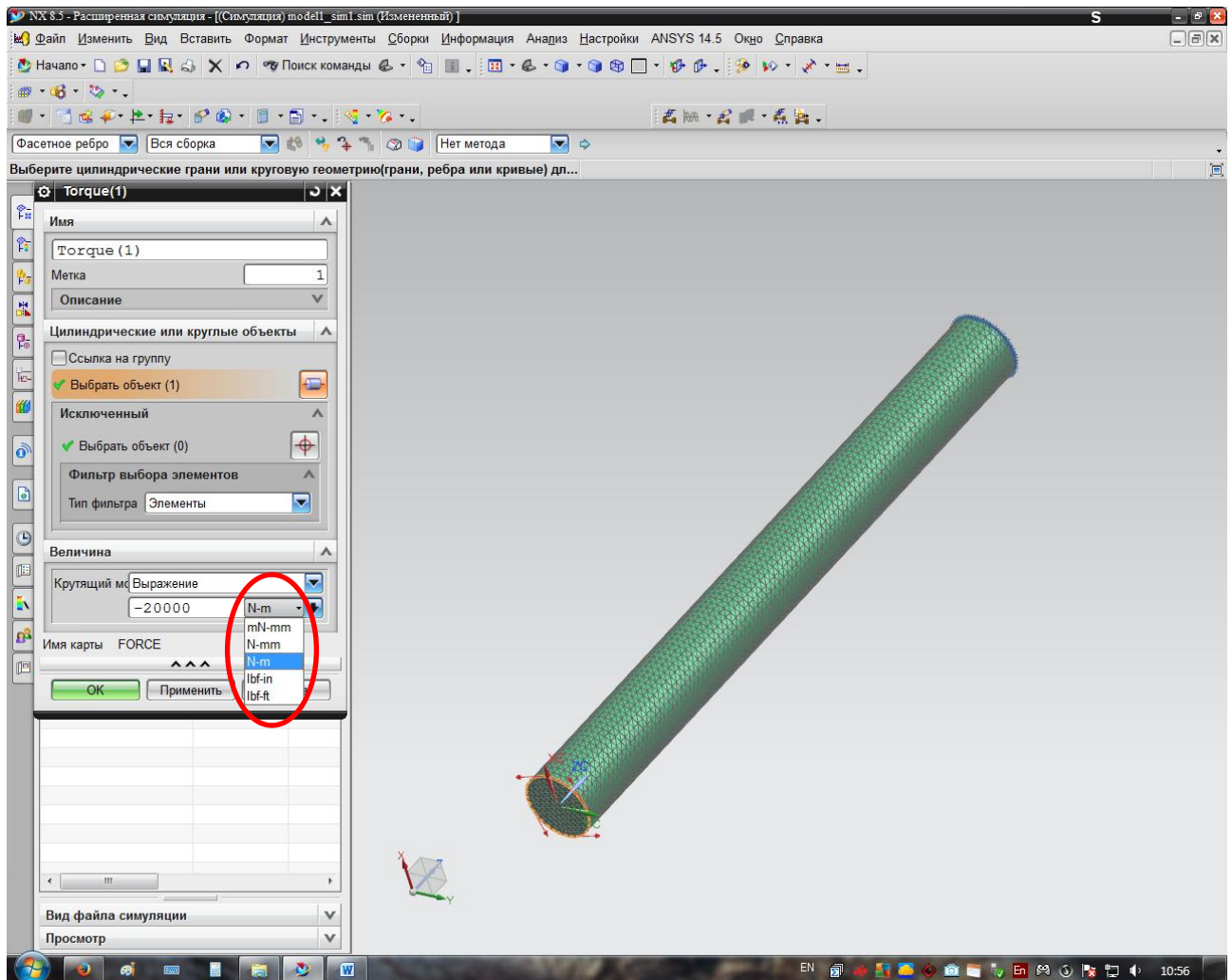


К другому торцу вала прикладываем крутящий момент.

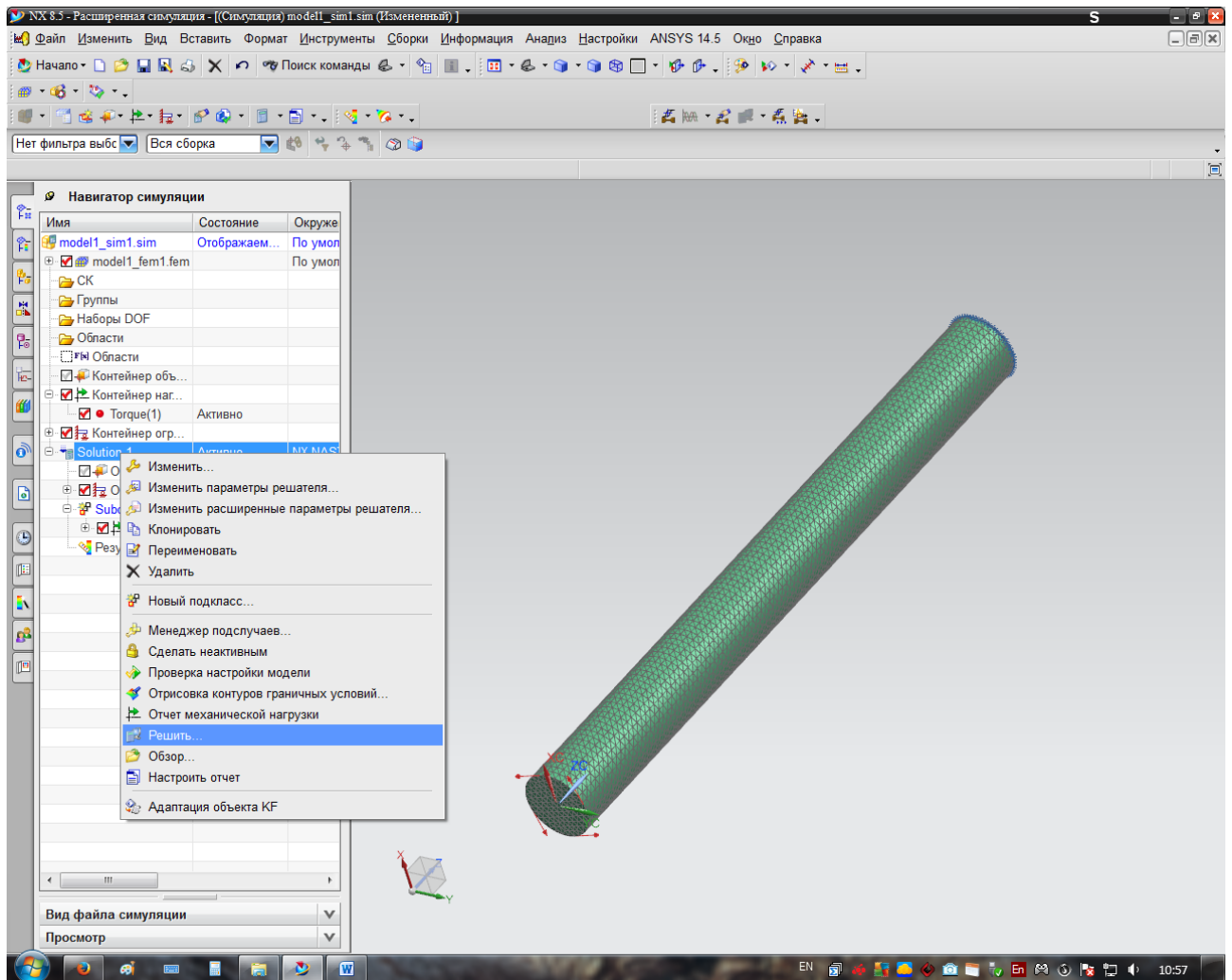




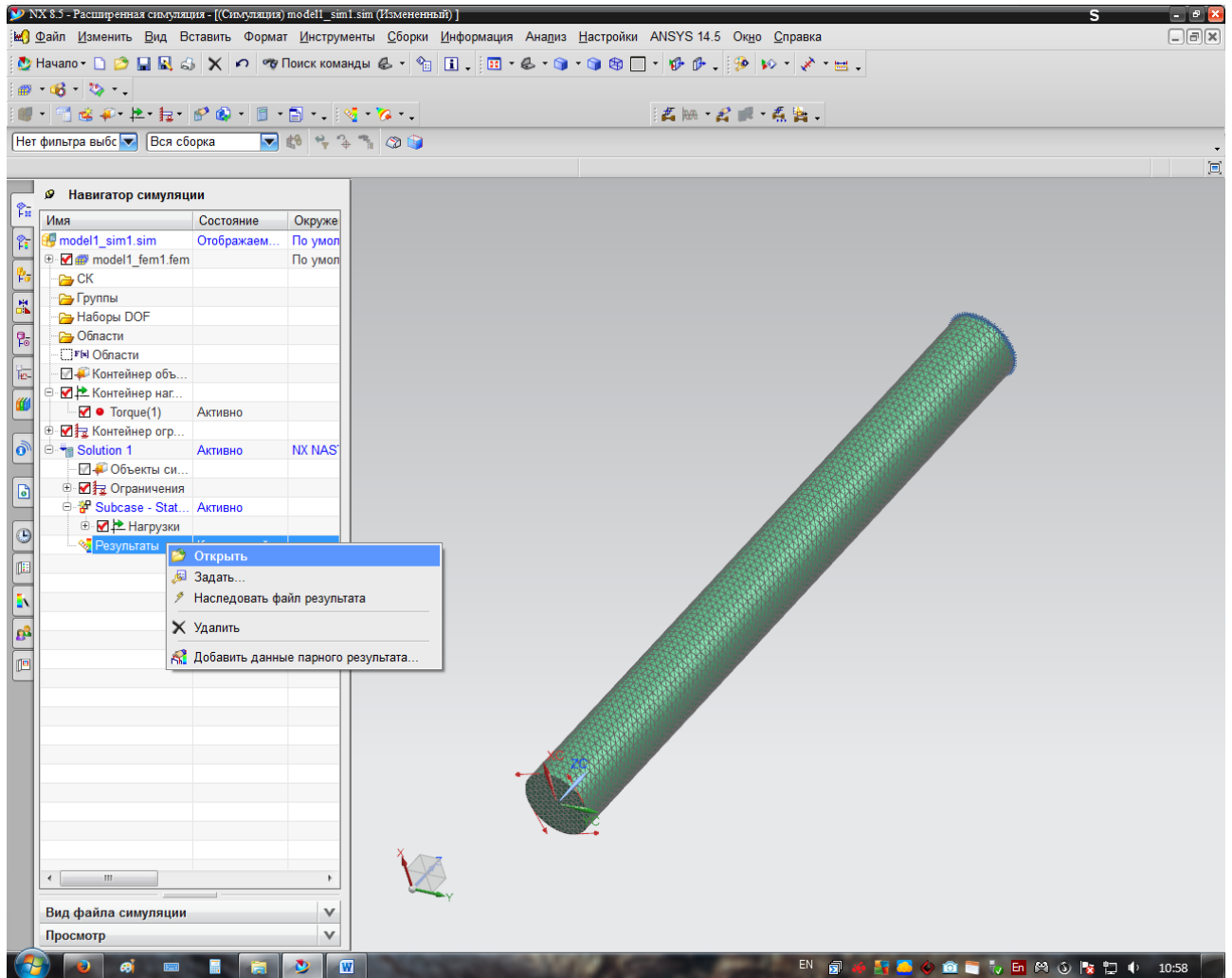
Выбираем другой торец вала, вводим значение крутящего момента  $M_{кр} = -20000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Обязательно проверьте единицы вводимого значения крутящего момента. Знак «минус» нужен для того, чтобы момент был направлен против часовой стрелки при взгляде на сечение.



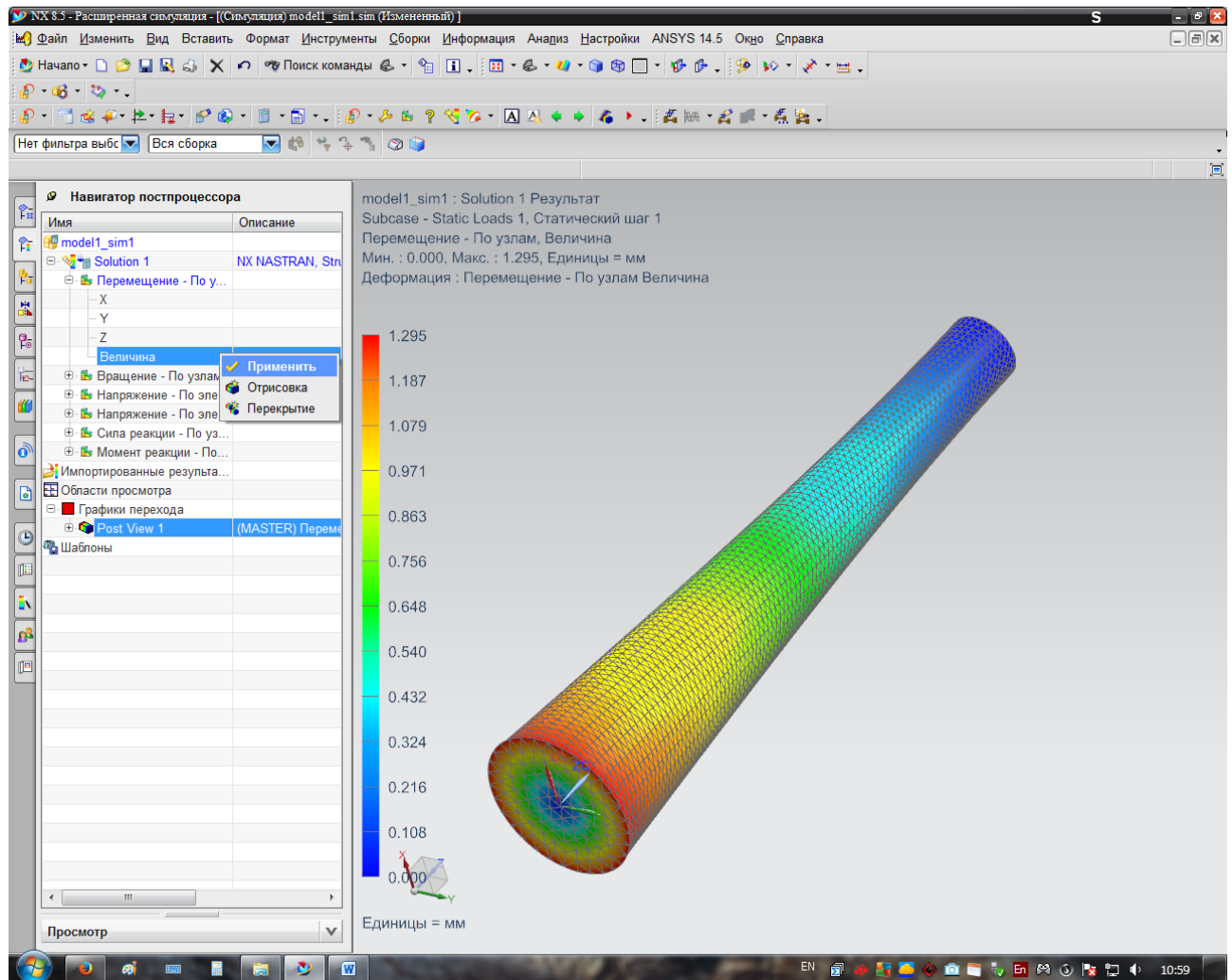
Решаем статическую задачу.



Переходим к результатам.



Анализируем суммарные перемещения точек вала.



Теоретический угол закручивания определяется по формуле

$$\varphi = \frac{M_{кр} \cdot l}{G \cdot J_p}, \quad (1)$$

где  $M_{кр}$  – величина крутящего момента,  $l$  – длина закручиваемого участка вала,  $G$  – модуль сдвига материала,  $J_p$  – полярный момент инерции поперечного сечения вала.

Для круглого сечения полярный момент инерции определяется по формуле:

$$J_p = \frac{\pi D^4}{32}, \quad (2)$$

где  $D$  – наружный диаметр вала.

Модуль сдвига изотропного материала можно определить по формуле:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости,  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

**(!) Подсказка:** Характеристики материала можно посмотреть в библиотеке материалов. Значение угла поворота, полученного при моделировании, можно вычислить с помощью теоремы косинусов:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos \varphi, \quad (4)$$

здесь  $a, b, c$  – стороны треугольника, а угол  $\varphi$  – угол между сторонами  $a$  и  $b$ .

В нашем случае  $a = b = \frac{D}{2}$ , а  $c$  – максимальное суммарное перемещение по полученному графику. В итоге угол закручивания модели будет определяться на основании теоремы косинусов по формуле:

$$\varphi_{\text{мод}} = \arccos \left( \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \right). \quad (5)$$

**Задание 1:** необходимо рассчитать теоретический и модельный угол закручивания, сравнить их и вычислить относительную погрешность.

**Задание 2:** произвести расчет вала на жесткость по формуле (6) и сделать выводы о соблюдении условия жесткости.

Формула для расчета на жесткость:

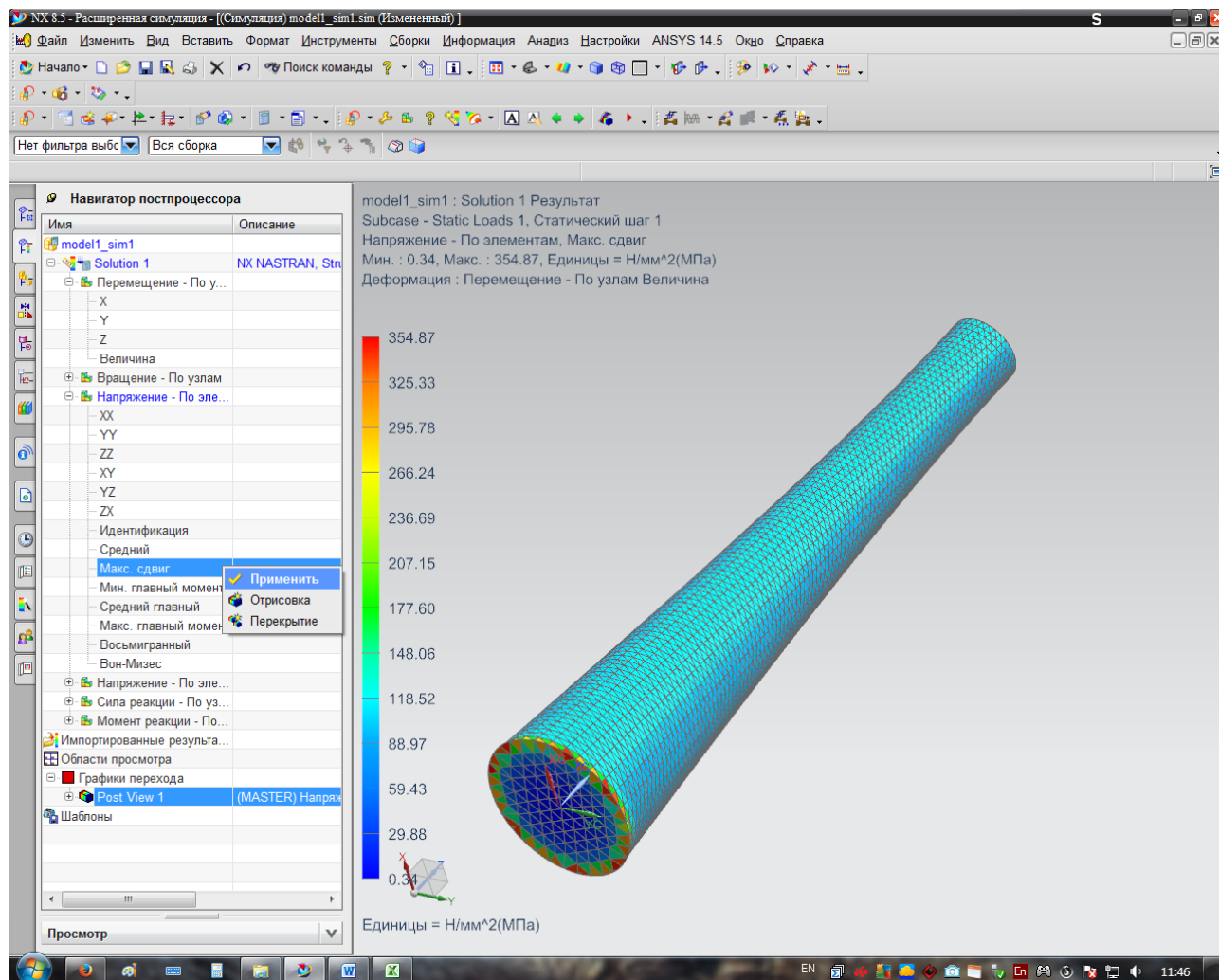
$$\varphi_{\text{мод}} \leq [\varphi], \quad (6)$$

где  $[\varphi]$  – допускаемое значение абсолютного угла закручивания в радианах, определяется по формуле:

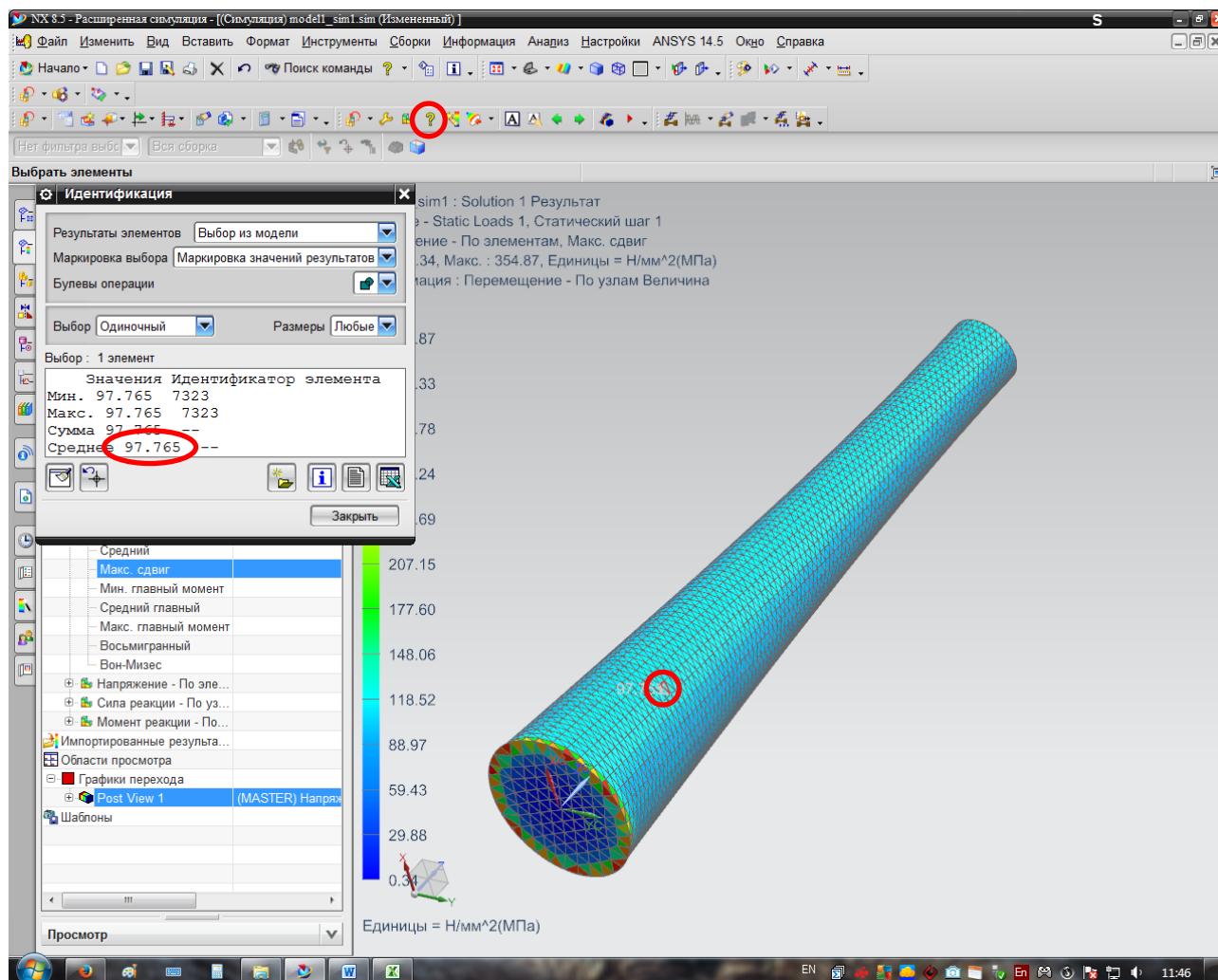
$$[\varphi] = [\theta] \cdot l, \quad (7)$$

где  $[\theta]$  – допускаемое значение относительного угла закручивания в рад/м;  $l$  – длина вала;  $[\theta] = 3,5 \dots 17,5$  мрад/м.

Анализируем максимальные касательные напряжения по валу.



С помощью инструмента «**Определить значения**» анализируем величину касательных напряжений на некотором расстоянии от торца вала, где прикладывали крутящий момент, для того чтобы исключить влияние граничных условий на величину напряжений.



Теоретическое значение максимальных касательных напряжений определяется по формуле

$$\tau_{\max} = \frac{M_{\text{кр}}}{W_p}, \quad (8)$$

где  $M_{\text{кр}}$  – величина крутящего момента,  $W_p$  – полярный момент сопротивления поперечного сечения вала.

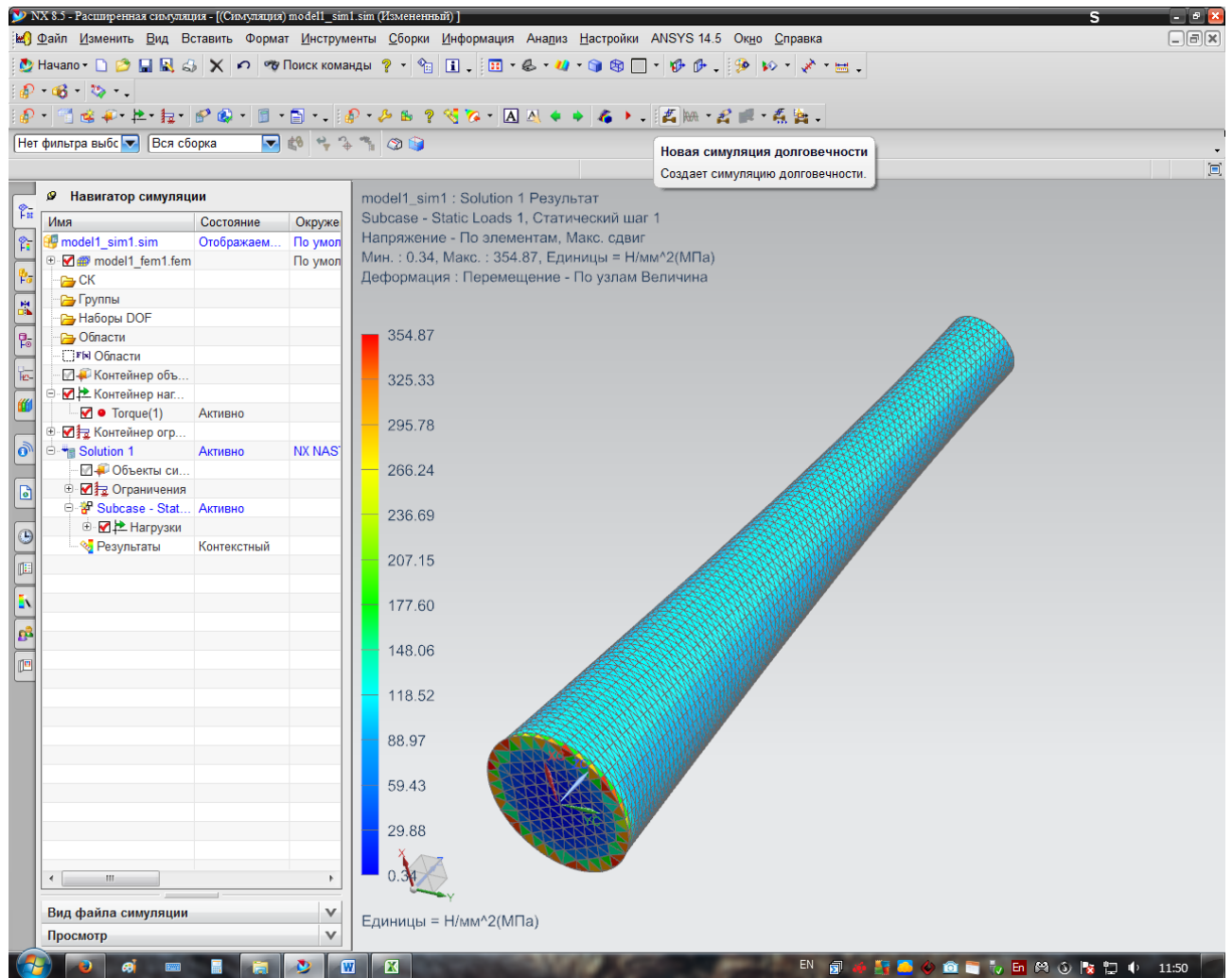
Для круглого сечения полярный момент сопротивления определяется по формуле:

$$W_p = \frac{J_p \cdot 2}{D} = \frac{\pi D^3}{16}, \quad (9)$$

где  $D$  – наружный диаметр вала.

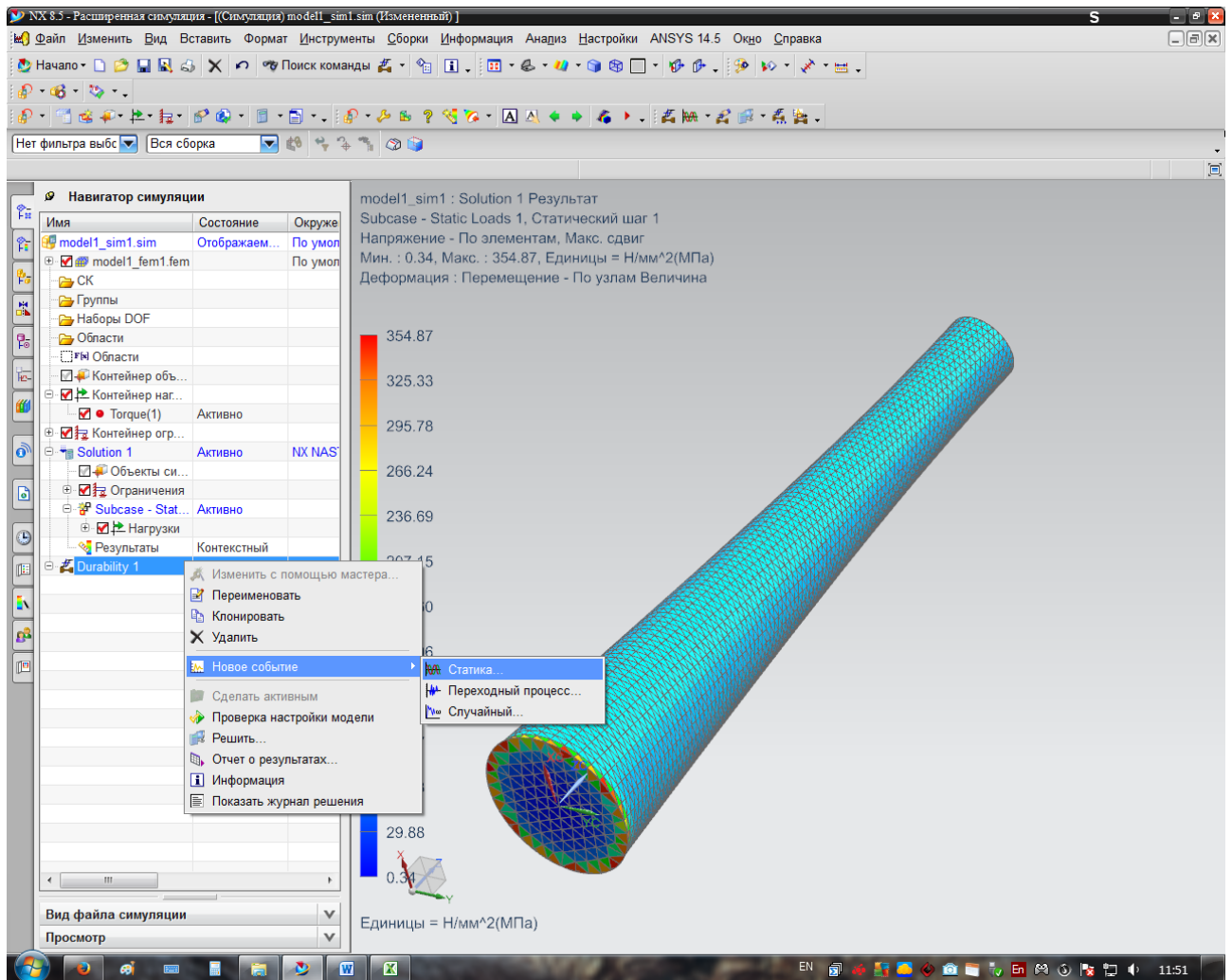
**Задание:** необходимо рассчитать теоретическое и модельное значение максимальных касательных напряжений, сравнить их и вычислить относительную погрешность.

Переходим к оценке прочности вала.





Создаем новое событие → статика.



## Изменяем настройки прочности.

The screenshot displays the ANSYS 14.5 interface for a static simulation. The main window shows a 3D model of a cylindrical part with a mesh. A color scale on the right indicates the stress distribution, ranging from 0.34 MPa (blue) to 354.87 MPa (red). The simulation results are displayed as follows:

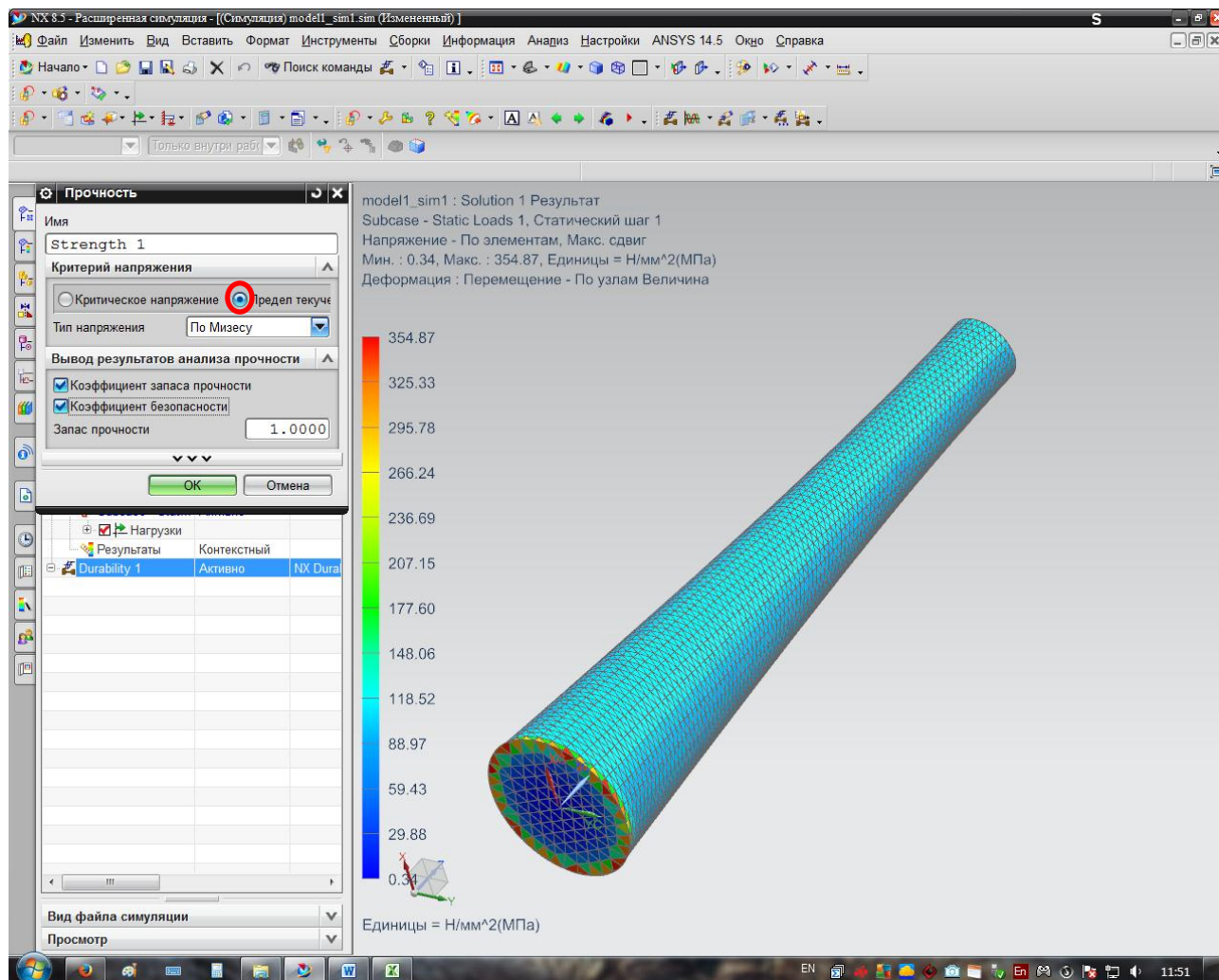
- model1\_sim1 : Solution 1 Результат
- Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1
- Напряжение - По элементам, Макс. сдвиг
- Мин. : 0.34, Макс. : 354.87, Единицы = Н/мм<sup>2</sup>(МПа)
- Деформация : Перемещение - По узлам Величина

The 'Статическое событие' (Static Event) dialog box is open, showing the following settings:

- Имя события: Static Event 1
- Список статических событий: Solution 1-SOL 101 SCS
- Тип возбуждения: Шаблон
- Поиск оси: Прочность
- Параметры решателя: Strength 1
- Иконка:
- Изменить настройки прочности: OK, Применить, Отмена

Units: Единицы = Н/мм<sup>2</sup>(МПа)

В качестве предельных напряжений выбираем предел текучести.



## Создаем новое возбуждение.

model1\_sim1 : Solution 1 Результат  
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1  
Напряжение - По элементам, Макс. сдвиг  
Мин. : 0.34, Макс. : 354.87, Единицы = Н/мм<sup>2</sup>(МПа)  
Деформация : Перемещение - По узлам Величина

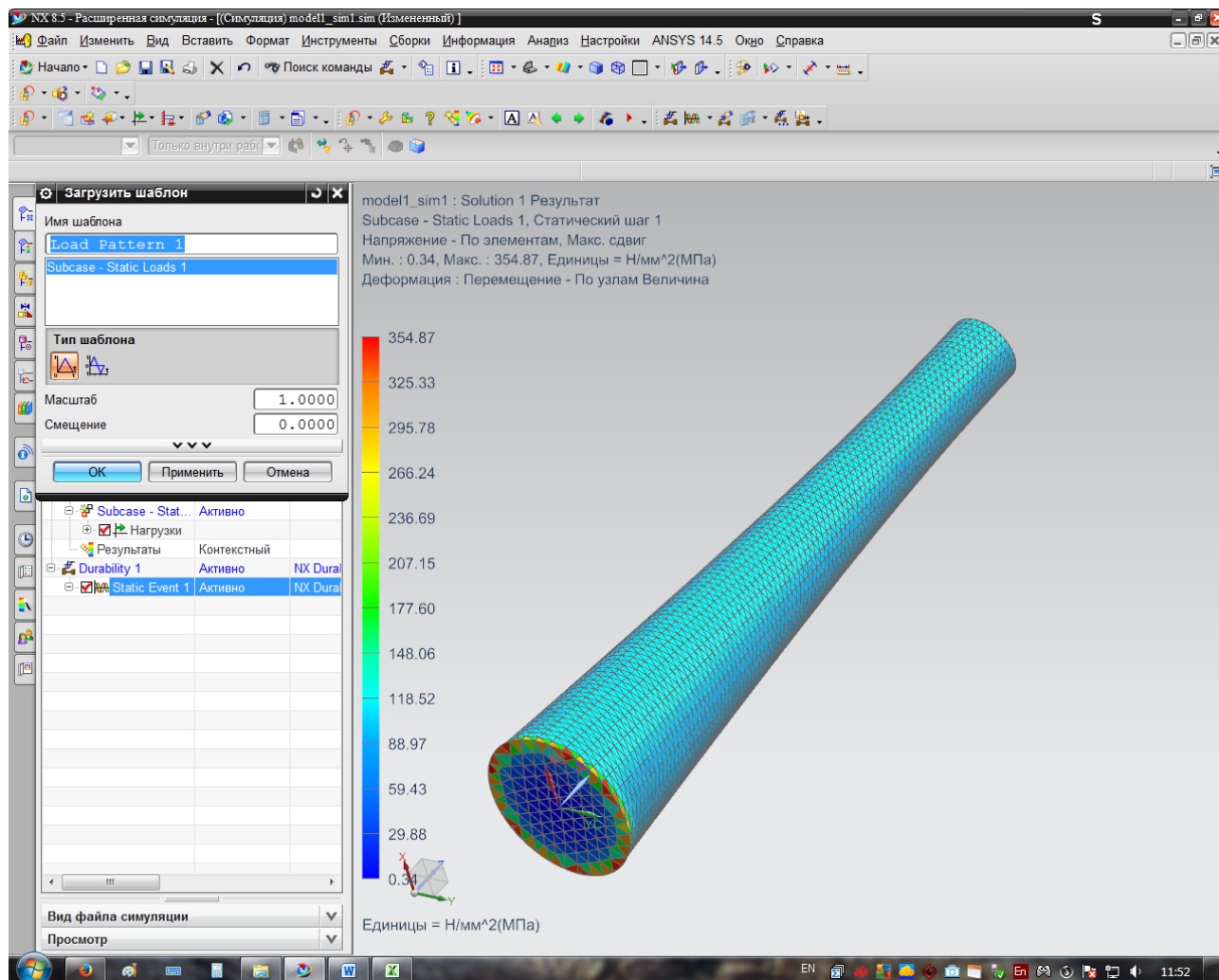
Имя	Состояние	Окруже
model1_sim1_sim	Отображаем...	По умол
model1_fem1.fem		По умол
СК		
Группы		
Наборы DOF		
Области		
Области		
Контейнер объ...		
Контейнер наг...		
Torque(1)	Активно	
Контейнер огр...		
Solution 1	Активно	NX NAS
Объекты си...		
Ограничения		
Subcase - Stat...	Активно	
Нагрузки		
Результаты	Контекстный	
Durability 1	Активно	NX Dural
Static Event 1		

Изменить...  
Переименовать  
Клонировать  
Удалить  
**Новое возбуждение...**  
Сделать неактивным  
Решить...  
История усталостного расчета...  
Информация  
Показать журнал решения

Вид файла симуляции  
Просмотр

Единицы = Н/мм<sup>2</sup>(МПа)

Здесь без изменений.



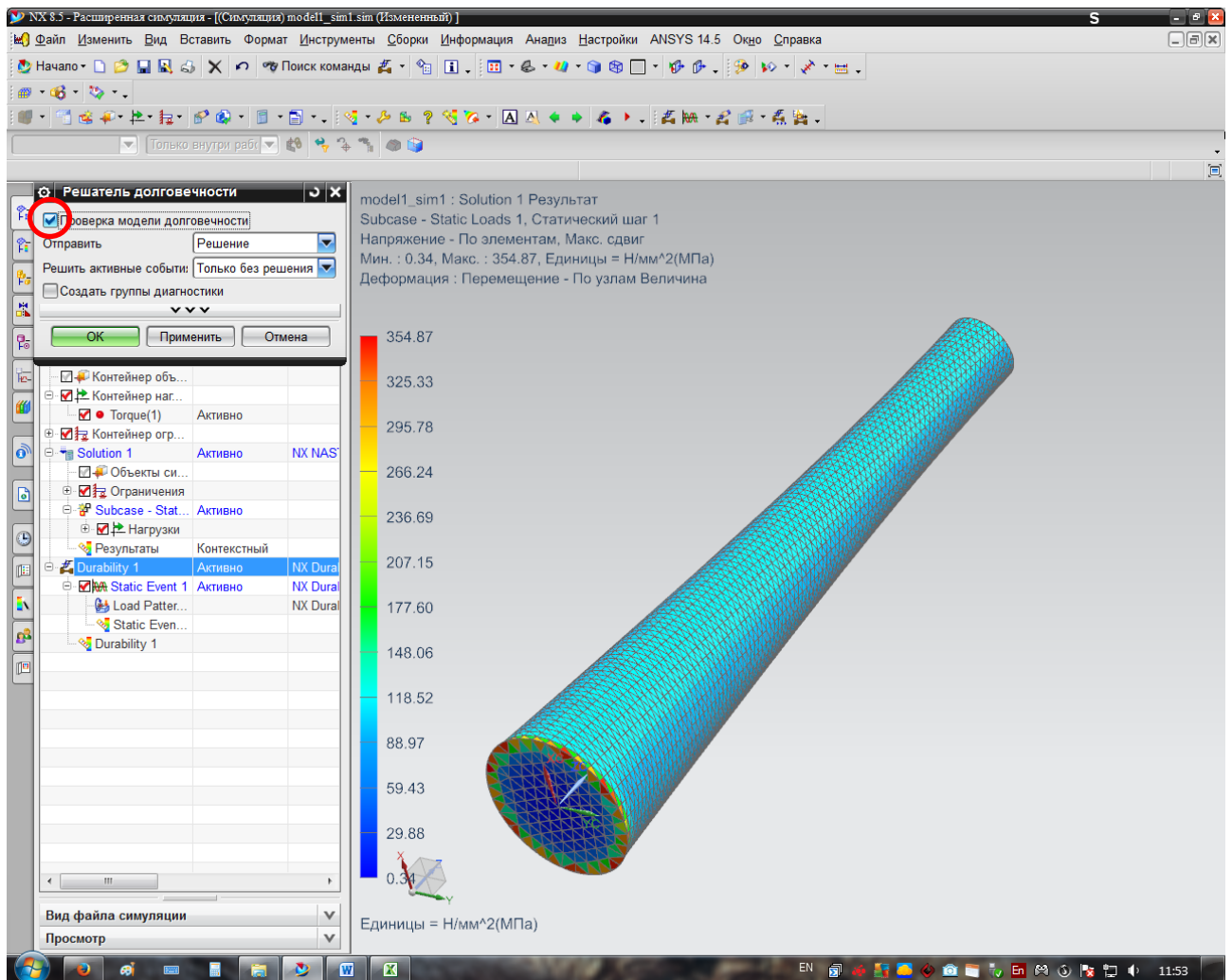
## Решаем задачу оценки прочности.

model1\_sim1 : Solution 1 Результат  
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1  
Напряжение - По элементам, Макс. сдвиг  
Мин. : 0.34, Макс. : 354.87, Единицы = Н/мм<sup>2</sup>(МПа)  
Деформация : Перемещение - По узлам Величина

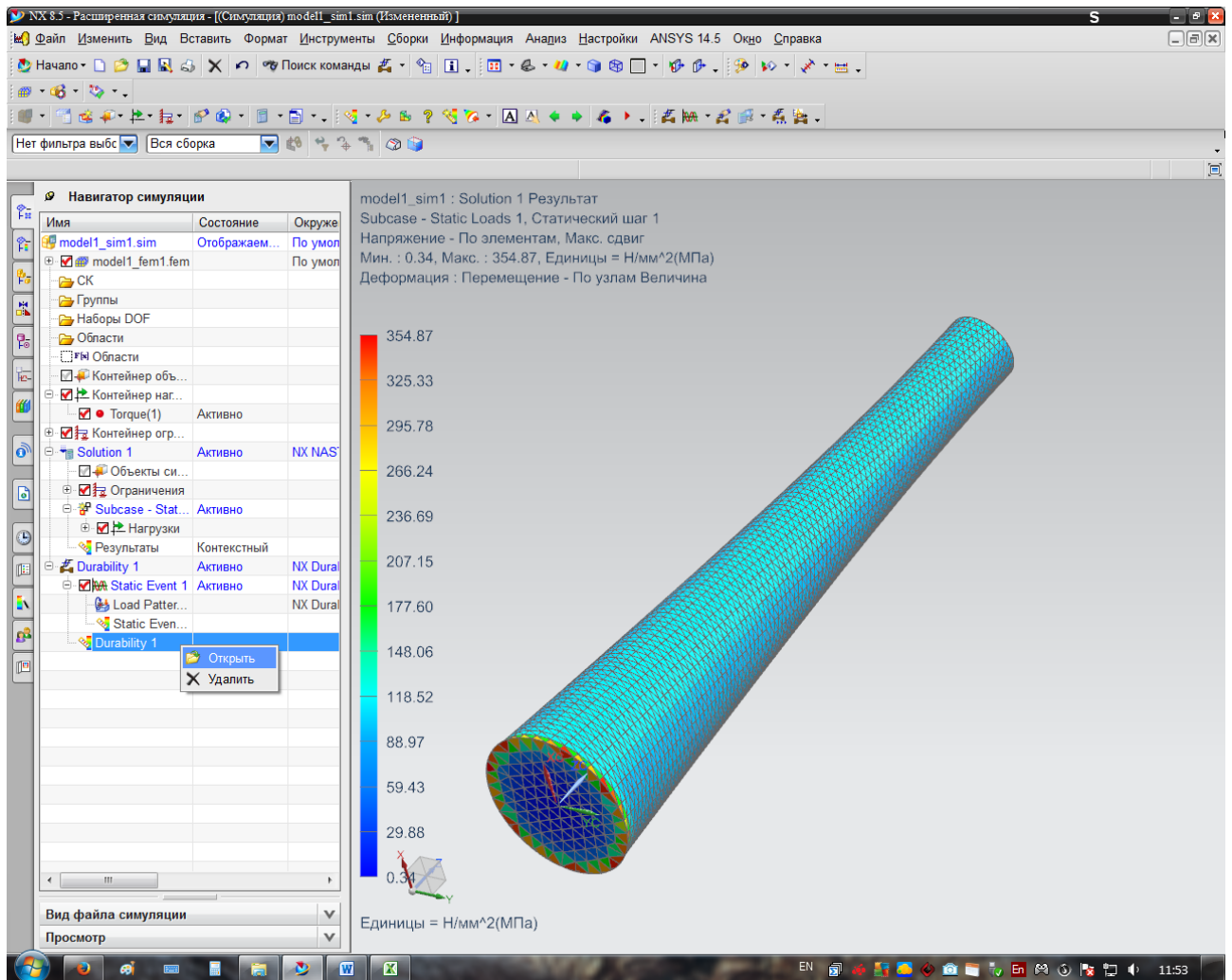
Имя	Состояние	Окруже
model1_sim1_sim	Отображаем...	По умол
model1_fem1.fem		По умол
СК		
Группы		
Наборы DOF		
Области		
Фн Области		
Контейнер объ...		
Контейнер наг...		
Torque(1)	Активно	
Контейнер огр...		
Solution 1	Активно	NX NAS
Объекты си...		
Ограничения		
Subcase - Stat...	Активно	
Нагрузки		
Результаты	Контекстный	
Durability 1		
Static E...		
Load Pa...		
Static E...		
Durability 1		

Единицы = Н/мм<sup>2</sup>(МПа)

Обязательно ставим галочку «Проверка модели долговечности». В противном случае иногда имеют место вылеты программы.

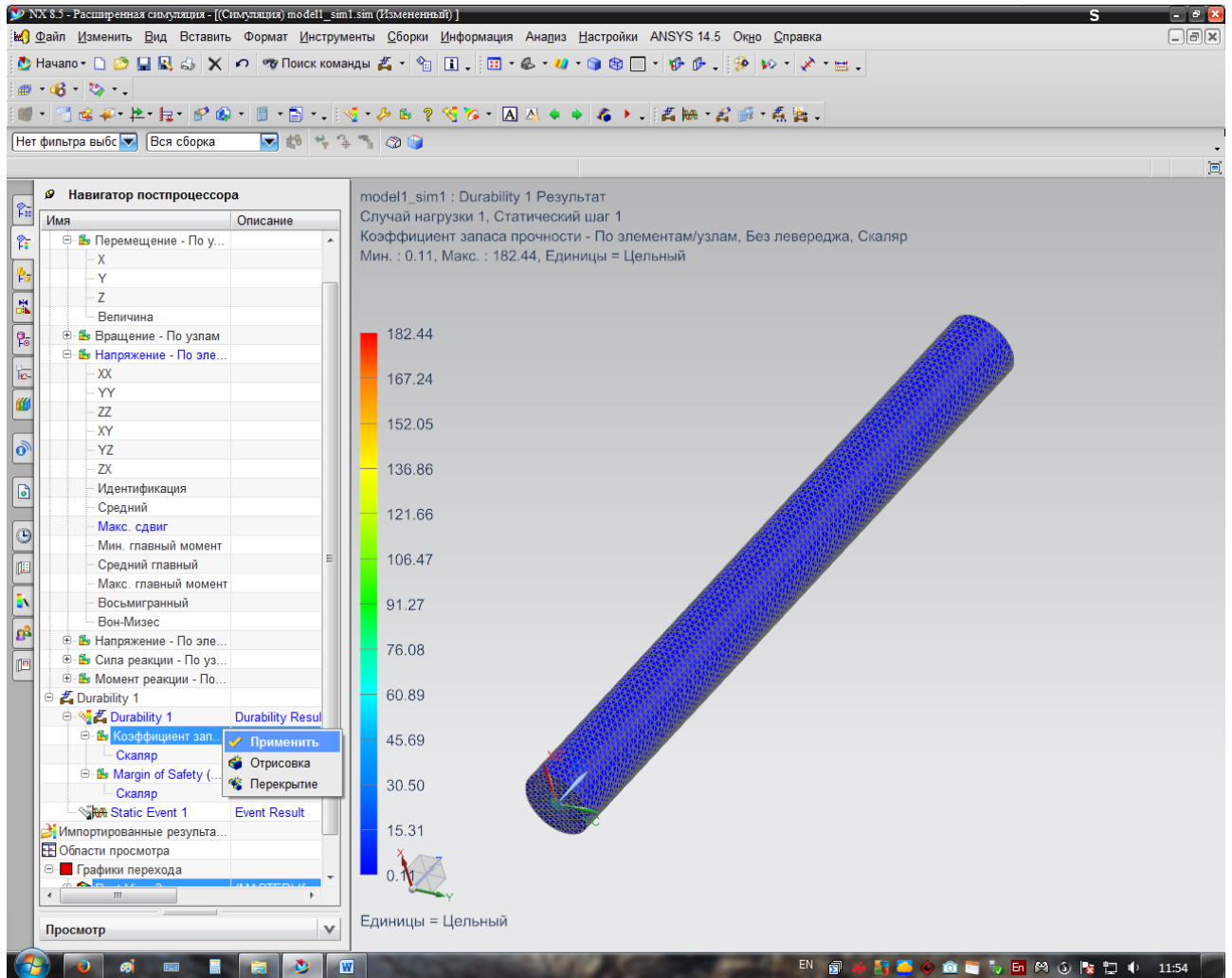


Переходим к анализу результатов оценки прочности.

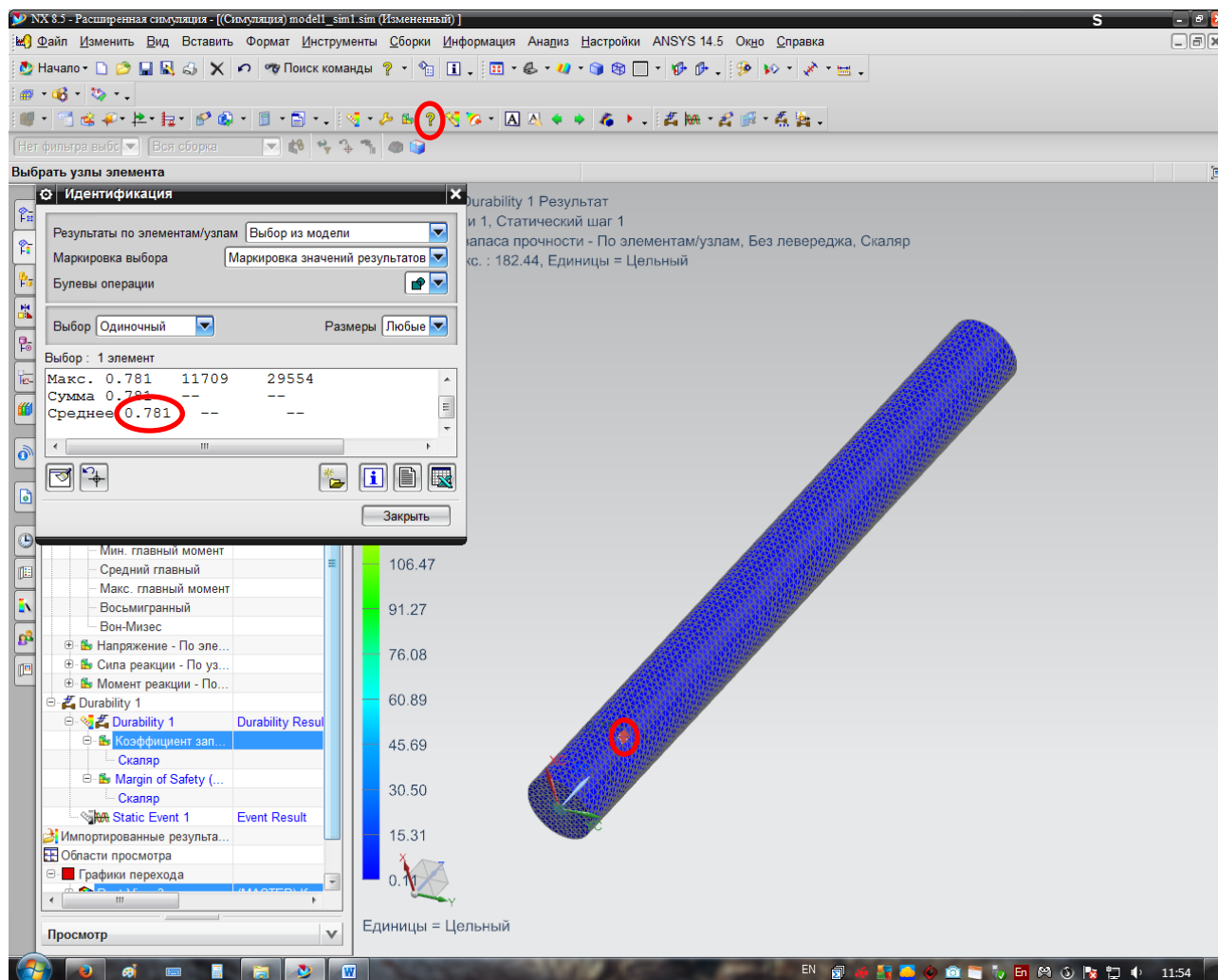




## Выбираем и анализируем «Коэффициент запаса прочности».



С помощью инструмента «**Определить значения**» анализируем величину коэффициента запаса прочности на некотором расстоянии от торца вала, где прикладывали крутящий момент, для того чтобы исключить влияние граничных условий на величину напряжений.



Коэффициент запаса по касательным напряжениям определяется по формуле:

$$RF_{\tau} = \frac{\tau_{\tau}}{\tau_{\text{действ.}}}, \quad (10)$$

где  $\tau_{\tau}$  – предел текучести по касательным напряжениям; при использовании теории Мизеса  $\tau_{\tau} = 0,577\sigma_{\tau}$ , в инженерных расчетах часто принимают  $\tau_{\tau} = \frac{\sigma_{\tau}}{2}$ ;  $\tau_{\text{действ.}}$  – величина действующих касательных напряжений.

Коэффициент запаса по эквивалентным напряжениям (по Мизесу) определяется по формуле:

$$RF_{\sigma} = \frac{\sigma_{\tau}}{\sigma_{\text{экр.}}}, \quad (11)$$

где  $\sigma_{\tau}$  – предел текучести материала;  $\sigma_{\text{экр.}}$  – величина действующих эквивалентных напряжений (по Мизесу).

**Задание 1:** необходимо рассчитать теоретическое и модельное значение запаса прочности по максимальным касательным напряжениям, сравнить их и вычислить относительную погрешность.

(!) **Подсказка:** Характеристики материала можно посмотреть в библиотеке материалов.

**Задание 2:** необходимо рассчитать значение запаса прочности по максимальным касательным напряжениям и по эквивалентным напряжениям, сравнить их и сделать вывод о том, чем следует руководствоваться при расчете вала на прочность.

**Контрольное задание 1:** при вышеуказанных нагрузках подобрать диаметр сплошного вала исходя из условий прочности и жесткости, обеспечив запас прочности по максимальным касательным и эквивалентным напряжениям не менее 1,5 ( $RF_\tau \geq 1,5; RF_\sigma \geq 1,5$ ), определить его массу.

**Контрольное задание 2:** при вышеуказанных нагрузках подобрать диаметр пустотелого вала с соотношением диаметров  $\frac{d}{D} = 0,75$  исходя из условий прочности и жесткости, обеспечив запас прочности по максимальным касательным и эквивалентным напряжениям не менее 1,5 ( $RF_\tau \geq 1,5; RF_\sigma \geq 1,5$ ), определить его массу.

**ИТОГИ:** Сравнить массы сплошного и пустотелого валов и сделать вывод об эффективности их использования.