

Научно-исследовательский центр **СтаДиО**

**“Семейство” программных комплексов  
АСТРА-НОВА’2017™ (релиз 201611)**

**Верификационный отчет по новым возможностям  
Том 2. Упругопластические расчеты и практические  
приложения (АСТРА-СТАДИО)**



2016 г.

## Содержание

Введение .....	3
1. Упругопластический расчет .....	4
Т101. Кубик в условиях однородного напряженного состояния.....	4
Т102. Толстостенная труба под внутренним давлением .....	10
Т103. Отвод под действием внутреннего давления .....	17
Т104. Тройник .....	25
Т105. Отвод. Мультилинейная диаграмма деформирования .....	32
2. Расчет с учетом автофретирования.....	41
Т201. Автофретирование прямолинейной трубы.....	41
Т202. Автофретирование криволинейной трубы (отвода) .....	48
3. Определение предельной нагрузки.....	55
Т301. Отвод. Определение предельного давления.....	55
Т302. Тройник. Определение предельного давления.....	64

## **Введение**

Программный модуль АСТРА-СТАДИО версии 201611 позволяет проводить упругопластические расчеты деталей трубопроводов (трубы, отводы, тройники), находящихся под действием внутреннего давления, по ассоциированному закону течения с учетом изотропного упрочнения. Допускается задание, как билинейных диаграмм деформирования материала, так и реальных (мультилинейных).

Были реализованы практические значимые для деталей трубопроводов приложения упругопластических расчетов такие, как:

1. расчет деталей с учетом автофретирования (повышения допустимой нагрузки за счет остаточных напряжений);
2. определение предельных пластических нагрузок (нагрузок, соответствующих переходу нагружаемой детали в стадию интенсивных пластических деформаций).

Для набора тестовых моделей было проведено сопоставление результатов упругопластических расчетов с программным комплексом ANSYS на идентичных КЭ-сетках. Результаты сопоставления представлены в данном отчете.

## 1. Упругопластический расчет

### T101. Кубик в условиях однородного напряженного состояния

Рассматривается элементарная модель – куб с длиной ребра 1 м в условиях однородного напряженного состояния (рис. 1.1). Исследуются следующие варианты задачи:

1. одноосное растяжение оси X;
2. растяжение по оси X совместно со сжатием по оси Y;
3. растяжение по оси X, сжатие по оси Y, растяжение по оси Z.

#### Исходные данные

##### Физико-механические характеристики

- модуль упругости  $E = 2e5$  МПа;
- коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ ;
- предел текучести  $\sigma_T = 200$  МПа,
- тангенциальный модуль  $E_t = 2000$  МПа.

##### Параметры нагрузки

- растягивающая распределенная нагрузка по грани перпендикулярной оси Z:  $p = 300$  МПа;
- для моделирования двухосного напряженного состояния на грань, перпендикулярную оси X, дополнительно прикладывается сжимающее давление 500 МПа;
- для моделирования трехосного напряженного состояния на грань, перпендикулярную оси Y, дополнительно прикладывается сжимающая распределенная нагрузка 400 МПа.

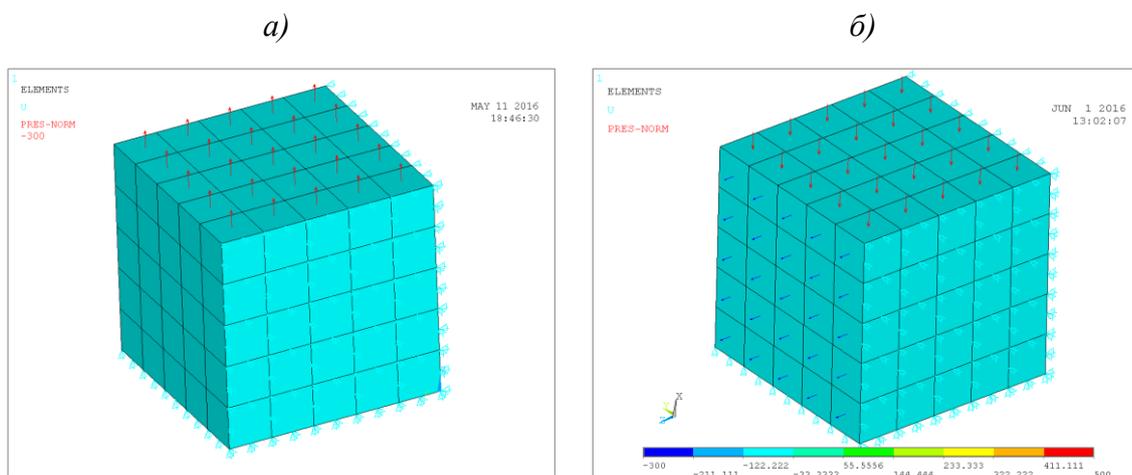


Рис. T101.1 Рассматриваемая КЭ-модель: одноосное напряженное состояние (а); двухосное (б)

#### Описание модели

Используются 20-ти узловые объемные элементы (в СТАДИО – элементы 20846, 3 точки интегрирования по каждому направлению, в ANSYS – SOLID186 с полной схемой интегрирования). Размер конечного элемента 0.1 м. Рассматривается четверть куба, заданы условия симметрии на трех гранях.

Таблица Т101.1. Результаты (максимальные значения)

№	Вариант		Суммарные перемещения, м	Главные деформации			Эквивалентные полные деформации		Эквивалентные пластические деформации		Эквивалентные напряжения, МПа	
				E1	E2	E3	Треска	Мизес	Треска	Мизес	Треска	Мизес
1	Одноосное напряженное состояние	СТАДИО	0.3111	0.5100e-1	-0.2520e-1	-0.2520e-1	0.7620e-1	0.5080e-1	0.7425e-1	0.4950e-1	300	300
		ANSYS	0.3111	0.5100e-1	-0.2520e-1	-0.2520e-1	0.7620e-1	0.5100e-1	0.7425e-1	0.4950e-1	300	300
		Δ,%	0	0	0	0	0	0.39	0	0	0	0
2	Двухосное напряженное состояние	СТАДИО	0.1534	0.1967	0.3566e-1	-0.2328	0.4295	0.2505	0.4243	0.2475	800	700
		ANSYS	0.1534	0.1967	0.3566e-1	-0.2328	0.4295	0.2510	0.4243	0.2475	800	700
		Δ,%	0	0	0	0	0	0.20	0	0	0	0
3	Трехосное напряженное состояние	СТАДИО	0.1702	0.2758	-0.1109	-0.1661	0.4419	0.2780	0.4367	0.2747	800	754.98
		ANSYS	0.1702	0.2758	-0.1109	-0.1661	0.4418	0.2785	0.4366	0.2747	800	754.98
		Δ,%	0	0	0	0	0	0.18	0	0	0	0

Примечание.

Напряжения и деформации приводятся в узлы (копируются) по ближайшей точке интегрирования.

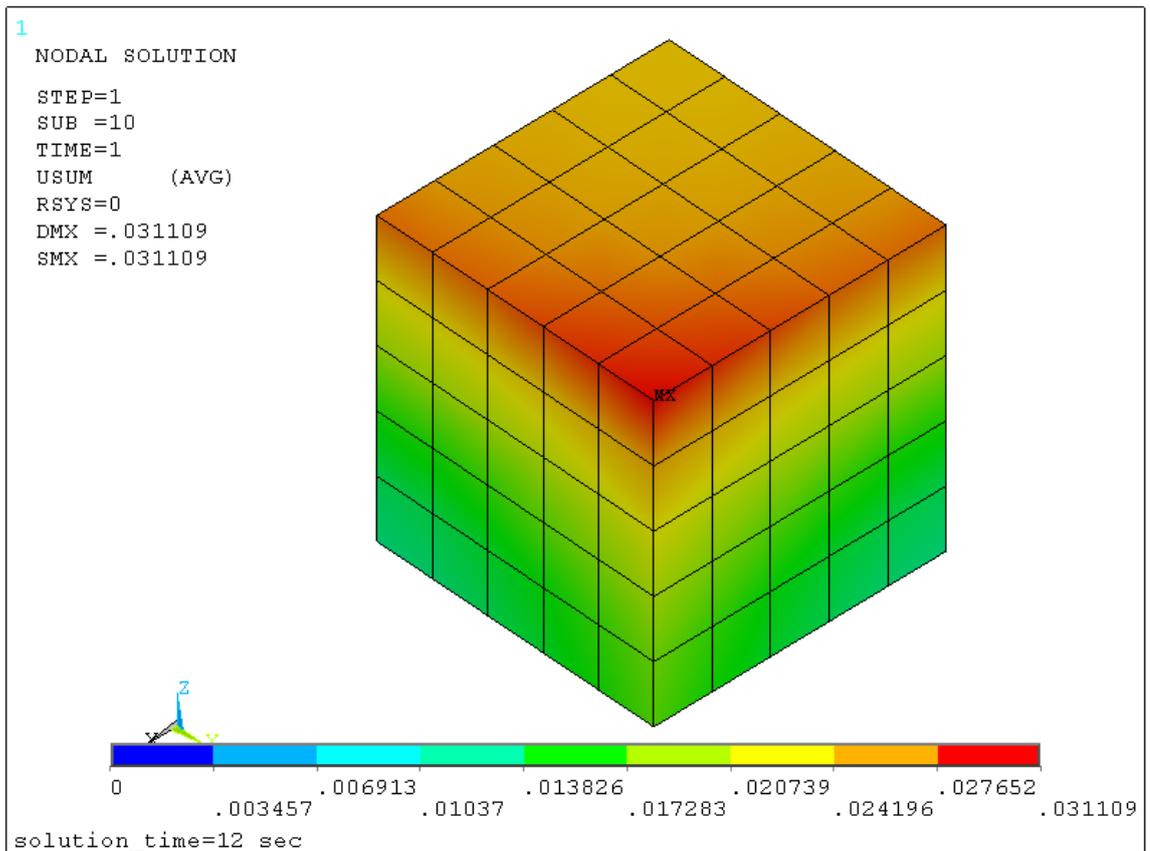
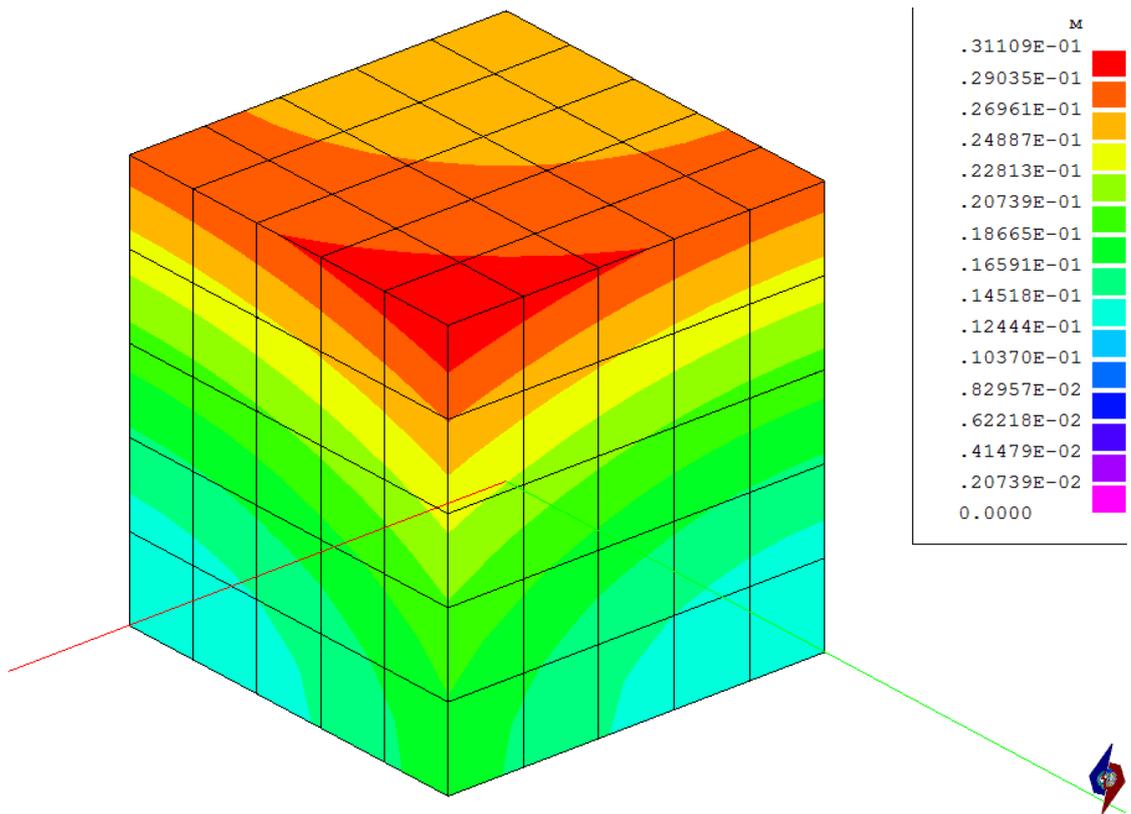


Рис. T101.2. Одноосное напряженное состояние. Суммарные перемещения, м

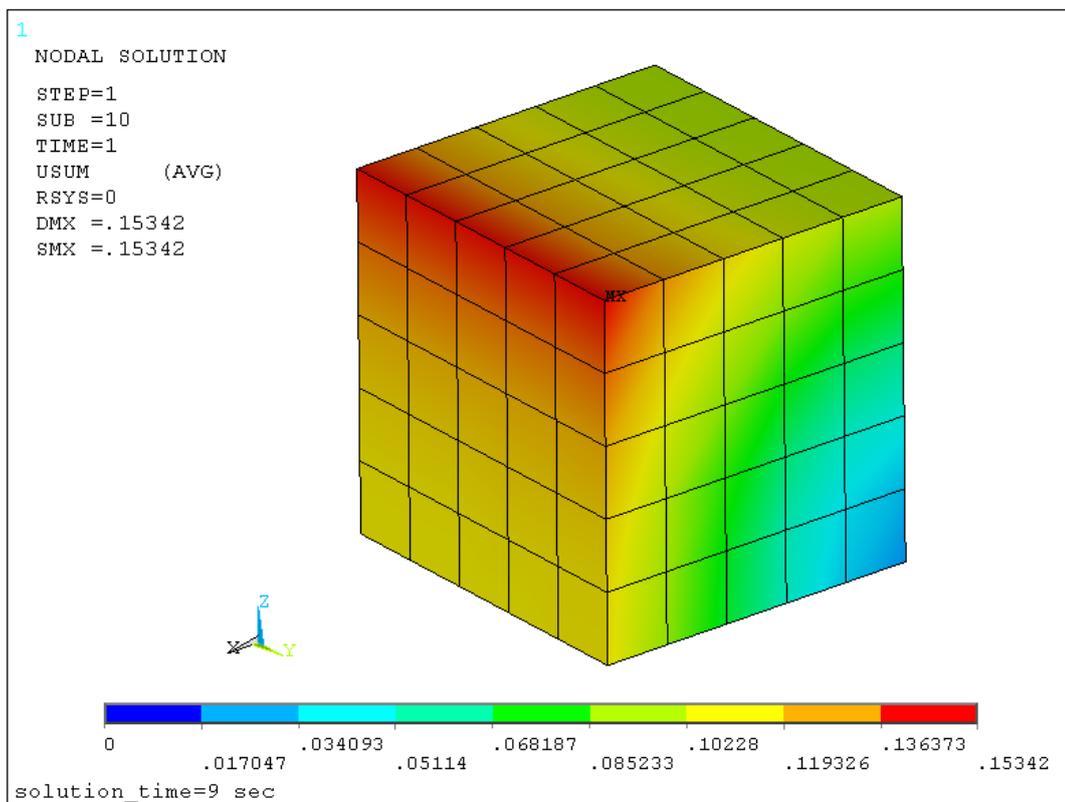
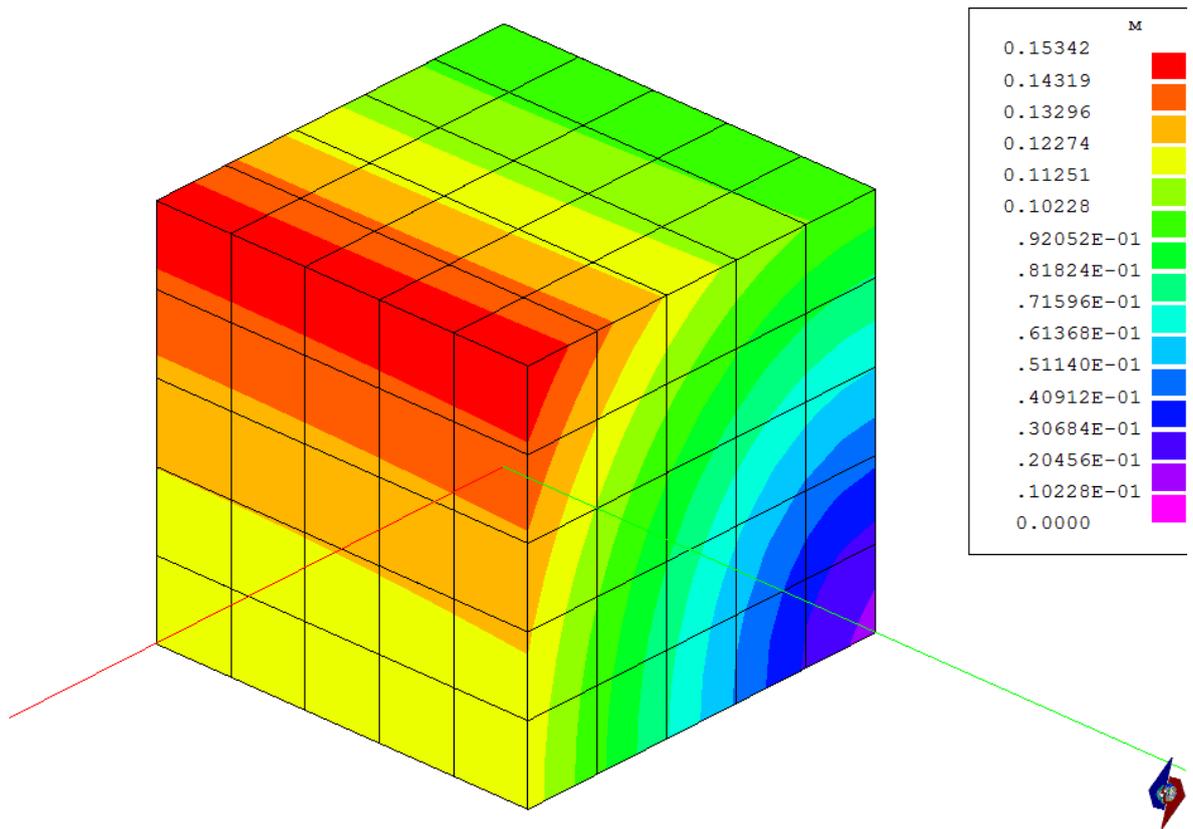


Рис. Т101.3. Двухосное напряженное состояние. Суммарные перемещения, м

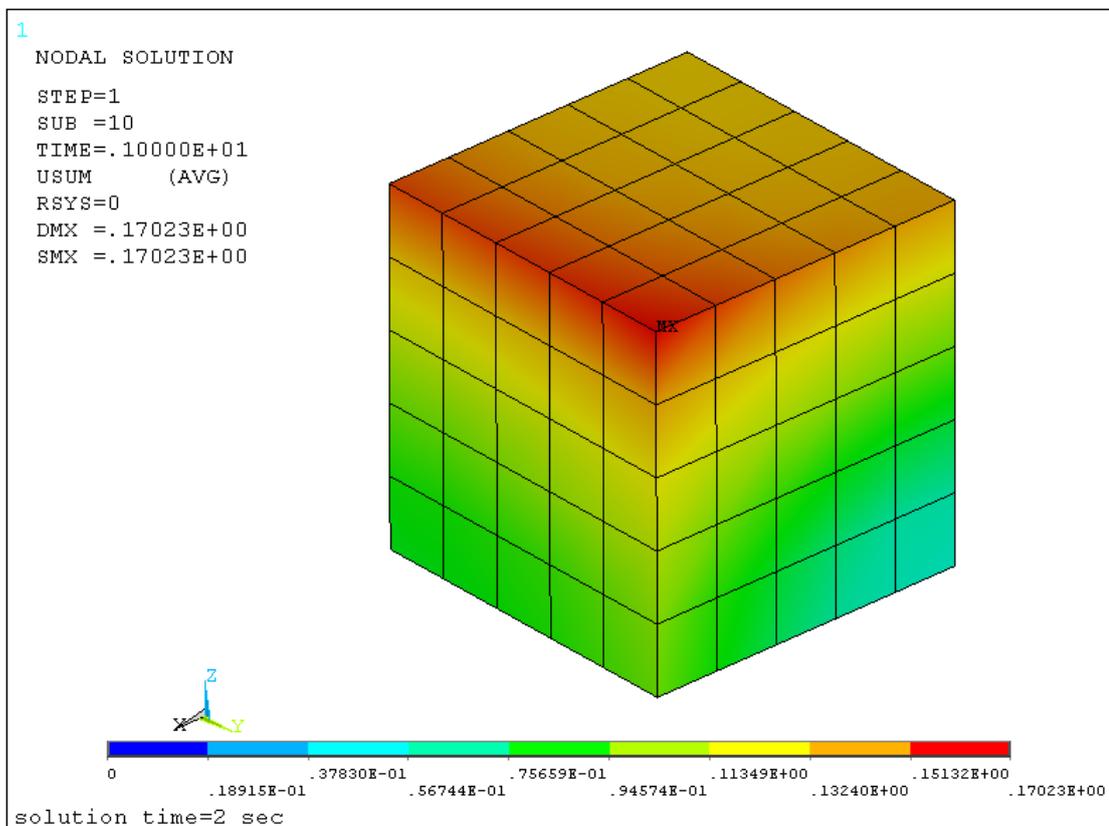
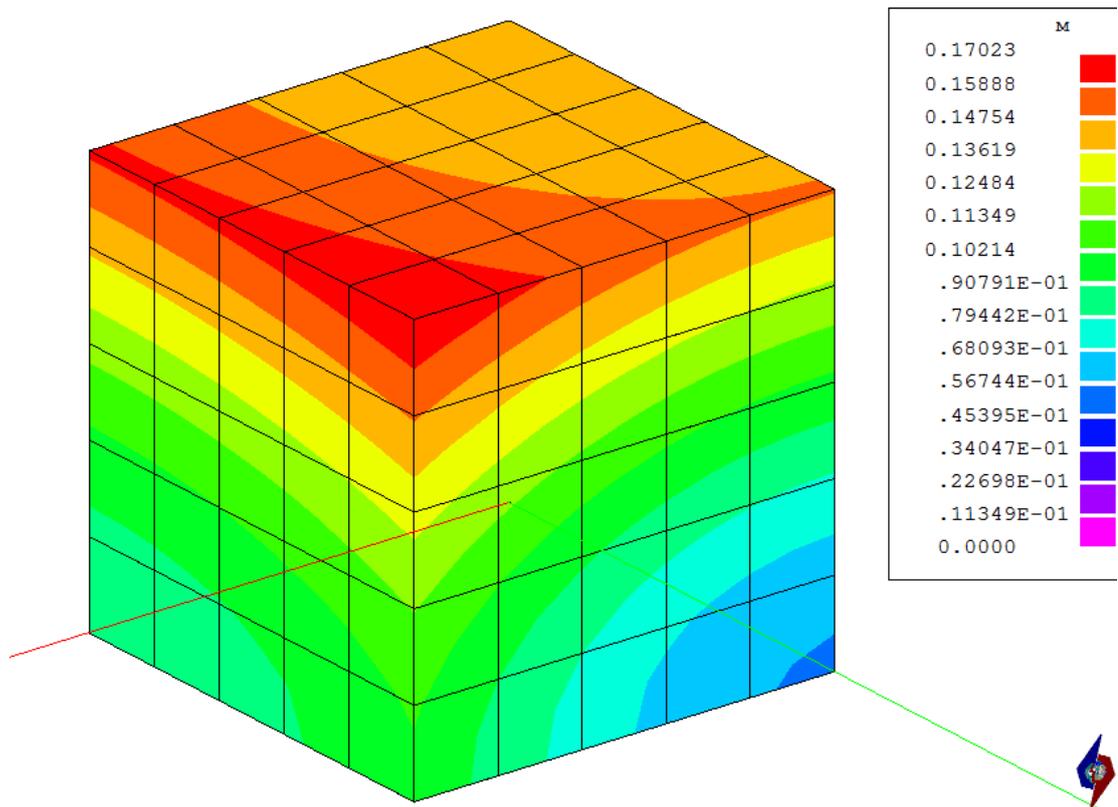


Рис. Т101.4. Трехосное напряженное состояние. Суммарные перемещения, м

## Заключение

Все результаты для ПК СТАДИО и Ansys совпадают, за исключением эквивалентных общих деформаций по Мизесу, которые вычисляются по несколько различным формулам:

В ANSYS

$$\varepsilon_e = \frac{1}{1+\nu'} \left( \frac{1}{2} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2] \right)^{\frac{1}{2}},$$

где эффективный коэффициент Пуассона для пластических деформаций принимается равным 0.5.

В СТАДИО

$$\varepsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \left( (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2} (\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{xz}^2 + \varepsilon_{yz}^2) \right)^{\frac{1}{2}}$$

При этом главные деформации совпадают, что говорит об идентичности тензоров деформаций, полученных в программных комплексах СТАДИО и ANSYS.

## **T102. Толстостенная труба под внутренним давлением**

### **Исходные данные**

#### *Геометрические характеристики*

- параметры трубы:  
наружный диаметр  $D = 95$  мм;  
толщина стенки  $S = 27.5$  мм.

#### *Физико-механические характеристики*

- модуль упругости  $E = 2.03e5$  МПа;
- коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ ;
- предел текучести  $\sigma_p = 850$  МПа;
- тангенциальный модуль  $E_t = 5e4$  МПа.

#### *Граничные условия*

- на свободном торце заданы пружины с жесткостью  $k = 0.001$  МН/м для линейных пружин,  $0.001$  МН·м/рад для угловых пружин.

#### *Параметры нагрузки*

- внутреннее давление  $p = 800$  МПа;
- напряжения на торцах для учета осевых сил от давления  $172.39$  МПа.

Таблица T102.1

Рассмотренные варианты задачи

№	
1	Линейно-упругая задача
2	Без упрочнения
3	Изотропное упрочнение
4	Нагрузка увеличена в 8 раз, изотропное упрочнение

### **Описание модели**

Используются 20-ти узловые объемные элементы (в СТАДИО – элементы 20846, 3 точки интегрирования по каждому направлению, в ANSYS – SOLID186 с полной схемой интегрирования). Рассматривается четверть трубы, заданы условия симметрии, один торец закреплен при помощи пружин (по всем 3-м степеням свободы).

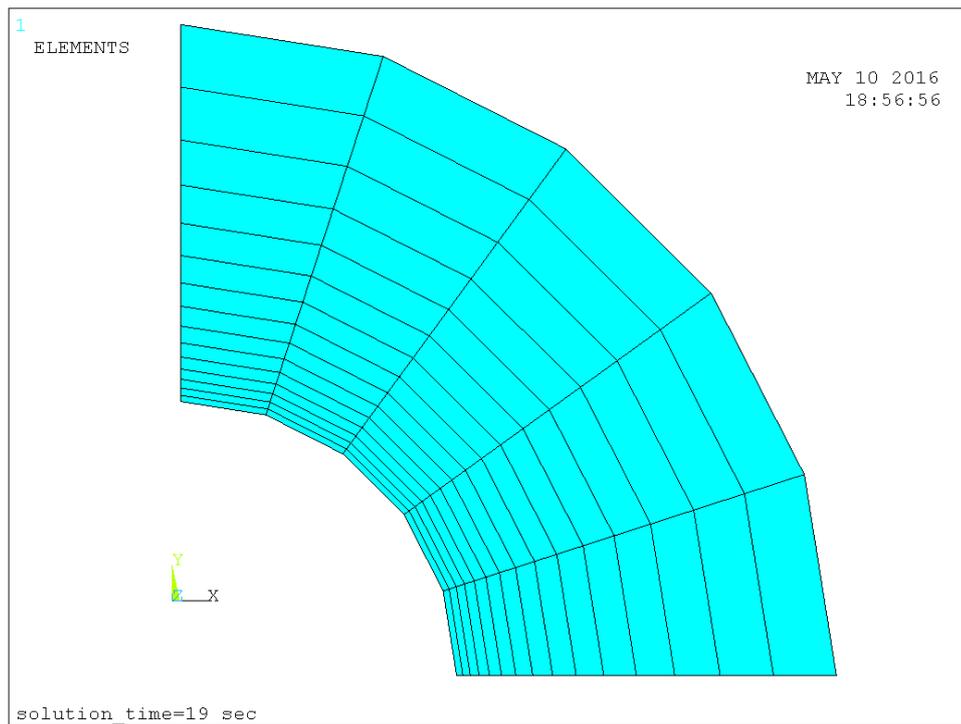
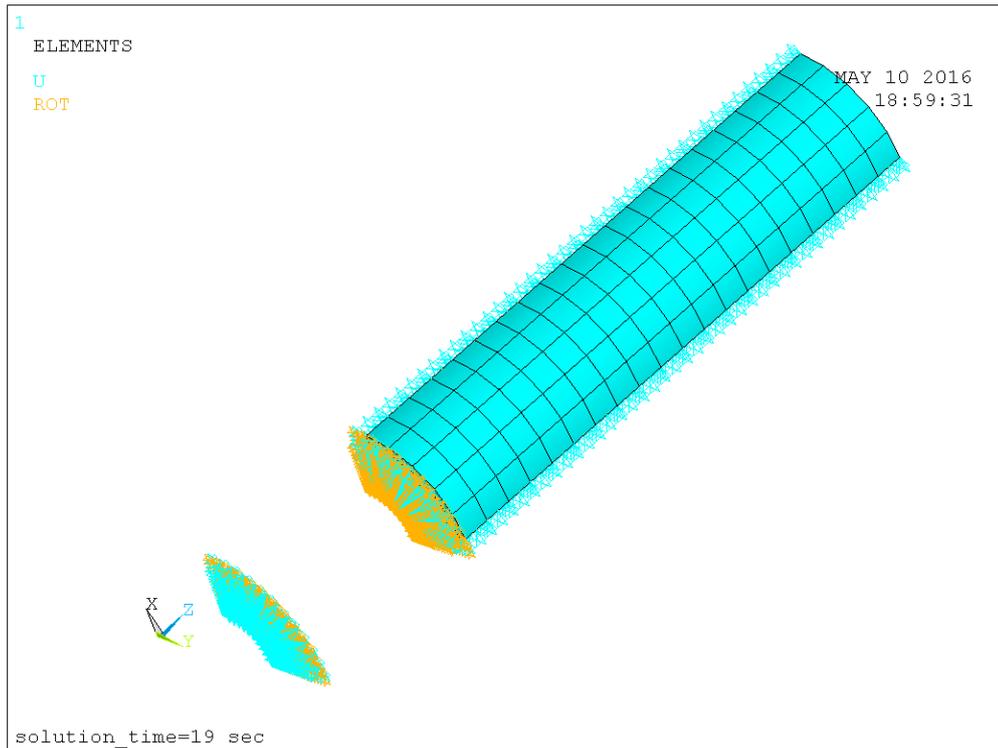


Рис. Т102.1 Расчетная модель

Таблица Т102.2. Сопоставление результатов

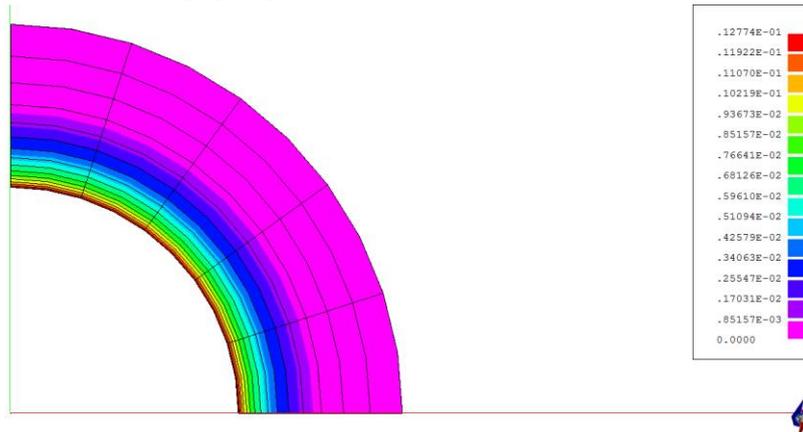
№ варианта		Эквивалентные полные деформации		Эквивалентные пластические деформации		Эквивалентные напряжения, МПа	
						по точкам интегрирования	
		Треска	Мизес	Треска	Мизес	Сен-Венан	Мизес
1	СТАДИО	0.01239	0.008254			1934.8	1675.60
	ANSYS	0.01239	0.008251			1934.1	1674.98
2	СТАДИО	0.028358	0.01893	0.02208	0.01277	981.49	850
	ANSYS	0.028375	0.01697	0.02210	0.01278	981.40	850
3	СТАДИО	0.018248	0.012170	0.009329	0.005392	1392.6	1207.7
	ANSYS	0.018242	0.011338	0.009325	0.005389	1392.5	1207.5
4	СТАДИО	0.4049	0.2697	0.3106	0.1793	14721.0	12748.0
	ANSYS	0.4048	0.2421	0.3105	0.1793	14715.6	12744.1

# АСТРА-СТАДИО (деформированная схема)

Пластическая деформация Мизеса



СТАДИО (201604)



# ANSYS

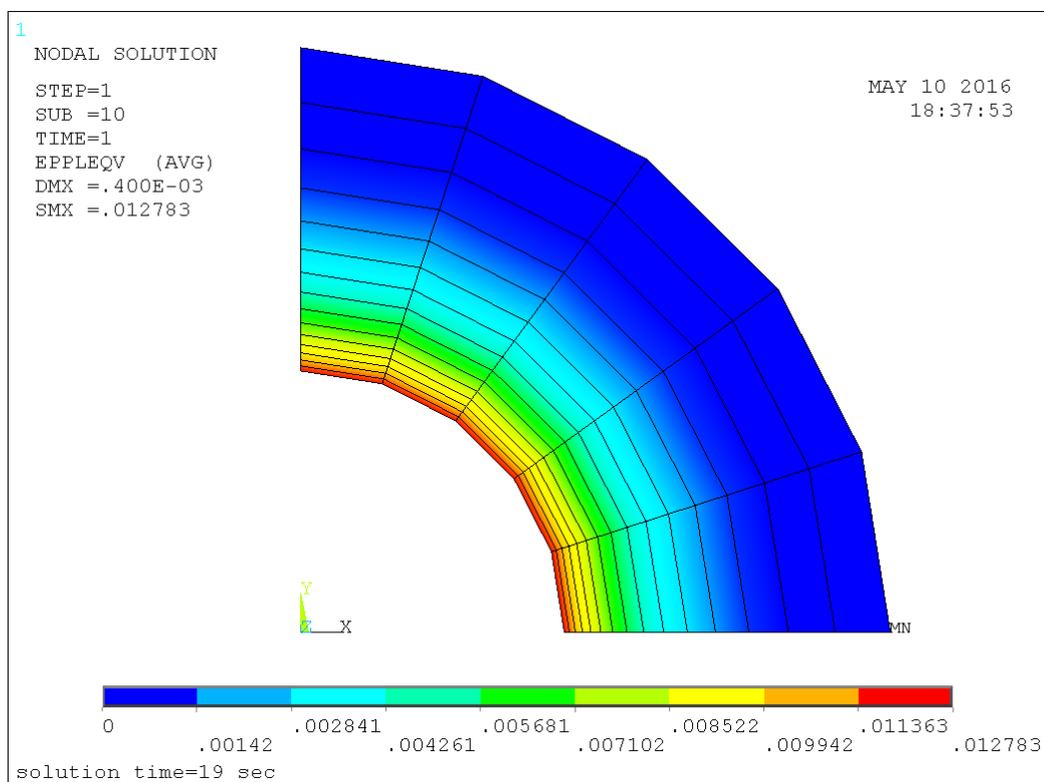
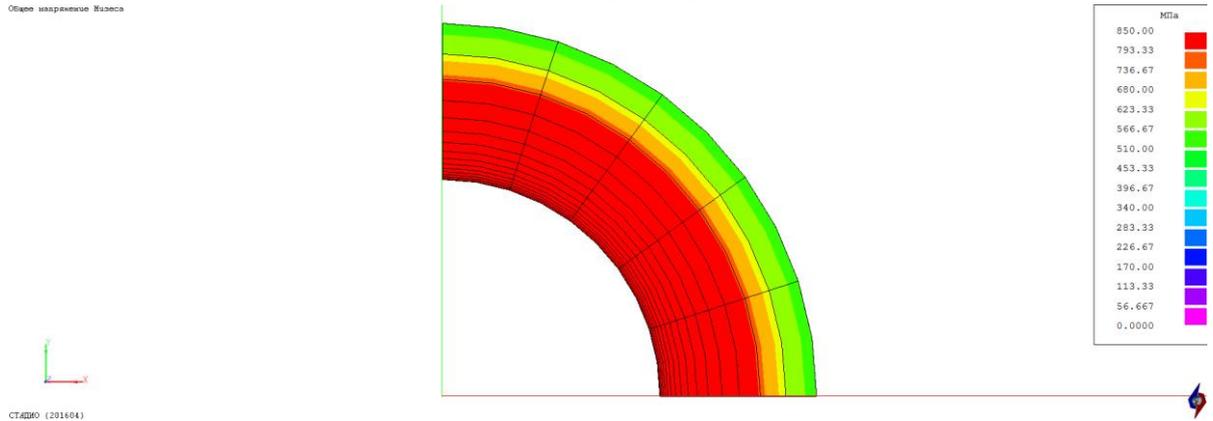


Рис. Т102.2. Вариант 2.Эквивалентные пластические деформации по Мизесу

# АСТРА-СТАДИО (деформированная схема)

Общие напряжения Мизеса



# ANSYS

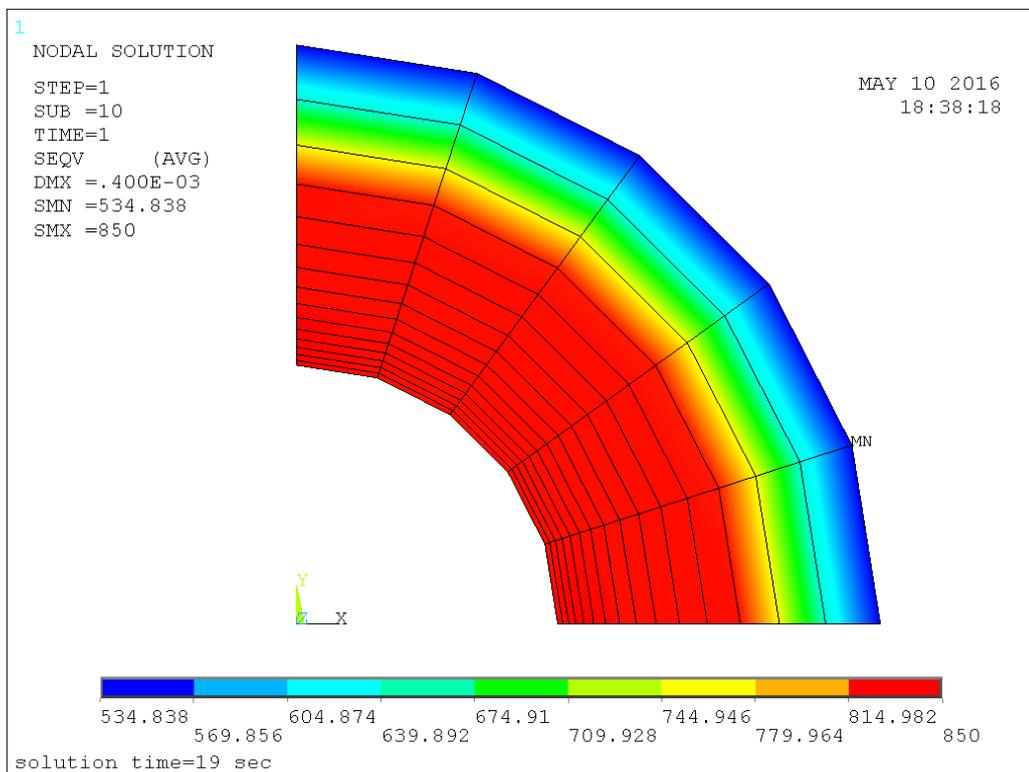


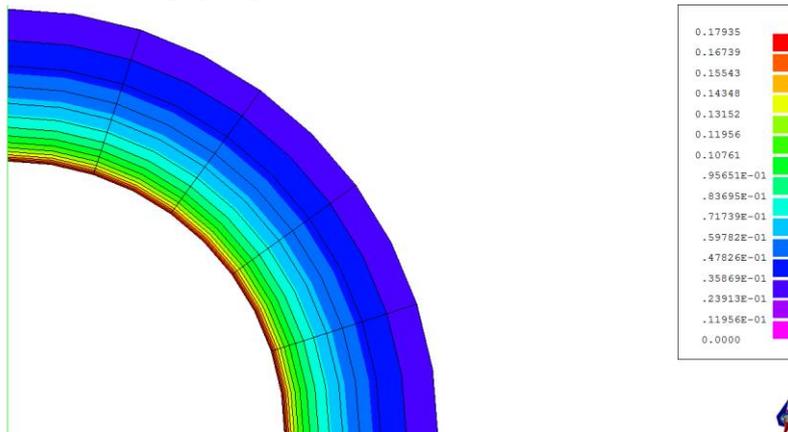
Рис. Т102.3. Вариант 2. Эквивалентные напряжения по Мизесу

# АСТРА-СТАДИО (деформированная схема)

Пластическая деформация Мизеса



СТАДИО (201604)



# ANSYS

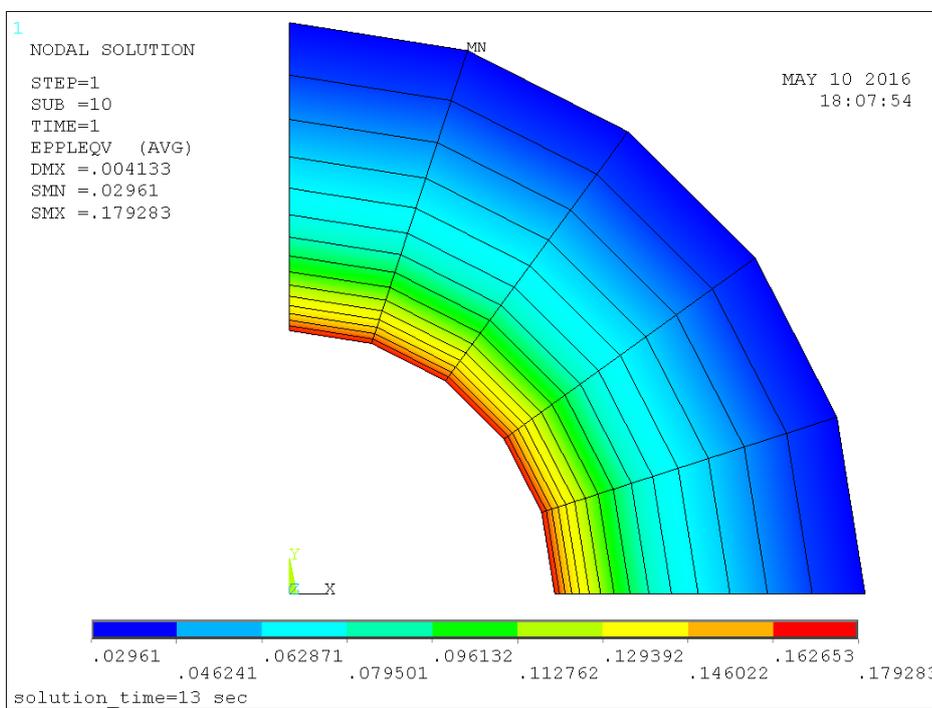
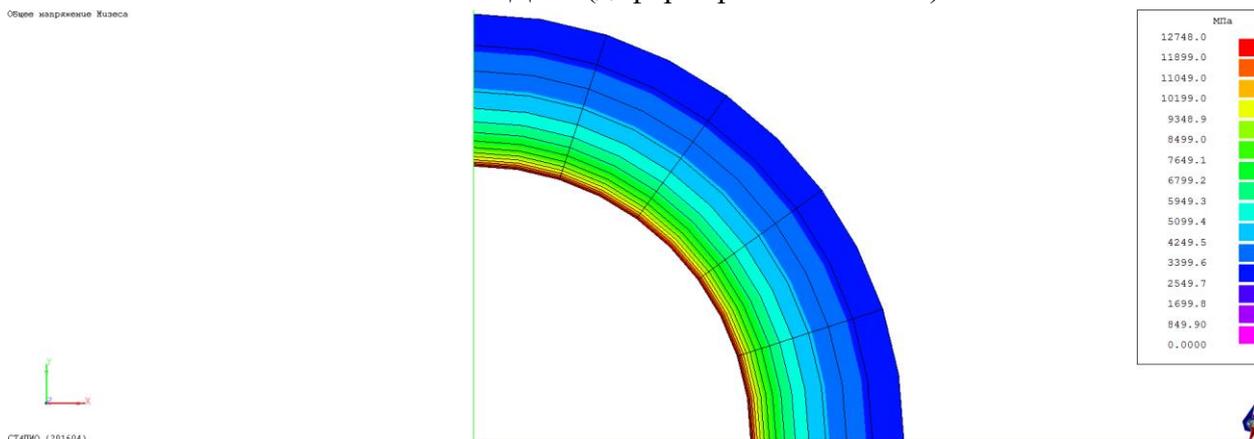


Рис. Т102.4. Вариант 4. Эквивалентные пластические деформации по Мизесу

## АСТРА-СТАДИО (деформированная схема)



## ANSYS

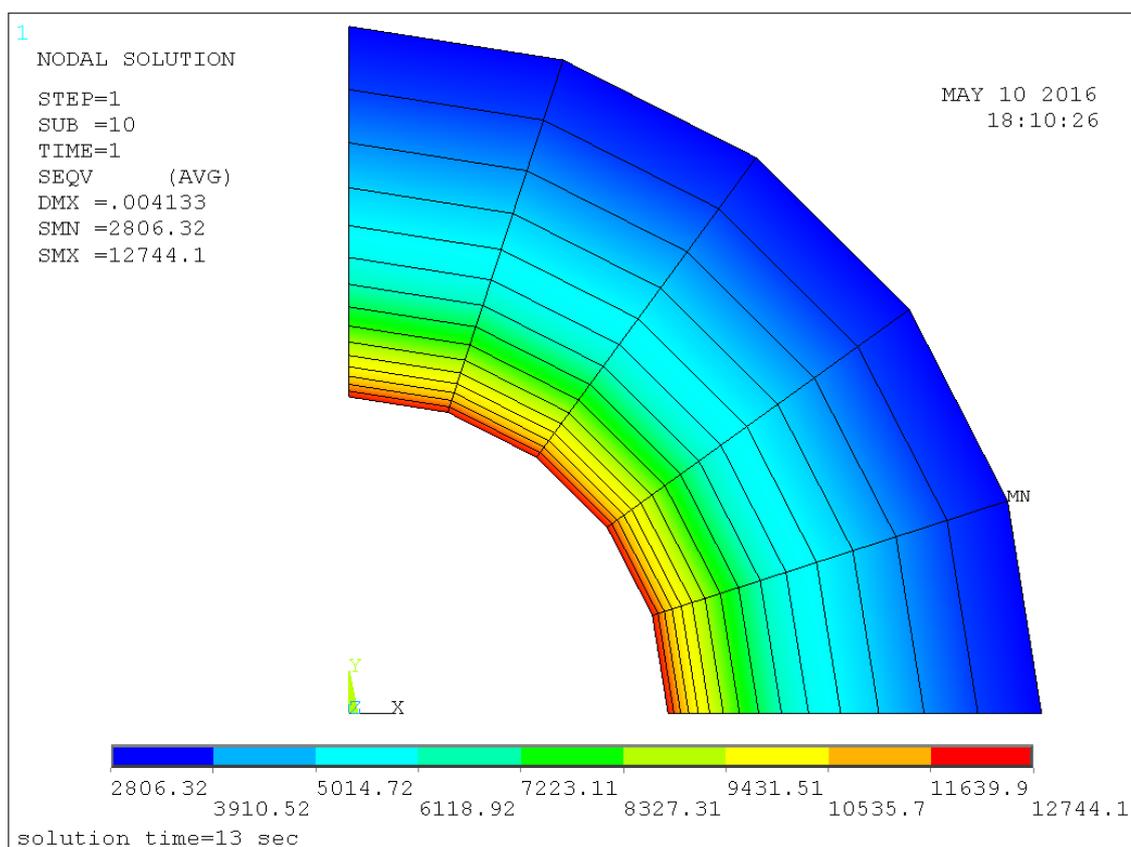


Рис. Т102.5. Вариант 4. Эквивалентные напряжения по Мизесу

### Заключение

1. Результаты по деформациям (общим и пластическим) и напряжениям, полученные в ПК СТАДИО и ANSYS, достаточно близки.
2. Различие в эквивалентных полных деформациях по Мизесу объясняется различием в применяемых формулах (см. Т101).

### **T103. Отвод под действием внутреннего давления**

Рассматривается криволинейный элемент трубы (отвод), находящийся под действием внутреннего давления. Материал отвода упругопластический, модель материала - билинейная с изотропным упрочнением.

#### **Исходные данные**

##### *Геометрические характеристики*

- параметры трубы:  
наружный диаметр  $D = 325$  мм;  
толщина стенки  $S = 15$  мм;
- радиус гiba  $R = 0.5$  м.

##### *Физико-механические характеристики*

- модуль упругости  $E = 2.0e5$  МПа;
- коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ ;
- предел текучести  $\sigma_p = 300$  МПа;
- тангенциальный модуль  $E_t = 200$  МПа.

##### *Граничные условия*

- жестко закреплены по Y узлы в середине торца;
- условия симметрии (рассматривается четверть отвода).

##### *Параметры нагрузки*

- внутреннее давление  $p = 30$  МПа;
- напряжения на торцах для учета осевых сил  $140.36$  МПа.

#### **Описание модели**

Используются объемные 20-ти узловые КЭ с 3-мя точками интегрирования по каждой оси. Заданы 3 слоя элементов по толщине гiba. Для материала использовалась модель изотропного упрочнения с билинейной диаграммой деформирования.

#### **Рассмотренные варианты**

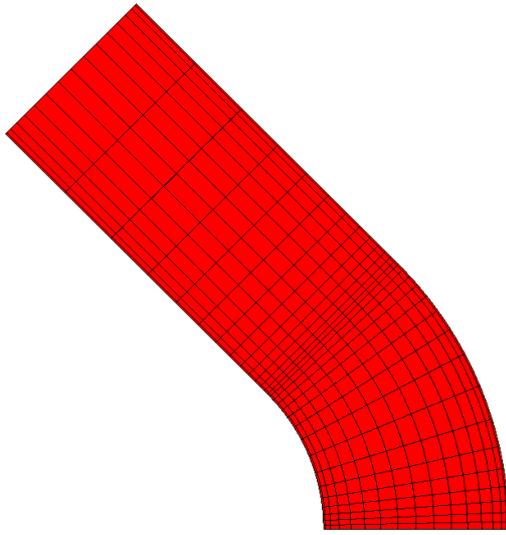
Для текущей версии АСТРА-СТАДИО (201611) рассмотрен единственный вариант нагружения - внутреннее давление и компенсирующая сила. Результаты сопоставляются (табл. T103.1) сначала для линейно-упругого материала, затем для упругопластического, заданного билинейной диаграммой деформирования с изотропным упрочнением.

В табл. T103.1 приведено сопоставление по ПК ANSYS и АСТРА-СТАДИО максимальных значений результатов: суммарных перемещений, эквивалентных полных и пластических деформаций по критериям Треска и Мизеса, эквивалентных напряжений по критериям Треска и Мизеса.

ИСКЭ 20



АСТРА-СТАДИО (201605) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ  
ИСКЭ 20



АСТРА-СТАДИО (201605) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

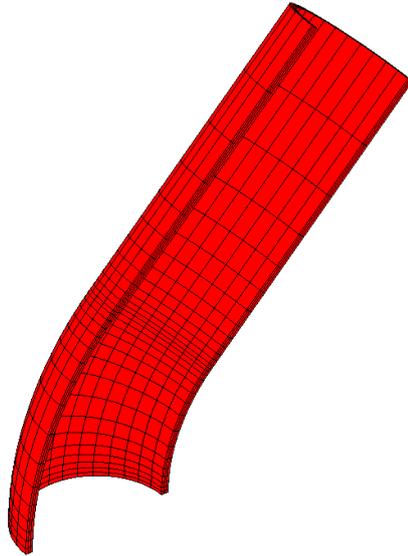


Рис. Т103.1. Расчетная схема

Таблица Т103.1. Результаты (максимальные значения)

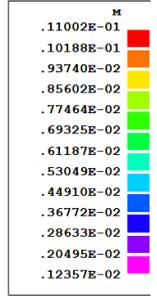
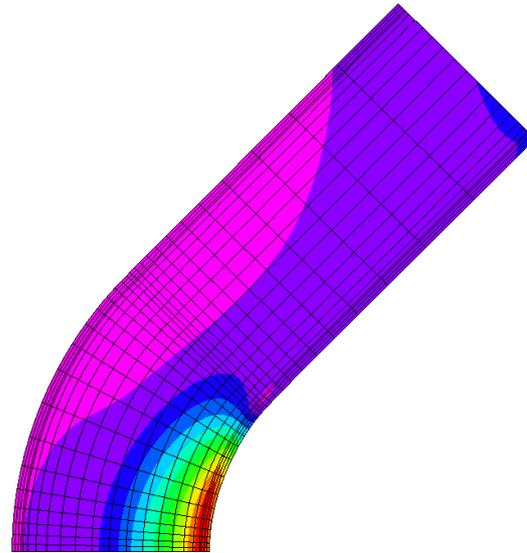
№	Вариант		Суммарные перемещения, м	Эквивалентные полные деформации		Эквивалентные пластические деформации		Эквивалентные напряжения, МПа	
				Треска	Мизес	Треска	Мизес	Треска	Мизес
1.1	Давление, линейно-упругая модель	СТАДИО	0.7002e-3	0.2680e-2	0.1560e-2			412.28	360.12
		ANSYS	0.7000e-3	0.2679e-2	0.1800e-2			412.10	359.93
		Δ,%	0	0.04	13.33			0.04	0.05
1.2	Давление, упруго-пластическая модель	СТАДИО	0.1100e-1	0.2057	0.1212	0.2033	0.1198	366.69	324.00
		ANSYS	0.1095e-1	0.1991	0.1177	0.1968	0.1161	365.20	323.24
		Δ,%	0.46	3.31	2.97	3.30	3.19	0.41	0.23

# АСТРА-СТАДИО

Суммарные перемещения



АСТРА-СТАДИО (201605) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



ANSYS

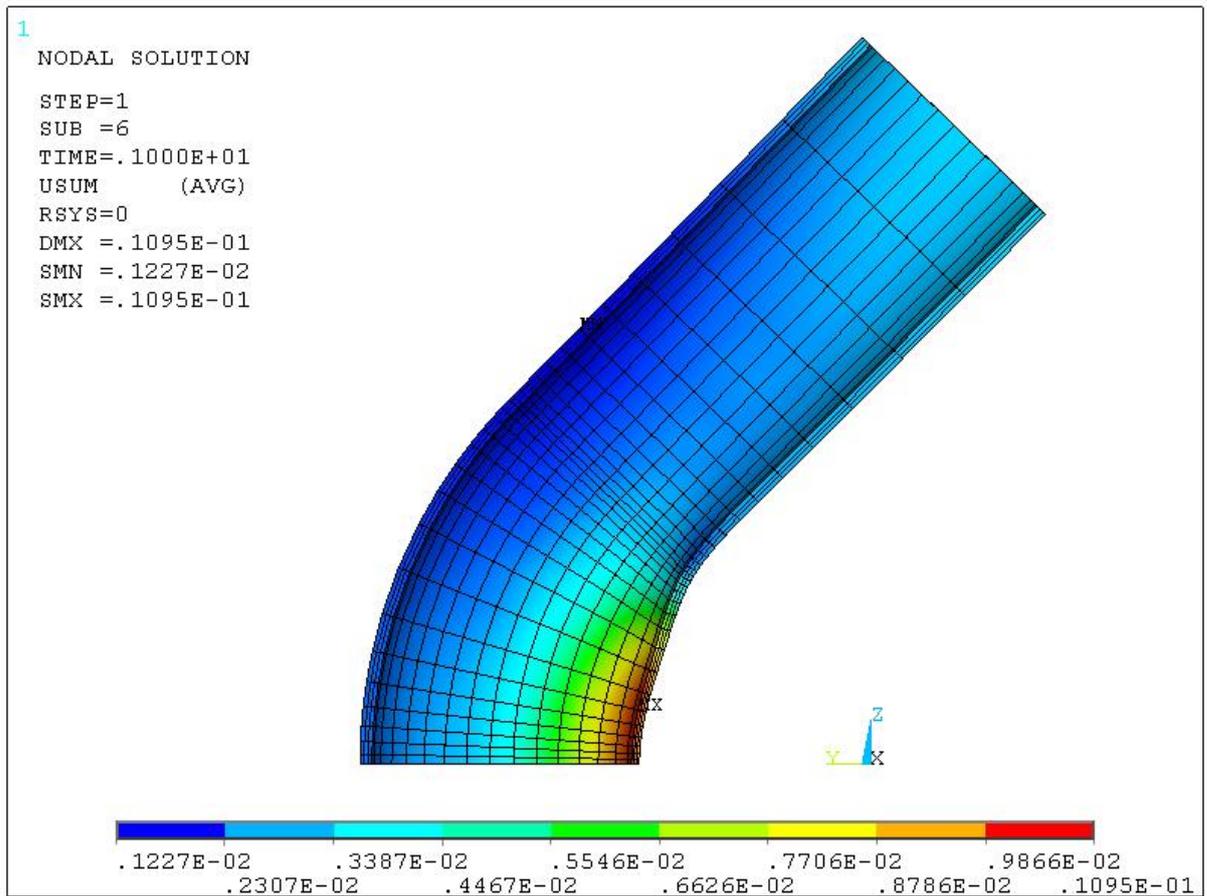


Рис. Т103.2. Суммарные перемещения, м. Вариант 1.2 (внутреннее давление, упругопластическая модель материала)

# АСТРА-СТАДИО

Общая деформация Треска  
Min/Max по точкам интегрирования 0.000585944 / 0.278657

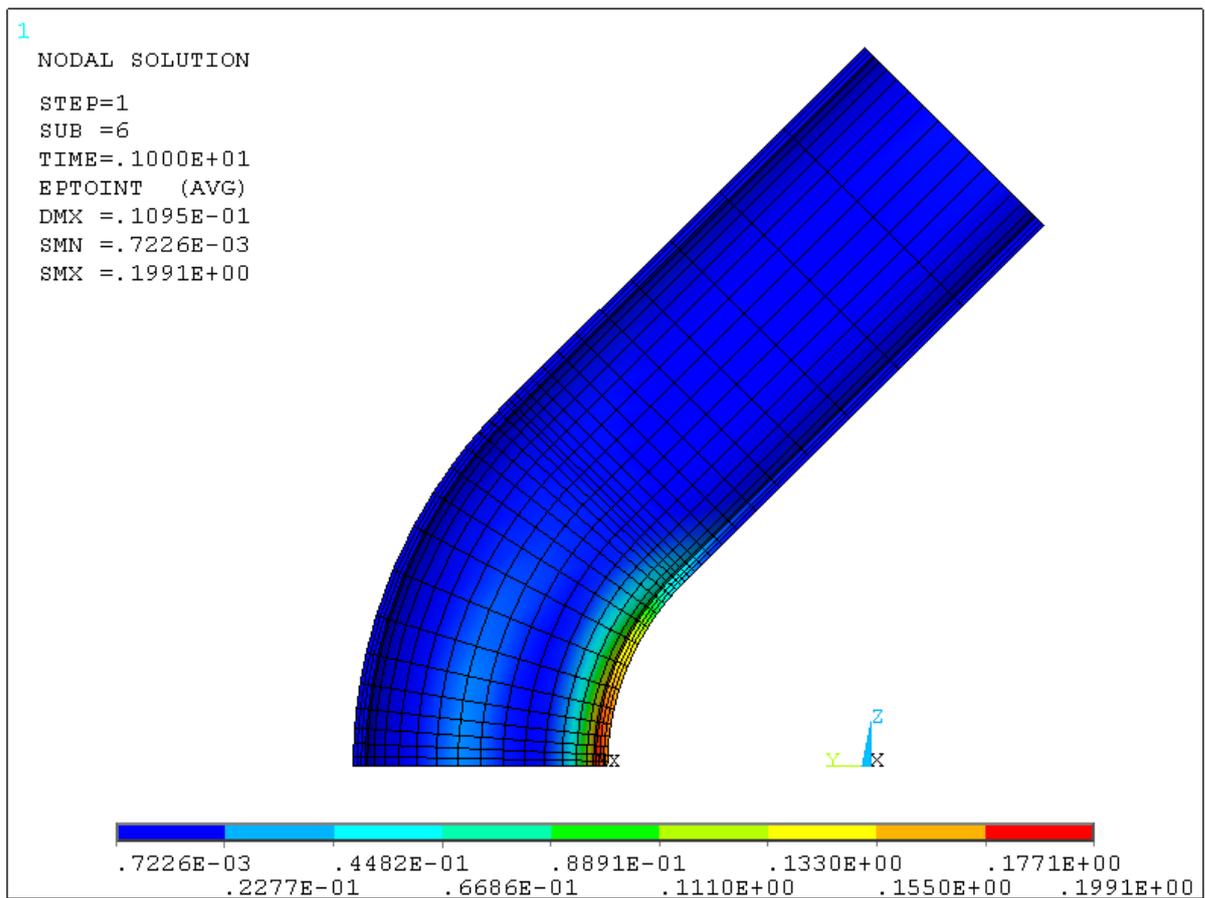
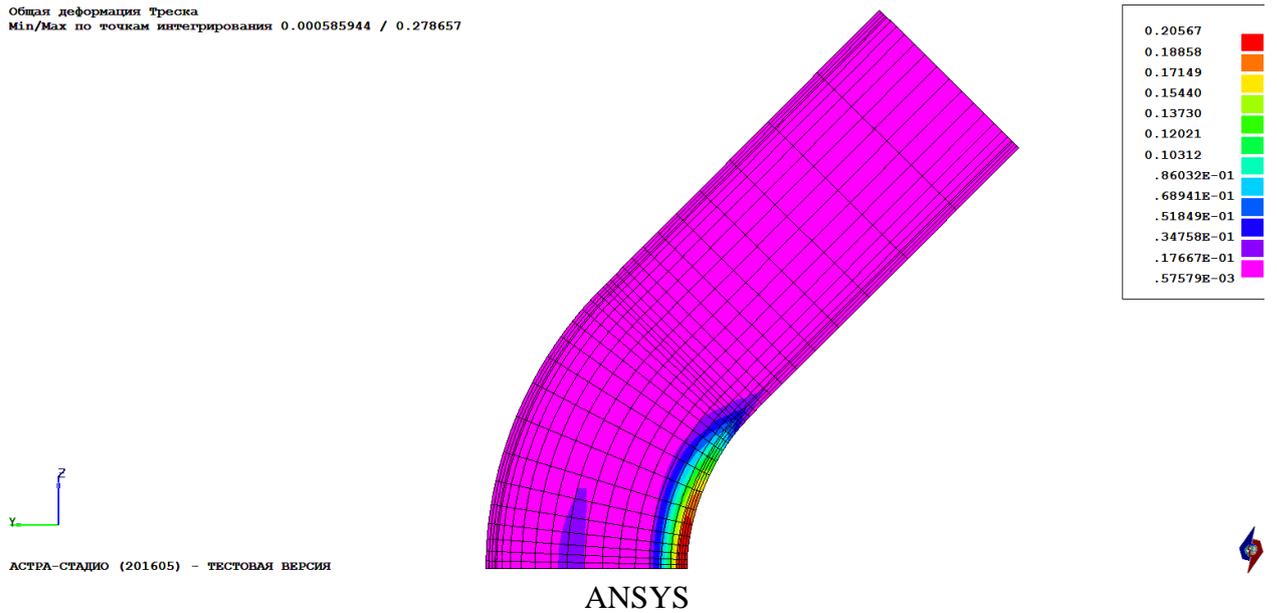


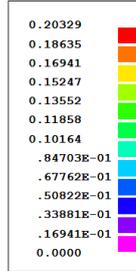
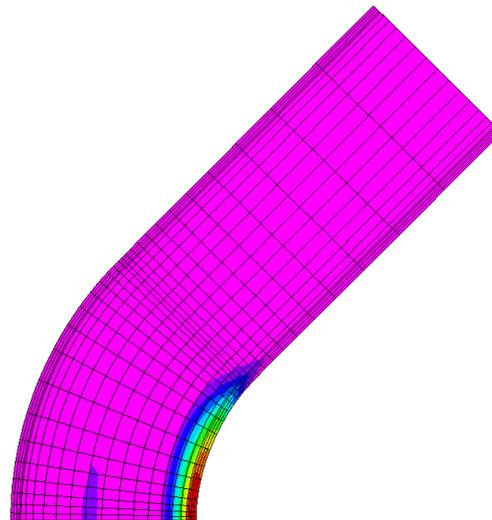
Рис. Т103.3. Полные эквивалентные деформации Треска. Вариант 1.2 (внутреннее давление, упругопластическая модель материала)

# АСТРА-СТАДИО

Пластическая деформация Треска  
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.275438



АСТРА-СТАДИО (201605) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



ANSYS

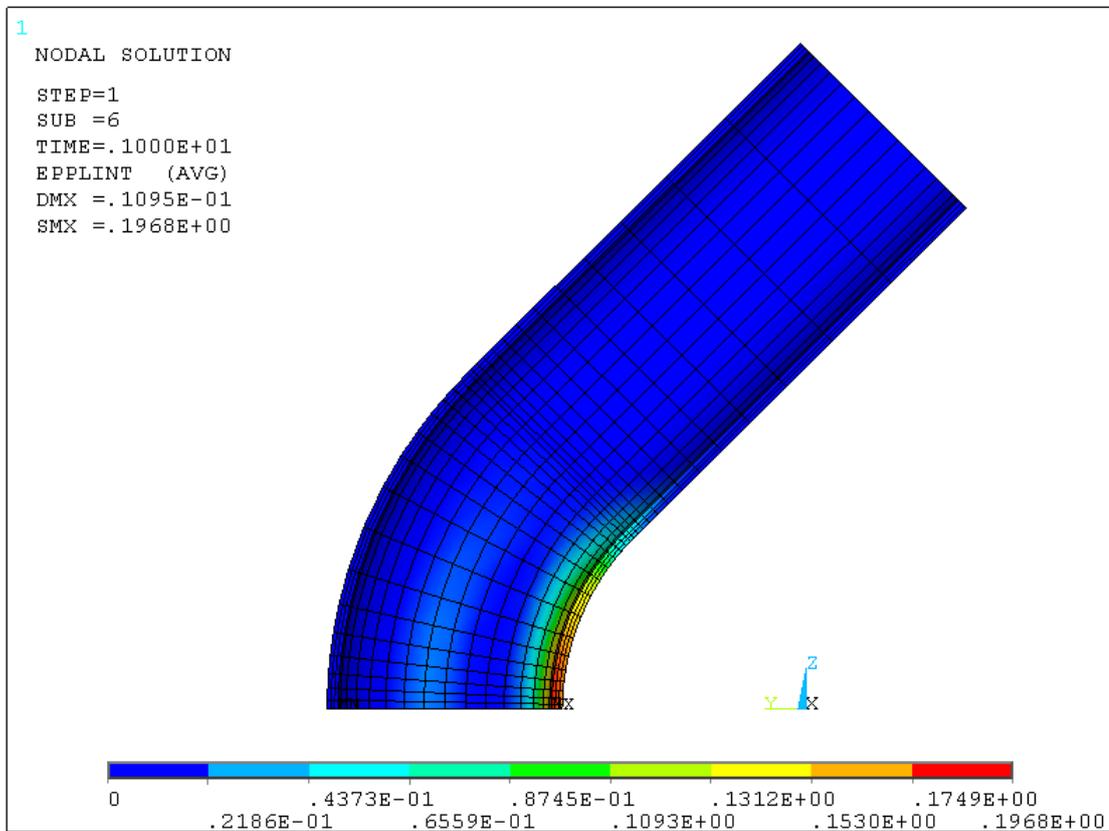


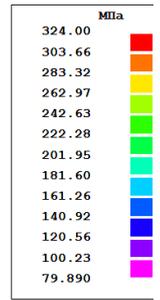
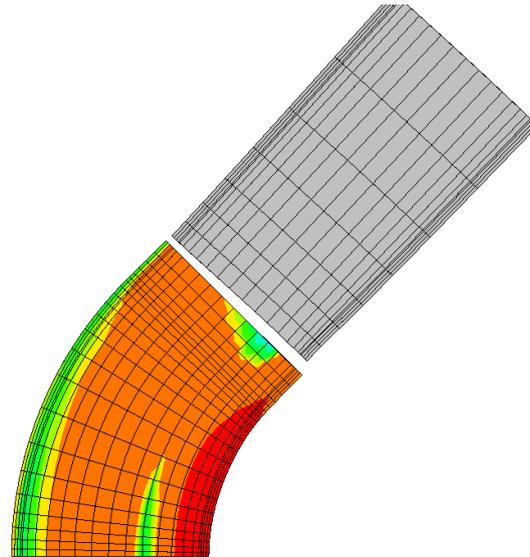
Рис. T103.4. Эквивалентные пластические деформации Треска. Вариант 1.2 (внутреннее давление, упругопластическая модель материала)

# АСТРА-СТАДИО

Напряжение Мизеса  
Min/Max по точкам интегрирования 79.8898 / 324.001 МПа



АСТРА-СТАДИО (201605) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



ANSYS

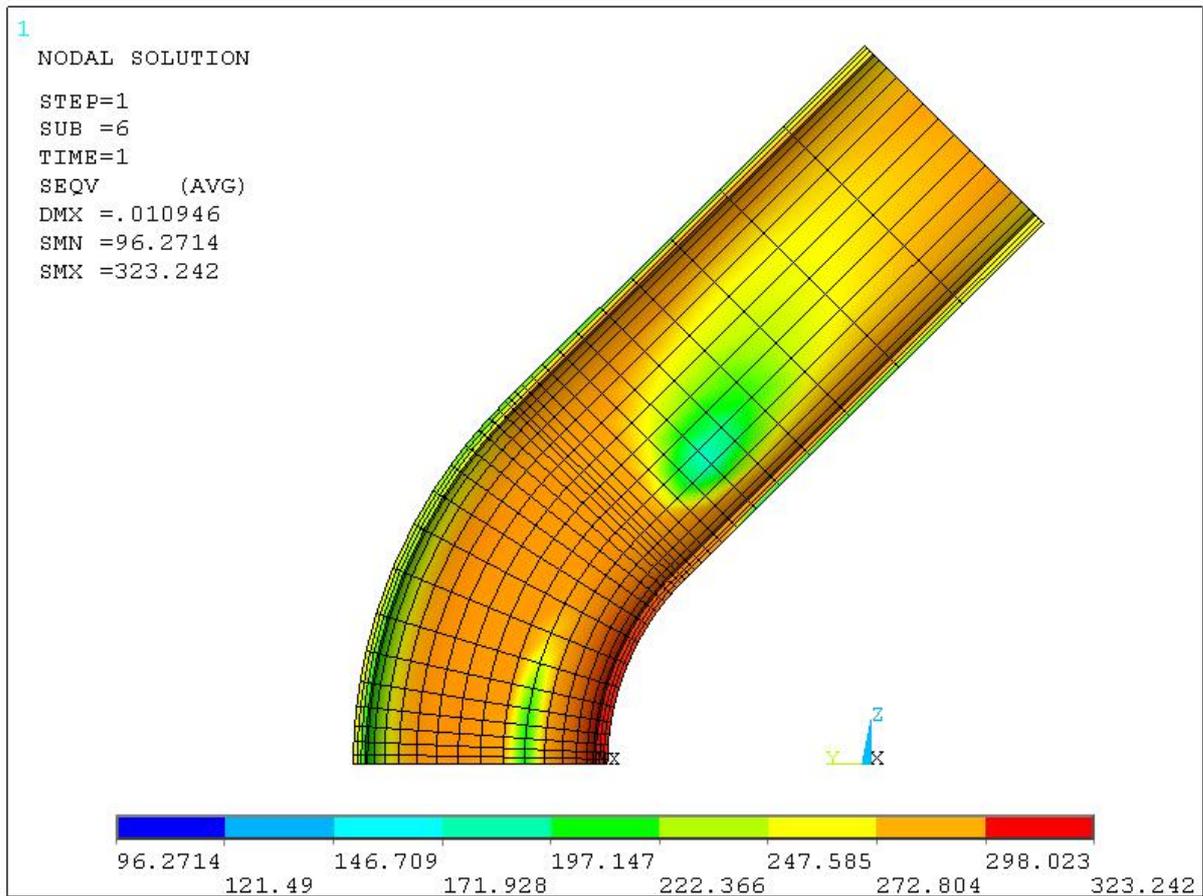


Рис. Т103.5. Эквивалентные напряжения по Мизесу. Вариант 1.2 (внутреннее давление, упругопластическая модель материала)

### **Заключение**

Наибольшее расхождение результатов в упругопластическом расчете по ANSYS и АСТРА-СТАДИО составило 3.31% (эквивалентные полные деформации по критерию Треска).

Полученные в расчете пластические деформации достаточно высокие (20% по Треска), таким образом, сравнение проводилось для случая развитой пластичности.

## **T104. Тройник**

Рассматривается тройник, находящийся под действием внутреннего давления. Материал тройника упругопластический (билинейная диаграмма деформирования с изотропным упрочнением).

### **Исходные данные**

#### *Геометрические характеристики*

- параметры основной трубы (магистрала):
  - наружный диаметр  $D = 630$  мм;
  - толщина стенки  $S = 18$  мм;
  - половинная длина  $L = 1422.5$  мм;
  
- параметры штуцера (ответвления):
  - наружный диаметр  $d = 325$  мм;
  - толщина стенки  $s = 13$  мм;
  - длина  $l = 956$  мм.

#### *Физико-механические характеристики*

- модуль упругости  $E = 2e5$  МПа;
- коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ ;
- предел текучести  $\sigma_p = 300$  МПа;
- тангенциальный модуль  $E_t = 200$  МПа.

#### *Граничные условия*

- жестко закреплены по  $Y$  узлы в середине торца магистрали;
- условия симметрии (рассматривается четверть тройника).

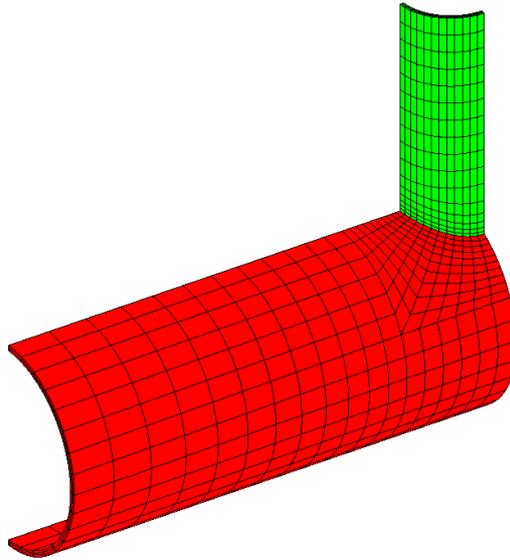
#### *Параметры нагрузки*

- внутреннее давление  $p = 11$  МПа
- осевые силы от давления, задаются как растягивающие напряжения на торцы: магистраль – 61.336 МПа, штуцер – 42.21 МПа.

ИСКЭ 20



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



ИСКЭ 20



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

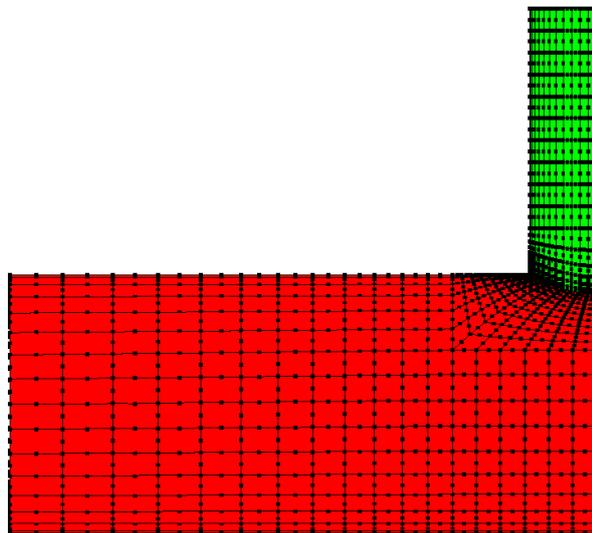


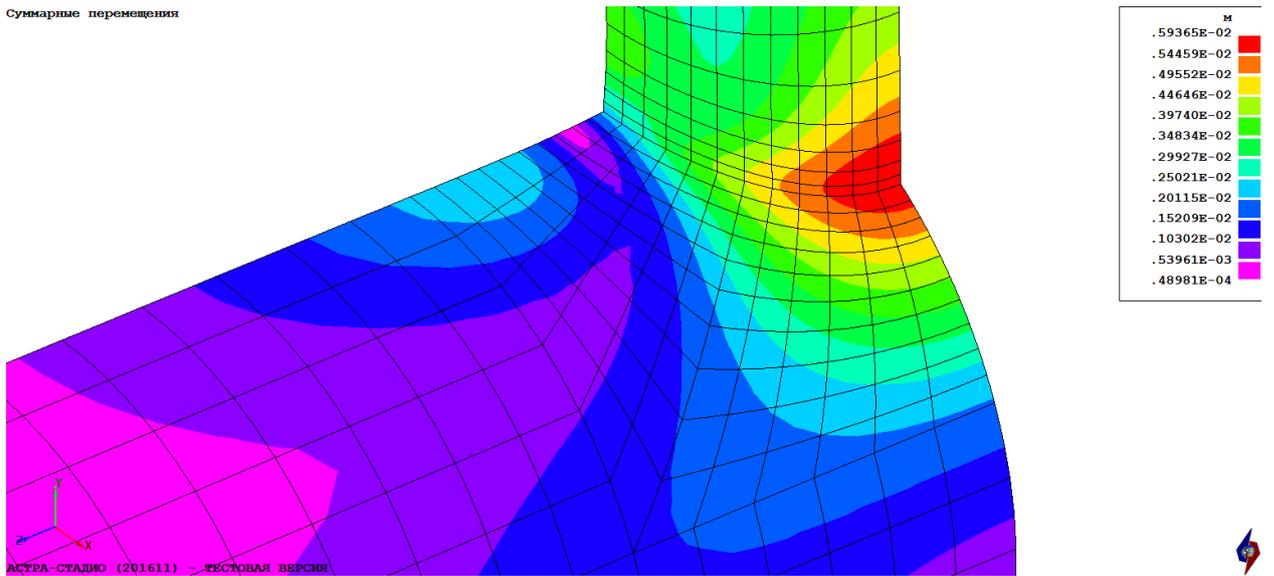
Рис. Т104.1. Расчетная схема

Таблица Т104.1. Результаты (максимальные значения)

№	Вариант		Суммарные перемещения, м	Эквивалентные полные деформации		Эквивалентные пластические деформации		Эквивалентные напряжения, МПа	
				Треска	Мизес	Треска	Мизес	Треска	Мизес
1.1	Давление, линейно-упругая модель	СТАДИО	0.1028e-2	0.5550e-2	0.3475e-2			853.83	801.81
		ANSYS	0.1026e-2	0.5410e-2	0.4001e-2			832.26	800.14
		Δ,%	0.19	2.59	13.15			2.59	0.21
1.2	Давление, упруго-пластическая модель	СТАДИО	0.5936e-2	0.2122	0.1267	0.2098	0.1253	363.38	325.11
		ANSYS	0.5926e-2	0.2110	0.1263	0.2086	0.1247	362.82	324.97
		Δ,%	0.17	0.57	0.32	0.57	0.48	0.15	0.04

# АСТРА-СТАДИО

Суммарные перемещения



ANSYS

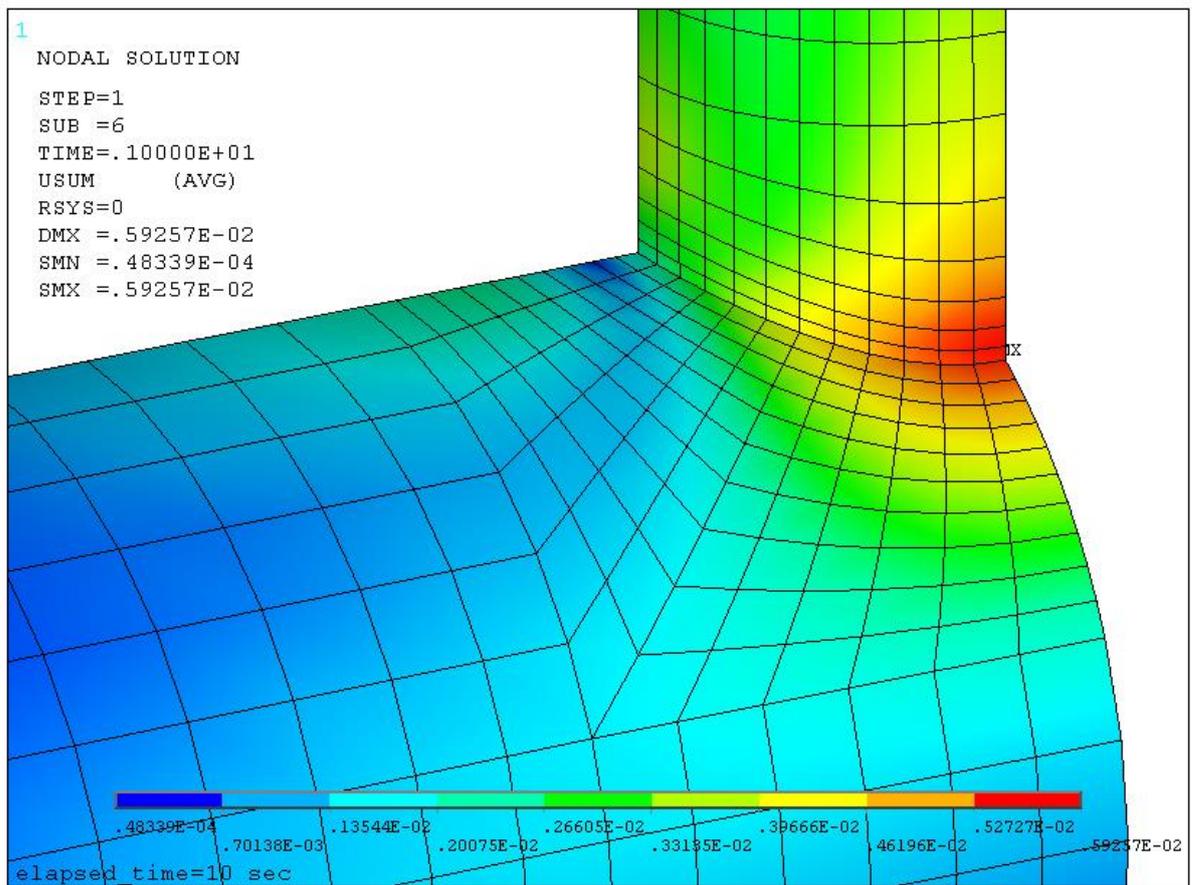
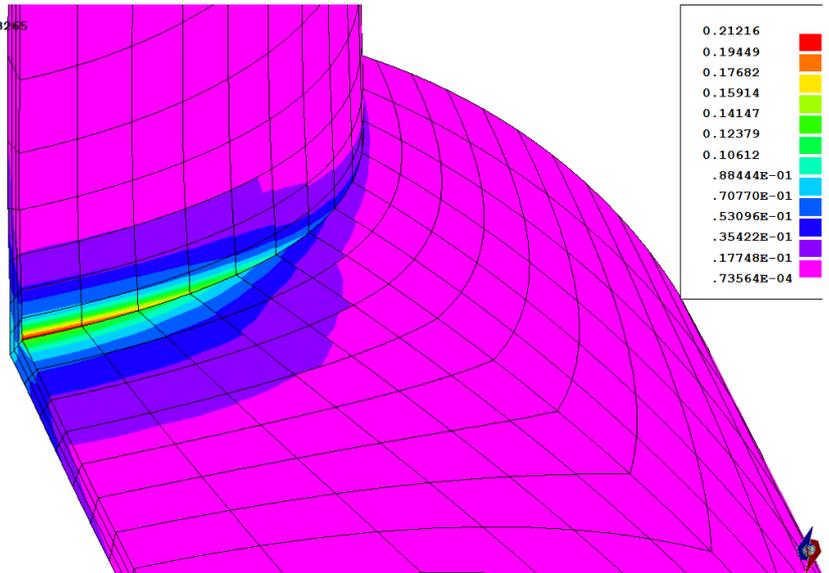


Рис. Т104.2. Суммарные перемещения, м. Вариант 1.2 (внутреннее давление, упругопластическая модель материала)

# АСТРА-СТАДИО

Общая деформация Треска  
Min/Max по точкам интегрирования 9.56665E-005 / 0.373265



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

ANSYS

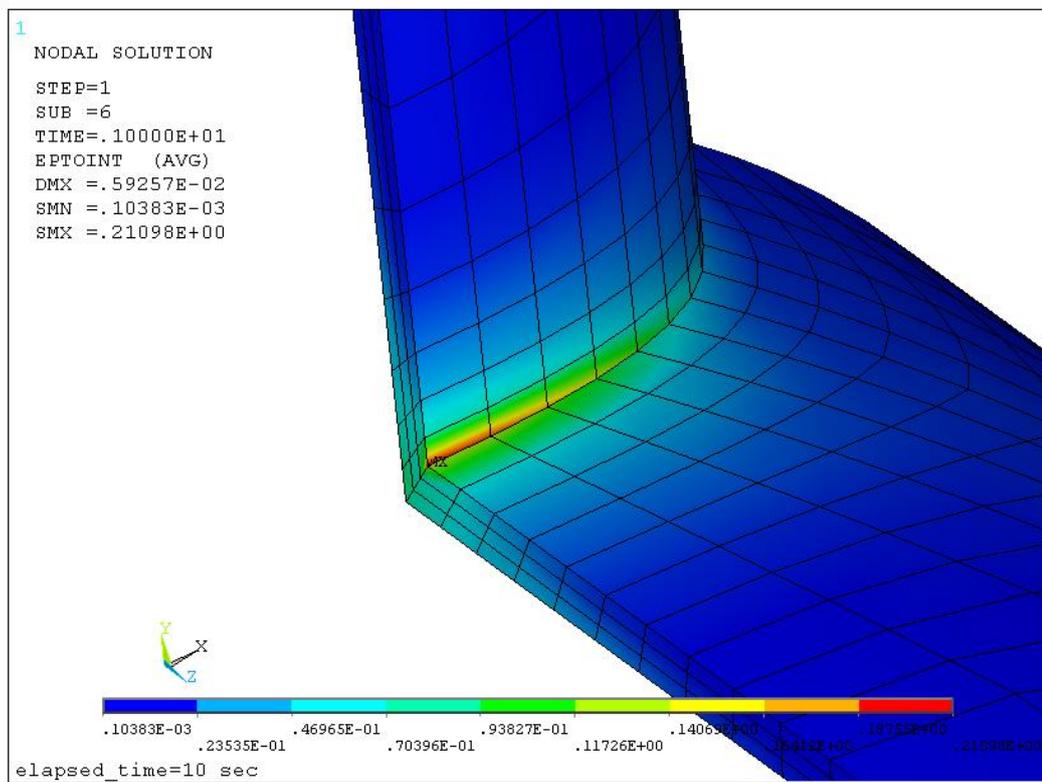
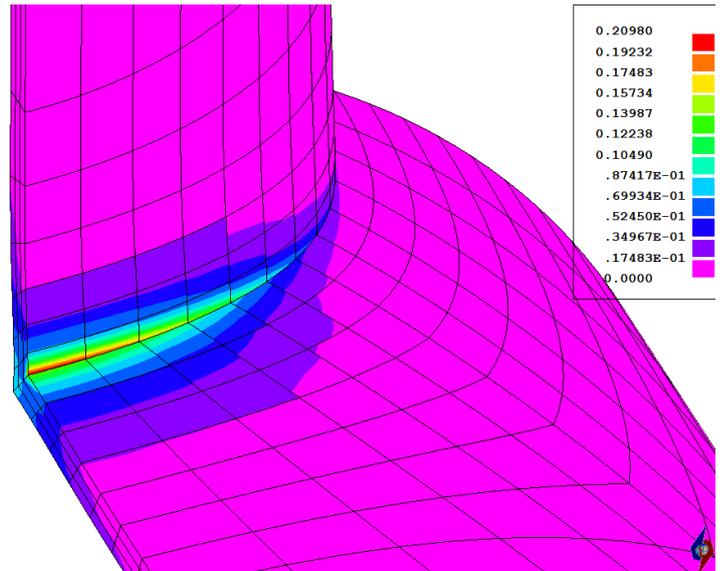


Рис. Т104.3. Полные эквивалентные деформации Треска. Вариант 1.2 (внутреннее давление, упругопластическая модель материала)

# АСТРА-СТАДИО

Пластическая деформация Треска  
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.369123



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

ANSYS

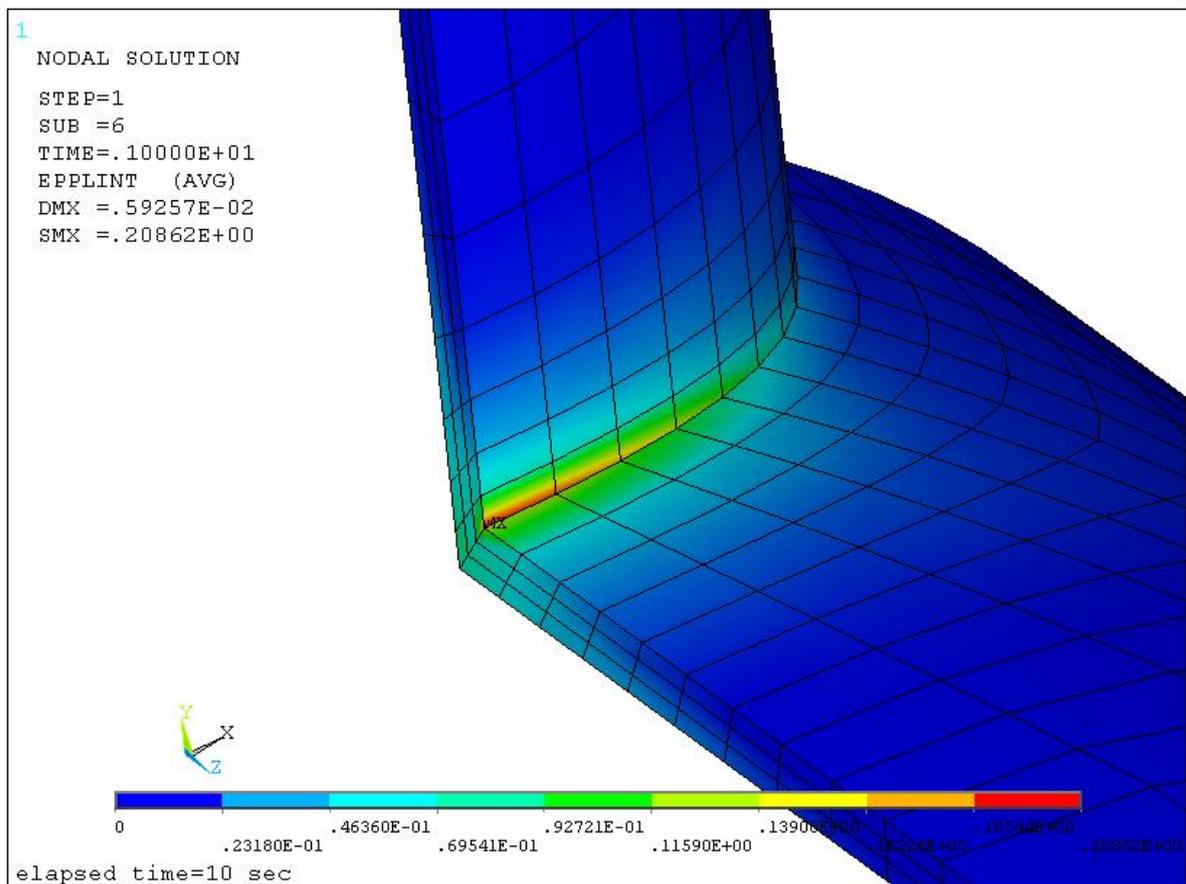
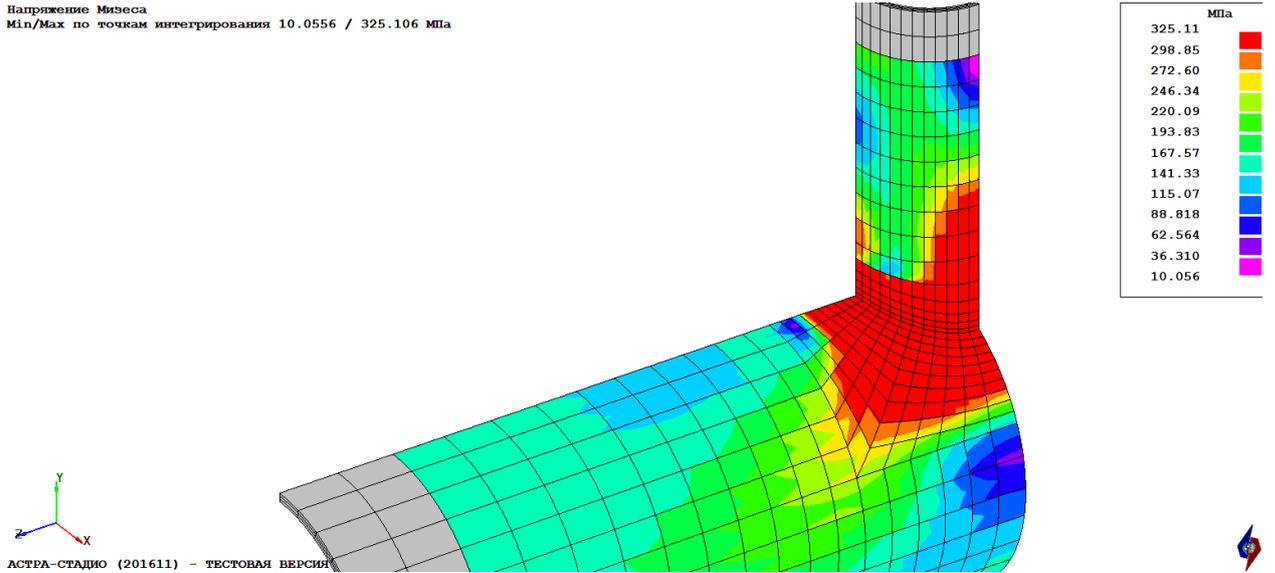


Рис. T104.4. Эквивалентные пластические деформации Треска. Вариант 1.2 (внутреннее давление, упругопластическая модель материала)

# АСТРА-СТАДИО

Напряжение Мизеса  
Min/Max по точкам интегрирования 10.0556 / 325.106 МПа



ANSYS

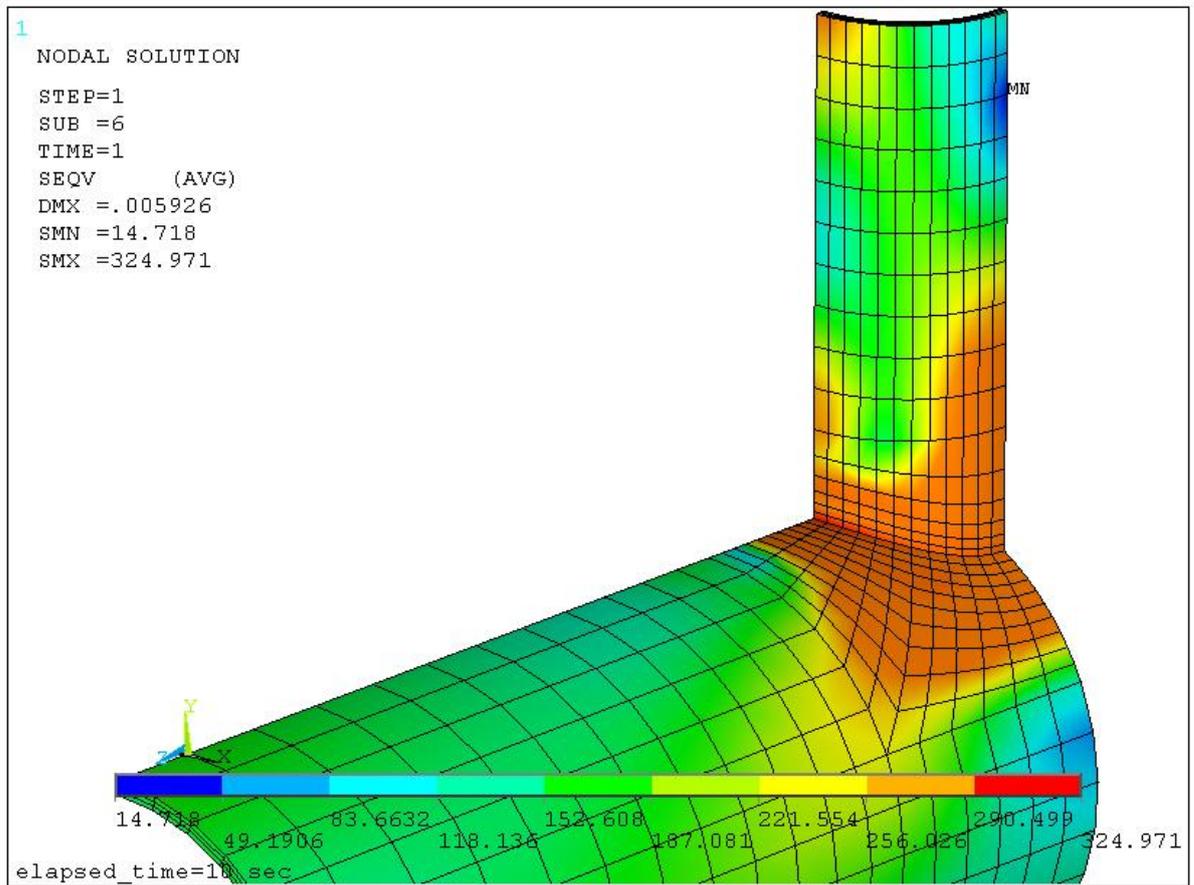


Рис. Т104.5. Эквивалентные напряжения по Мизесу. Вариант 1.2 (внутреннее давление, упругопластическая модель материала)

## **Заключение**

Результаты (перемещения, деформации, напряжения) упругопластического расчета тройника по АСТРА-СТАДИО и ANSYS на действие внутреннего давления при высоком уровне пластических деформаций достаточно близки.

## **T105. Отвод. Мультилинейная диаграмма деформирования**

Рассматривается криволинейный элемент трубы (отвод), находящийся под действием внутреннего давления (рис. T105.1). Материал отвода рассматривается как упругопластический с изотропным упрочнением. Диаграмма деформирования мультилинейная (рис. T105.2, табл. T105.1).

### **Исходные данные**

#### *Геометрические характеристики*

- параметры трубы:  
наружный диаметр  $D = 325$  мм;  
толщина стенки  $S = 15$  мм;
- радиус гiba  $R = 0.5$  м.

#### *Физико-механические характеристики*

- модуль упругости  $E = 2e5$  МПа;
- коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ ;
- предел текучести  $\sigma_p = 200$  МПа.

#### *Граничные условия*

- жестко закреплены по Y узлы в середине торца;
- условия симметрии (рассматривается четверть отвода).

#### *Параметры нагрузки*

- внутреннее давление  $p = 20$  МПа;
- напряжения на торцах для учета осевых сил  $93.575$  МПа.

### **Описание модели**

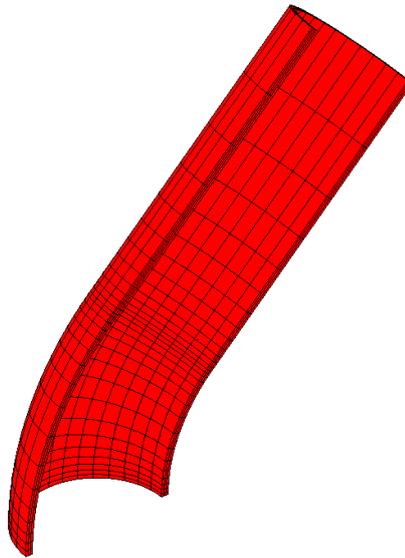
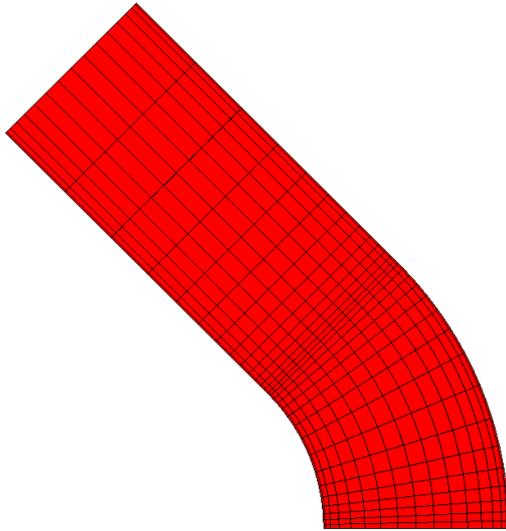
Используются объемные 20-ти узловые КЭ с 3-мя точками интегрирования по каждой оси. Заданы 3 слоя элементов по толщине гiba.

При упругопластическом расчете в АСТРА-СТАДИО и ANSYS нагрузка разбивается на 40 равных шагов.

В табл. T105.2 приведено сопоставление по ПК ANSYS и АСТРА-СТАДИО максимальных значений результатов: суммарных перемещений, эквивалентных полных и пластических деформаций по критериям Треска и Мизеса, эквивалентных напряжений по критериям Треска и Мизеса.



АСТРА-СТАДИО (201605) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ  
ИПКЭ 20



АСТРА-СТАДИО (201605) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. Т105.1. Расчетная схема

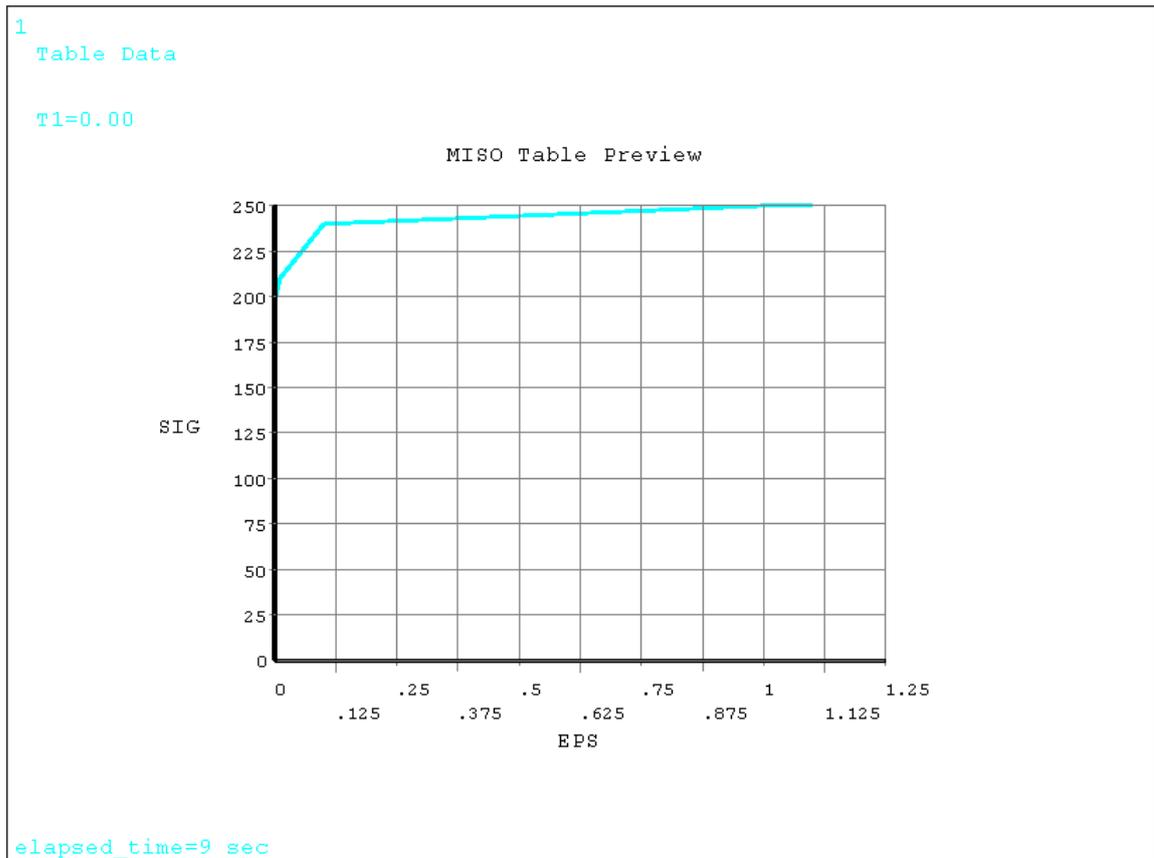


Рис. T105.2. Диаграмма деформирования материала

Табл. T105.1. Мультилинейная диаграмма деформирования

№	Деформация $\epsilon$	Напряжение $\sigma$ , МПа
1	0	0
2	1e-3	200
3	1e-2	210
4	0.1	240
5	1	250

Таблица Т105.2. Результаты (максимальные значения)

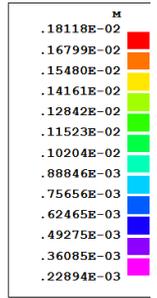
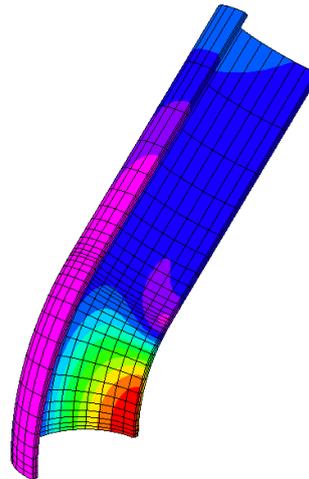
№	Вариант		Суммарные перемещения, м	Эквивалентные полные деформации		Эквивалентные пластические деформации		Эквивалентные напряжения, МПа	
				Треска	Мизес	Треска	Мизес	Треска	Мизес
1	Давление 20 МПа	СТАДИО	0.1812e-2	0.4044e-1	0.2366e-1	0.3885e-1	0.2273e-1	244.37	214.57
		ANSYS	0.2072e-2	0.4486e-1	0.2643e-1	0.4327e-1	0.2536e-1	245.17	215.48
		Δ,%	12.55	9.85	10.48	10.21	10.37	0.33	0.42

# АСТРА-СТАДИО

Суммарные перемещения



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



ANSYS

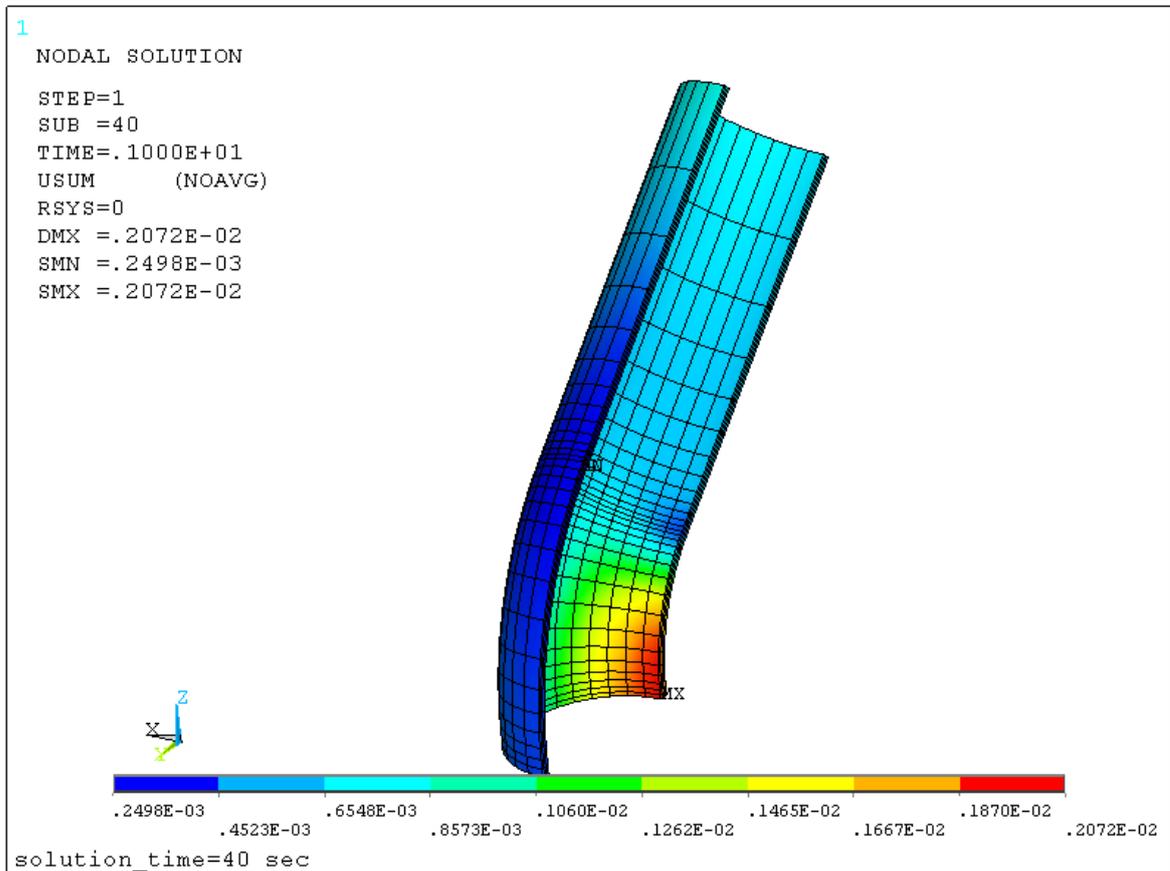


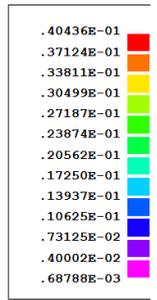
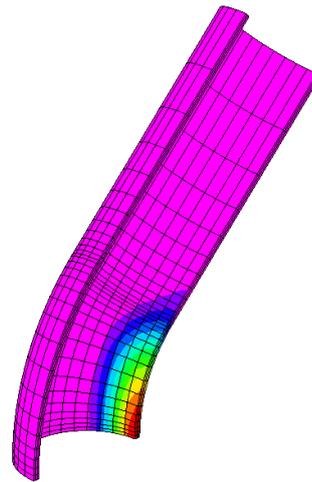
Рис. Т105.3. Суммарные перемещения, м. Вариант 1 (внутреннее давление 20 МПа)

# АСТРА-СТАДИО

Общая деформация Треска  
Min/Max по точкам интегрирования 0.000688797 / 0.053402



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



ANSYS

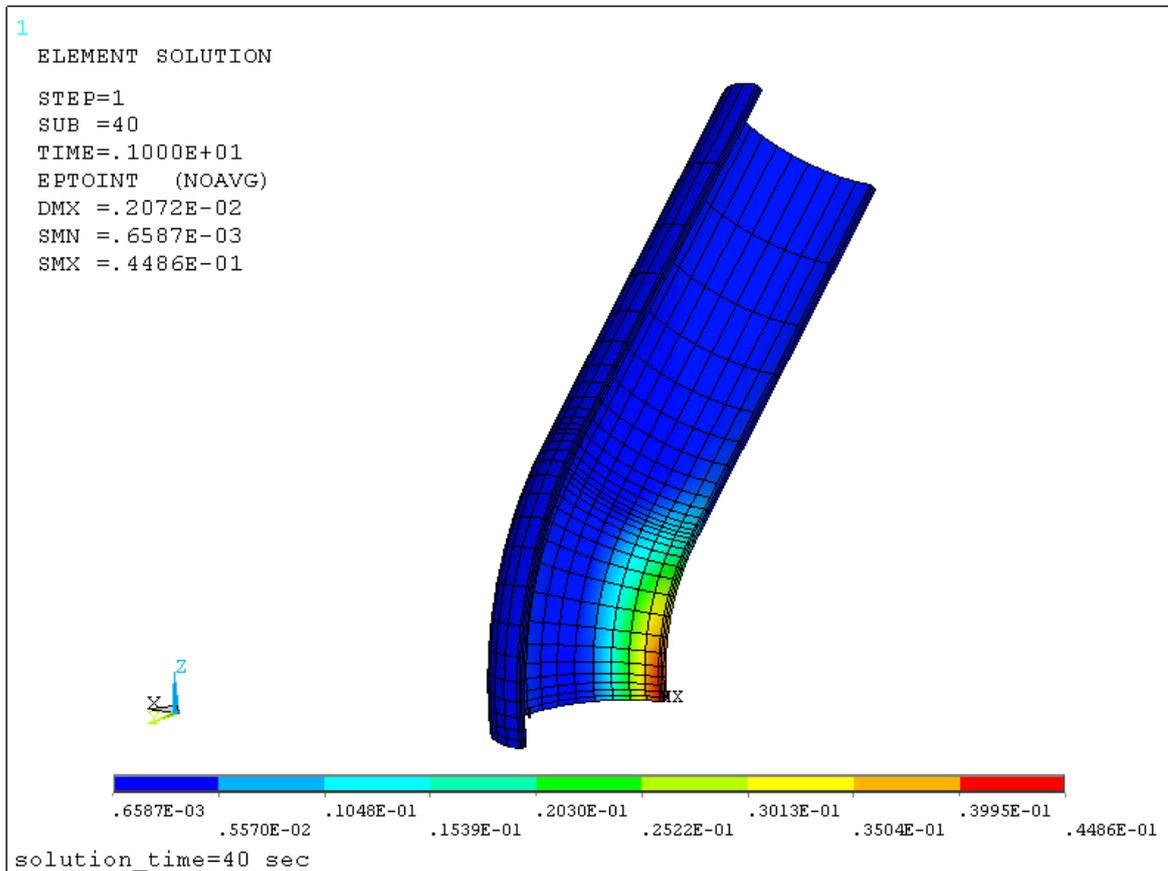


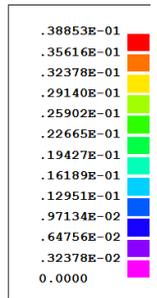
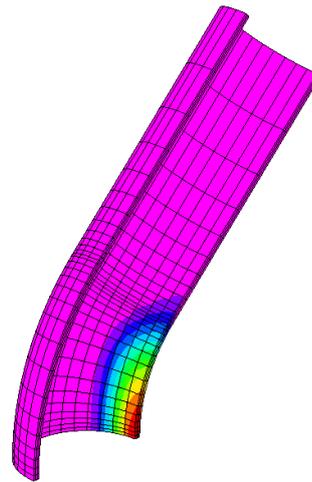
Рис. Т105.4. Полные эквивалентные деформации Треска. Вариант 1 (внутреннее давление 20 МПа)

# АСТРА-СТАДИО

Пластическая деформация Треска  
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.0512938



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



ANSYS

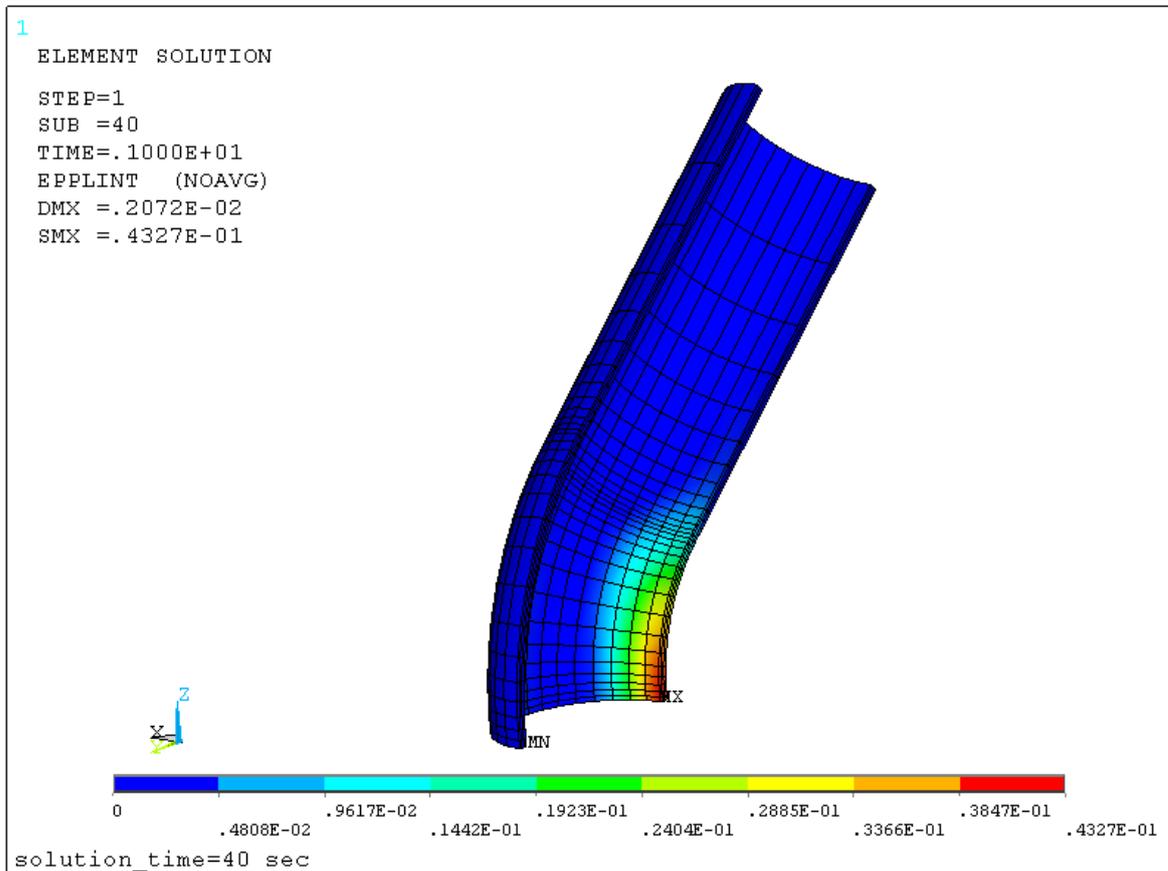


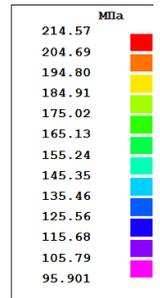
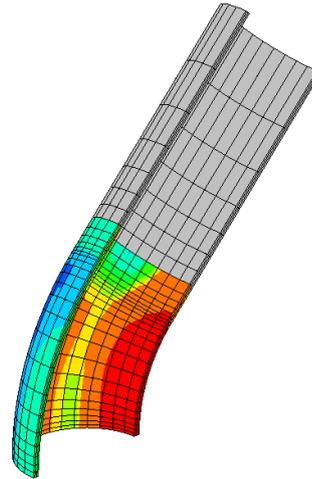
Рис. Т105.5. Эквивалентные пластические деформации Треска. Вариант 1 (внутреннее давление 20 МПа)

# АСТРА-СТАДИО

Напряжение Мизеса  
Min/Max по точкам интегрирования 95.9014 / 214.581 МПа



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



ANSYS

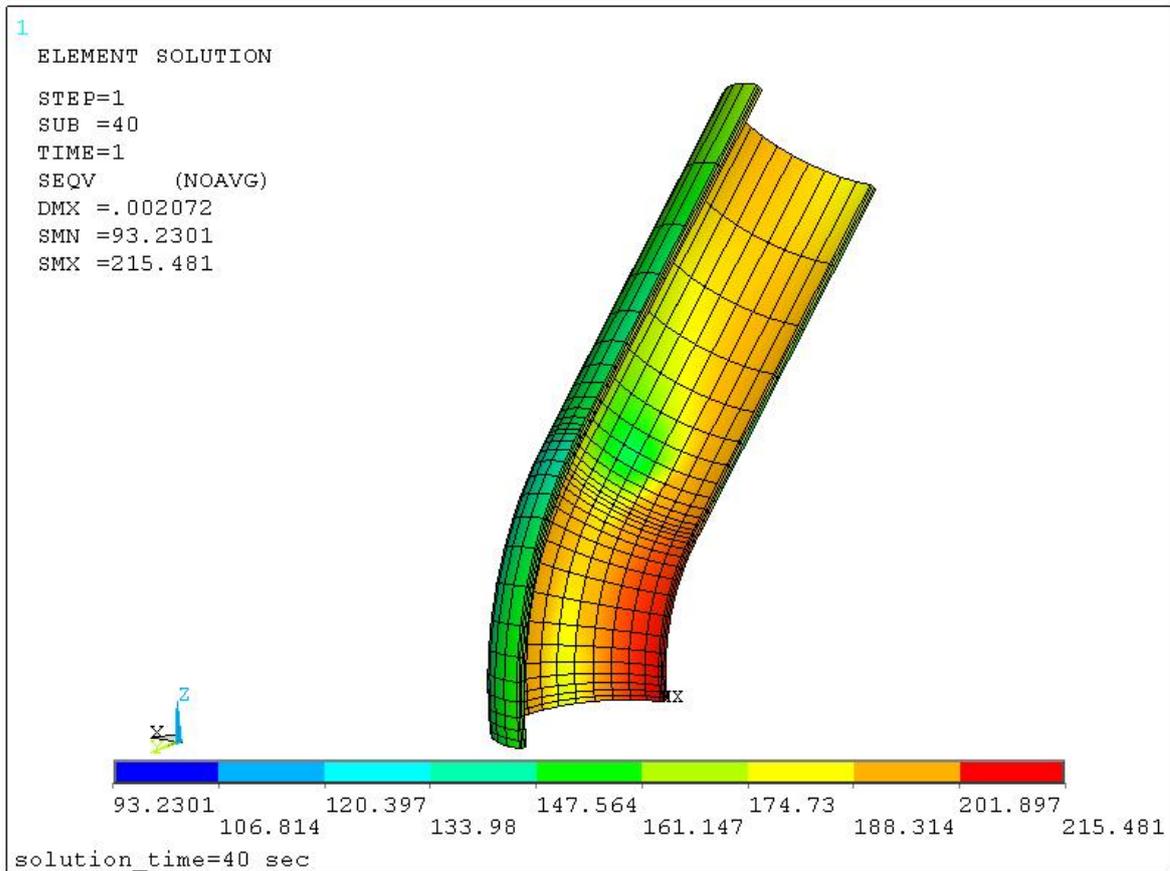


Рис. Т105.6. Эквивалентные напряжения по Мизесу. Вариант 1 (внутреннее давление 20 МПа)

### **Заключение**

Максимальные расчетные полные и пластические деформации, полученные в АСТРА-СТАДИО и ANSYS, отличаются на 10.5%. При этом эквивалентные напряжения достаточно близки (расхождение до 0.4%).

## 2. Расчет с учетом автофретирования

В версии 201611 реализован расчет деталей трубопроводов на автофретирование, актуальный для трубопроводных систем сверхвысокого давления. Расчет на автофретирование выполняется в три этапа:

1. упругопластический расчет на давление автофретирования;
2. упругая разгрузка с образованием остаточных деформаций и напряжений;
3. расчет на рабочее давление при учете остаточных (полученных на предыдущем этапе) деформаций и напряжений.

### **T201. Автофретирование прямолинейной трубы**

Рассматривалась толстостенная труба, нагруженная внутренним давлением.

#### **Исходные данные**

##### *Геометрические характеристики*

- параметры трубы:  
наружный диаметр  $D = 95$  мм;  
толщина стенки  $S = 27.5$  мм;

##### *Физико-механические характеристики*

- модуль упругости  $E = 2e5$  МПа;
- коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ ;
- предел текучести  $\sigma_p = 850$  МПа,
- тангенциальный модуль  $E_t = 200$  МПа.

##### *Граничные условия*

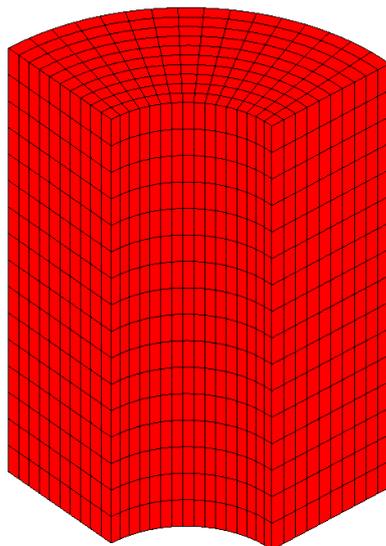
- условия симметрии.

##### *Параметры нагрузки*

- давление автофретирования  $p_a = 613.38$  МПа;
- рабочее давление  $p = 275$  МПа;
- растягивающие силы от внутреннего давления на торцах.

# АСТРА-СТАДИО

ИПКЭ 20



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

## ANSYS

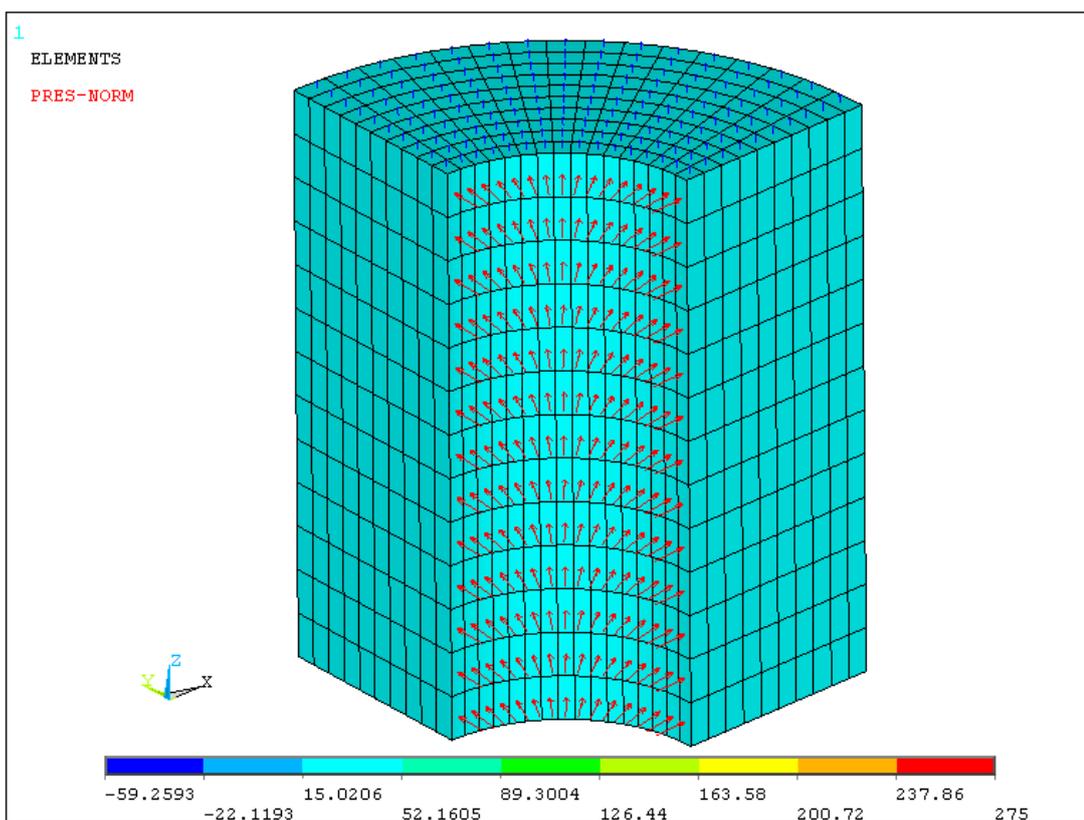


Рис. Т201.1. Тестовая модель

Таблица Т201.1. Результаты (максимальные значения)

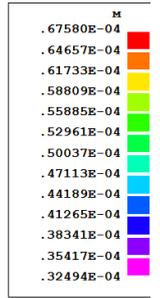
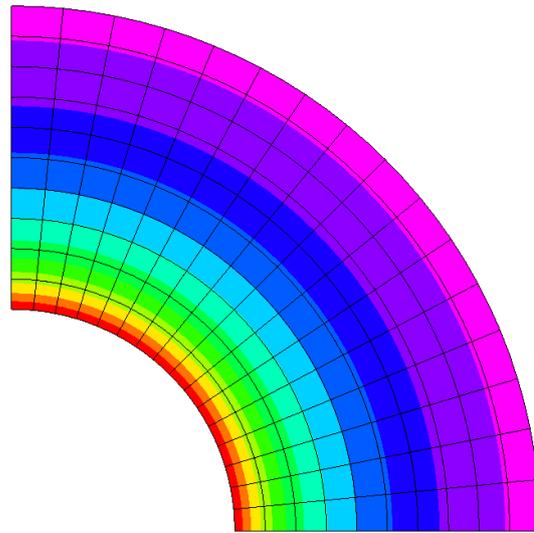
№	Вариант		Суммарные перемещения, м	Эквивалентные полные деформации		Эквивалентные пластические деформации		Эквивалентные напряжения, МПа	
				Треска	Мизес	Треска	Мизес	Треска	Мизес
1	Нагружение рабочим давлением после автофретирования	СТАДИО	0.6758e-4	0.7531e-2	0.4371e-2	0.6335e-2	0.3664e-2	502.32	435.03
		ANSYS	0.6682e-4	0.7498e-2	0.4493e-2	0.6294e-2	0.3639e-2	488.88	423.38
		Δ,%	1.14	0.44	2.71	0.65	0.69	2.75	2.75

# АСТРА-СТАДИО

Суммарные перемещения



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



ANSYS

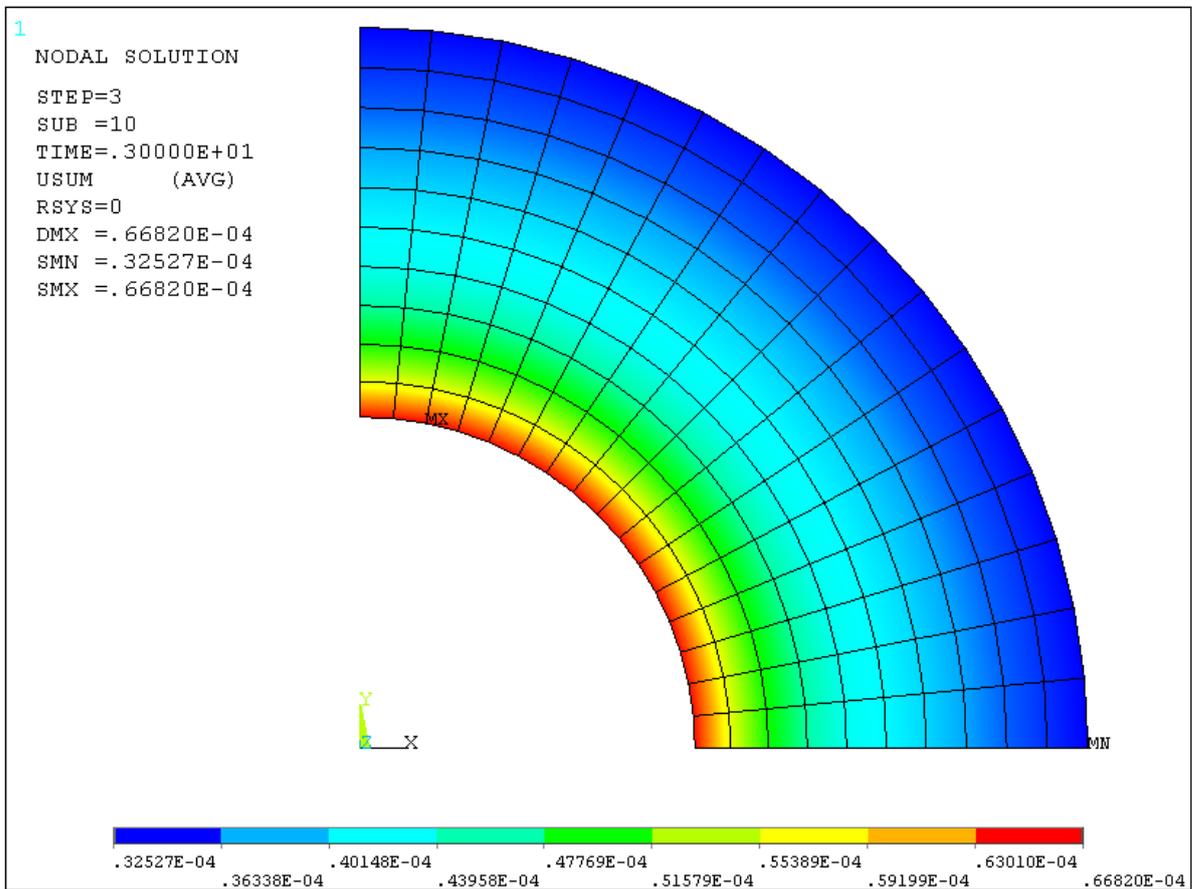


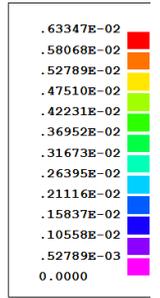
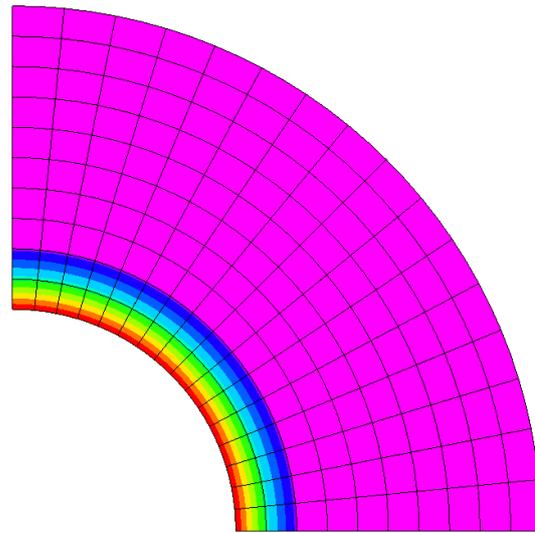
Рис. T201.2. Суммарные перемещения, м

# АСТРА-СТАДИО

Пластическая деформация Треска  
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.0063347



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



ANSYS

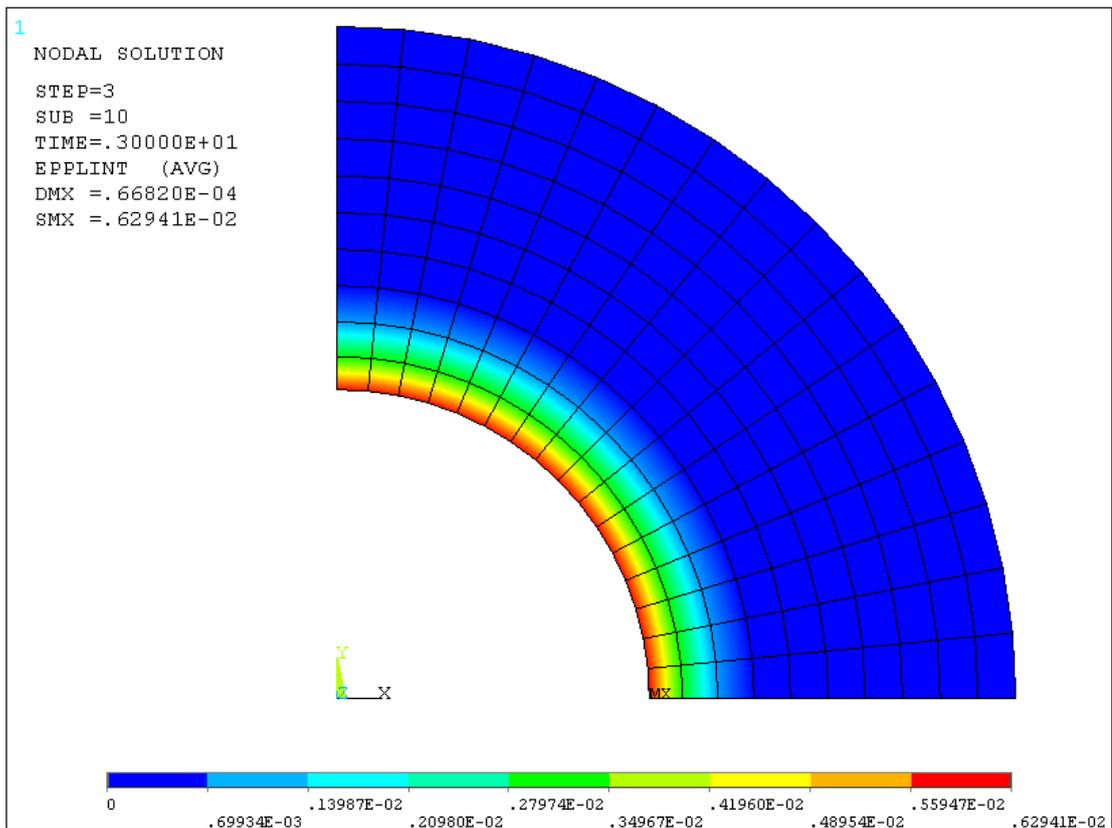
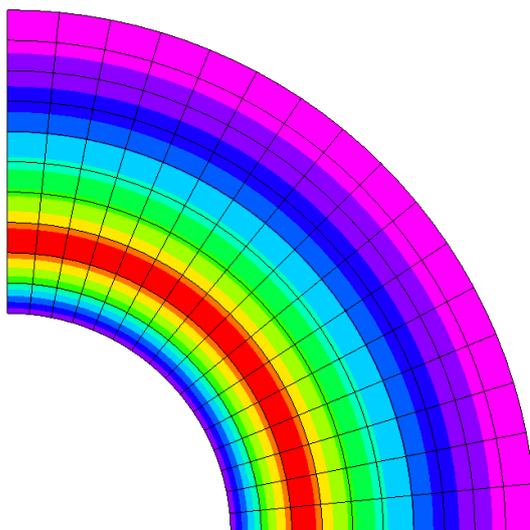
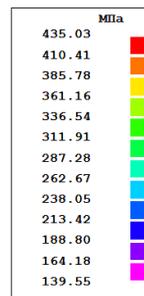


Рис. Т201.3. Эквивалентные пластические деформации Треска

# АСТРА-СТАДИО

Напряжение Мизеса  
Min/Max по точкам интегрирования 139.554 / 435.03 МПа



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

ANSYS

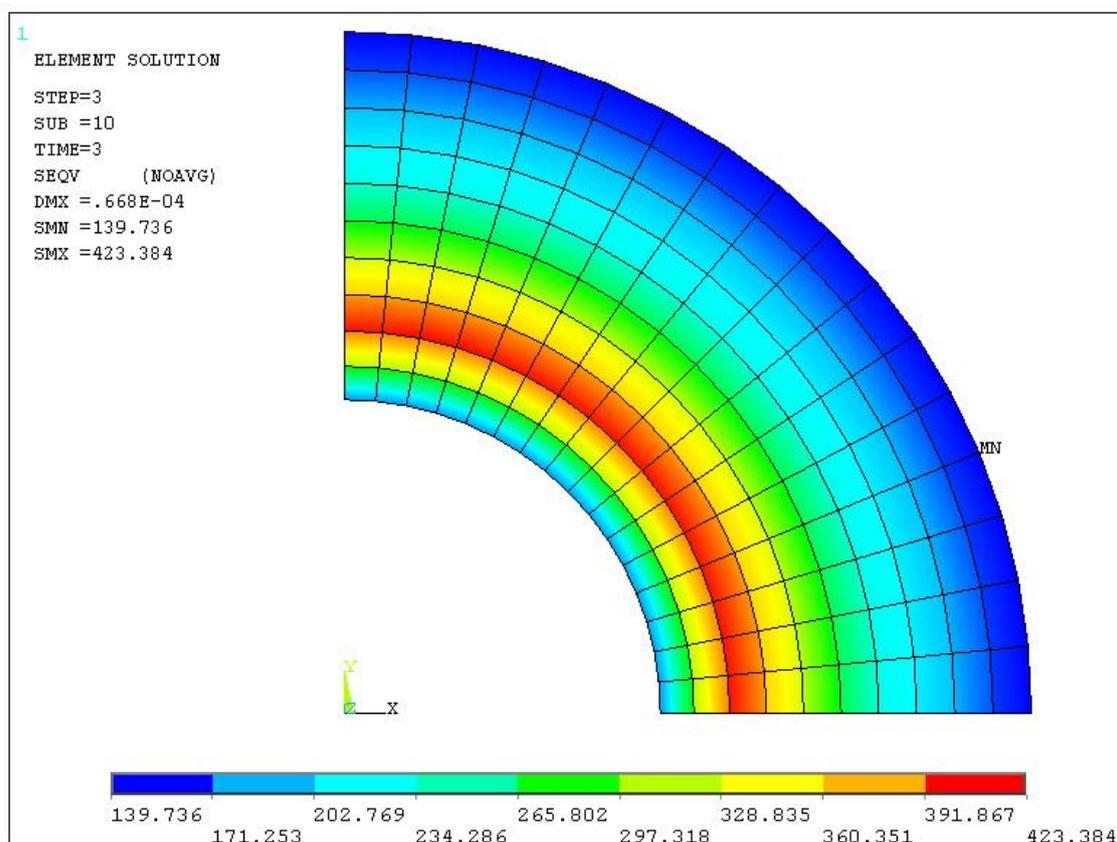


Рис. T201.4. Эквивалентные напряжения по Мизесу

### **Заключение**

Были сопоставлены полученные по ANSYS и АСТРА-СТАДИО результаты для автофретированной трубы, нагруженной рабочим давлением. Наибольшее различие составило 2.75% по эквивалентным напряжениям.

## **Т202. Автофретирование криволинейной трубы (отвода)**

Рассматривается отвод, подвергшийся процедуре автофретирования, нагруженный внутренним давлением. Сопоставляются результаты трехэтапного упругопластического расчета (нагружение давлением автофретирования, разгрузка, нагружение рабочим давлением), полученные в ПК ANSYS и АСТРА-СТАДИО.

### **Исходные данные**

#### *Геометрические характеристики*

- параметры трубы:
  - наружный диаметр  $D = 95$  мм;
  - толщина стенки  $S = 27.5$  мм;
- радиус гиба  $R = 0.1$  м.

#### *Физико-механические характеристики*

- модуль упругости  $E = 2e5$  МПа;
- коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ ;
- предел текучести  $\sigma_T = 850$  МПа,
- тангенциальный модуль  $E_t = 200$  МПа.

#### *Граничные условия*

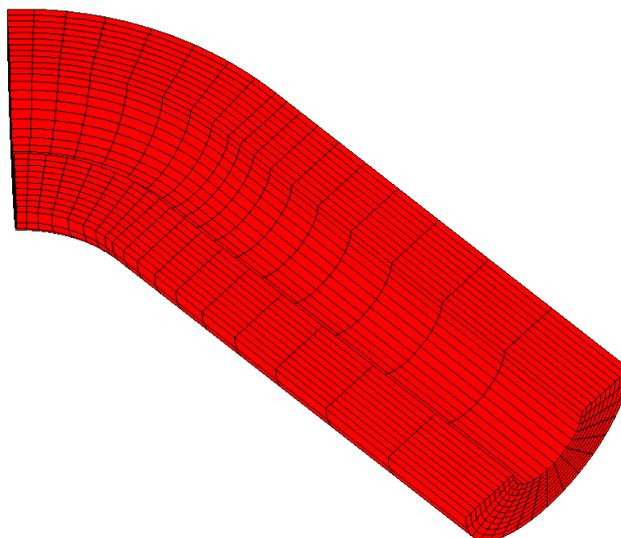
- симметрия, закрепление центрального узла торца по оси  $Y$ .

#### *Параметры нагрузки*

- давление автофретирования  $p_a = 613.38$  МПа;
- рабочее давление  $p = 275$  МПа;
- растягивающие силы от внутреннего давления на торцах.

# АСТРА-СТАДИО

ИПКЭ 20



Y  
Z  
X  
АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



## ANSYS

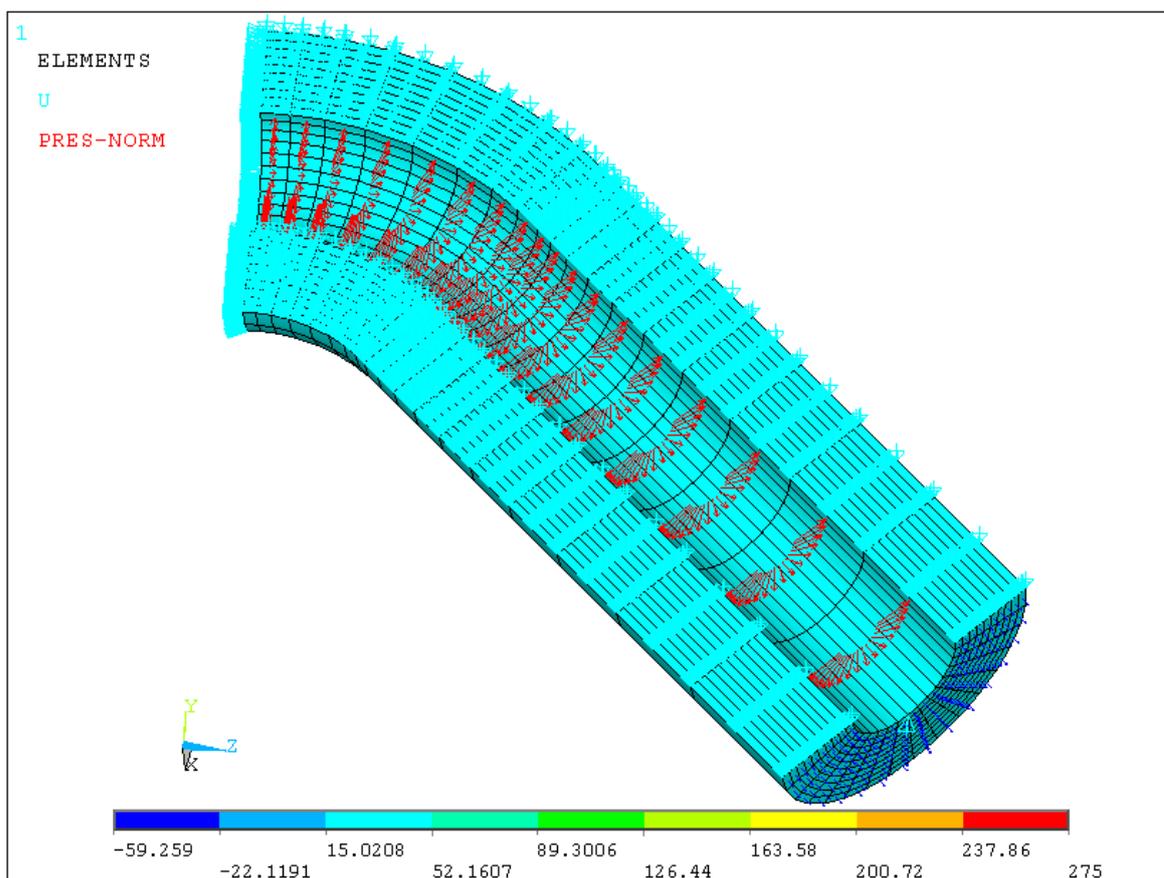


Рис. Т202.1. Тестовая модель

Таблица Т202.1. Результаты (максимальные значения)

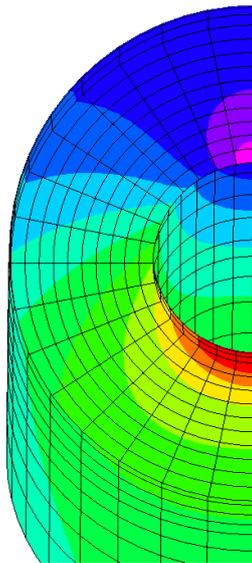
№	Вариант		Суммарные перемещения, м	Эквивалентные полные деформации		Эквивалентные пластические деформации		Эквивалентные напряжения, МПа	
				Треска	Мизес	Треска	Мизес	Треска	Мизес
1	Нагружение рабочим давлением после автофретирования	СТАДИО	0.1383e-3	0.1138e-1	0.6581e-2	0.1065e-1	0.6182e-2	559.98	496.73
		ANSYS	0.1380e-3	0.1136e-1	0.6722e-2	0.1062e-1	0.6166e-2	560.56	497.38
		Δ,%	0.22	0.18	2.10	0.28	0.26	0.10	0.13

# АСТРА-СТАДИО

Суммарные перемещения



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



Value	Color
.13832E-03	Red
.12693E-03	Orange
.11554E-03	Yellow
.10415E-03	Light Green
.92766E-04	Green
.81377E-04	Light Blue
.69988E-04	Blue
.58600E-04	Dark Blue
.47211E-04	Very Dark Blue
.35822E-04	Black
.24433E-04	Black
.13045E-04	Black
.16558E-05	Black

ANSYS

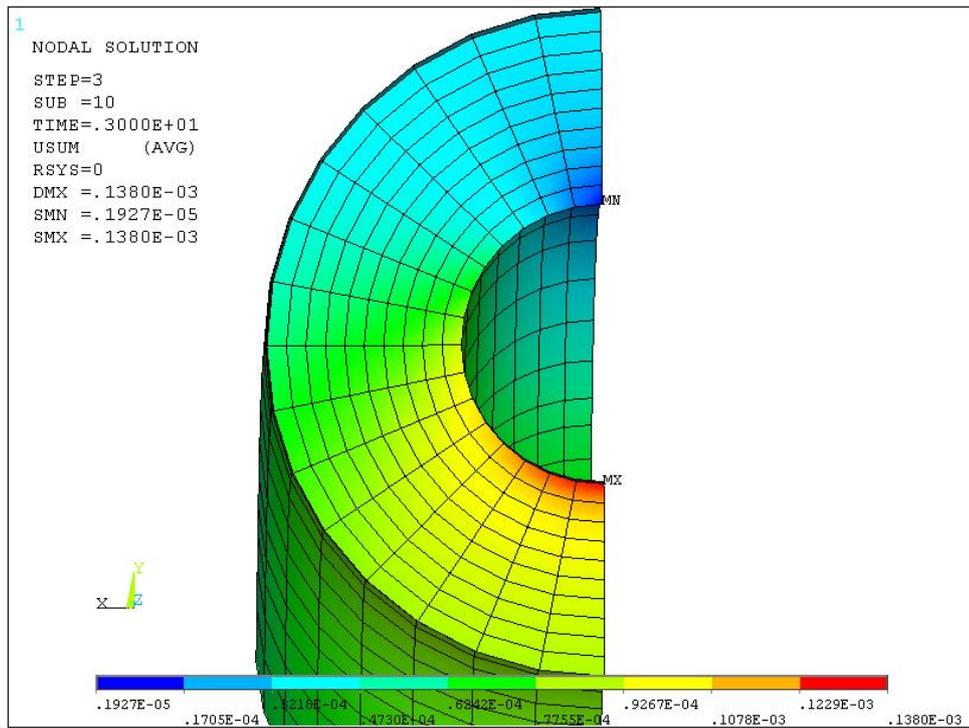


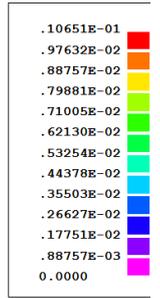
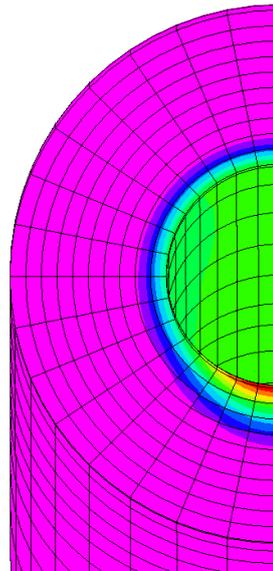
Рис. T201.2. Суммарные перемещения, м

# АСТРА-СТАДИО

Пластическая деформация Треска  
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.0135143



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



ANSYS

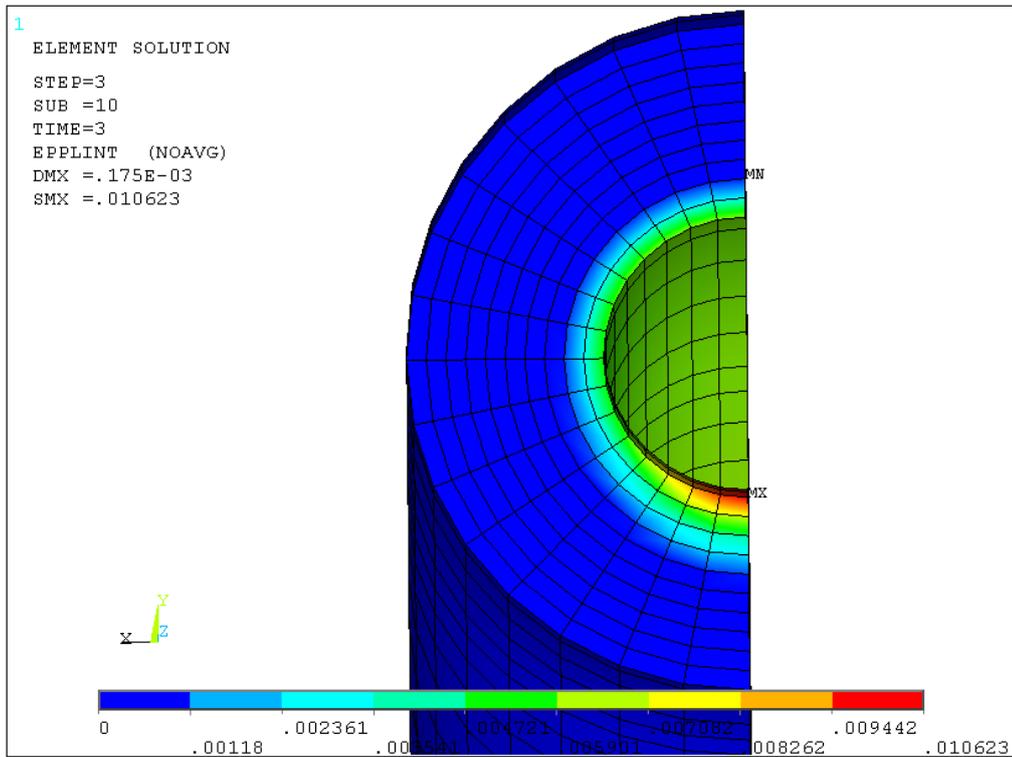
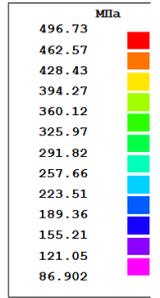
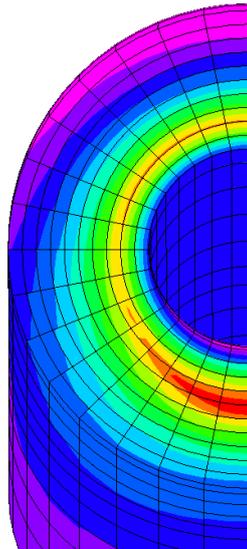


Рис. Т201.3. Эквивалентные пластические деформации Треска

# АСТРА-СТАДИО

Напряжение Мизеса  
Min/Max по точкам интегрирования 86.9021 / 496.731 МПа



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

ANSYS

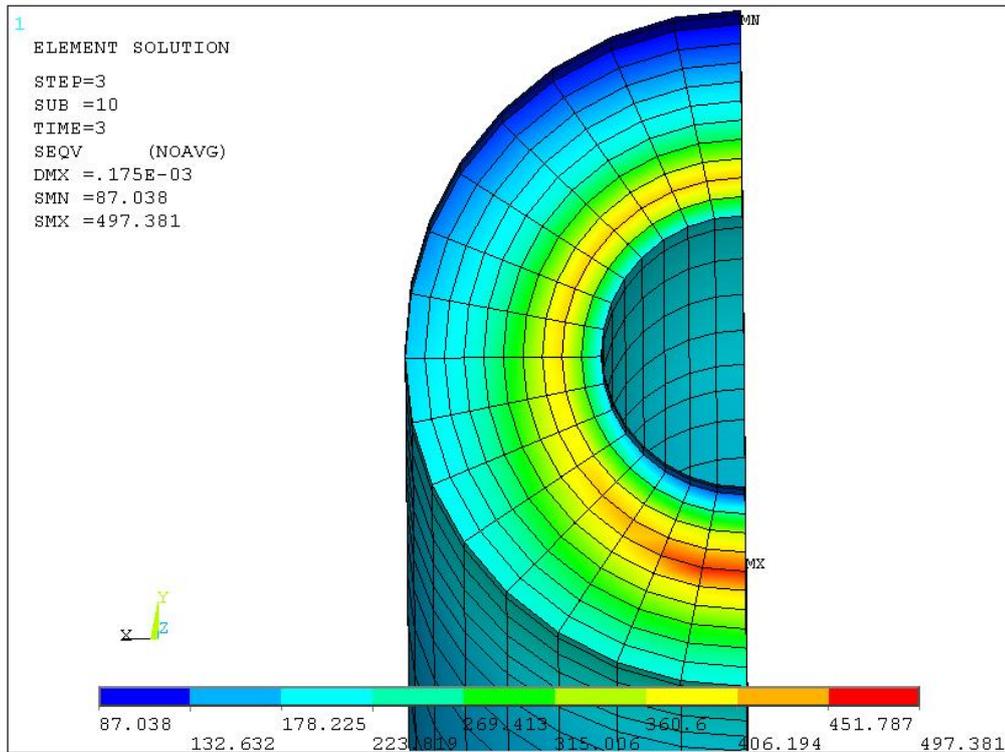


Рис. Т201.4. Эквивалентные напряжения по Мизесу

### **Заключение**

Наибольшее расхождение между АСТРА-СТАДИО и ANSYS составило 2.10% для полных эквивалентных деформаций по критерию Мизеса. Остальные результаты имеют разброс в пределах 0.30%.

### 3. Определение предельной нагрузки

#### Т301. Отвод. Определение предельного давления

Рассматривается отвод под действием внутреннего давления. Определяется предельная пластическая нагрузка по критериям двойного упругого наклона [1] и максимума скорости изменения относительной пластической работы [2]. Сравниваются результаты расчета по программам ANSYS и АСТРА-СТАДИО.

#### Исходные данные

##### *Геометрические характеристики*

- параметры трубы:
  - наружный диаметр  $D = 300$  мм;
  - толщина стенки  $S = 5$  мм;
- радиус гiba  $R = 0.4$  м;
- угол раскрытия  $\theta = 90$  град.

##### *Физико-механические характеристики*

- модуль упругости  $E = 2e5$  МПа;
- коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ ;
- предел текучести  $\sigma_p = 400$  МПа;
- тангенциальный модуль  $E_t = 500$  МПа.

##### *Граничные условия*

- жестко закреплены по Y узлы в середине торца;
- условия симметрии (рассматривается четверть отвода).

##### *Параметры нагрузки*

- максимальное внутреннее давление  $p = 14$  МПа;
- напряжения на торцах для учета осевых сил (при максимальной нагрузке) 199.56 МПа.

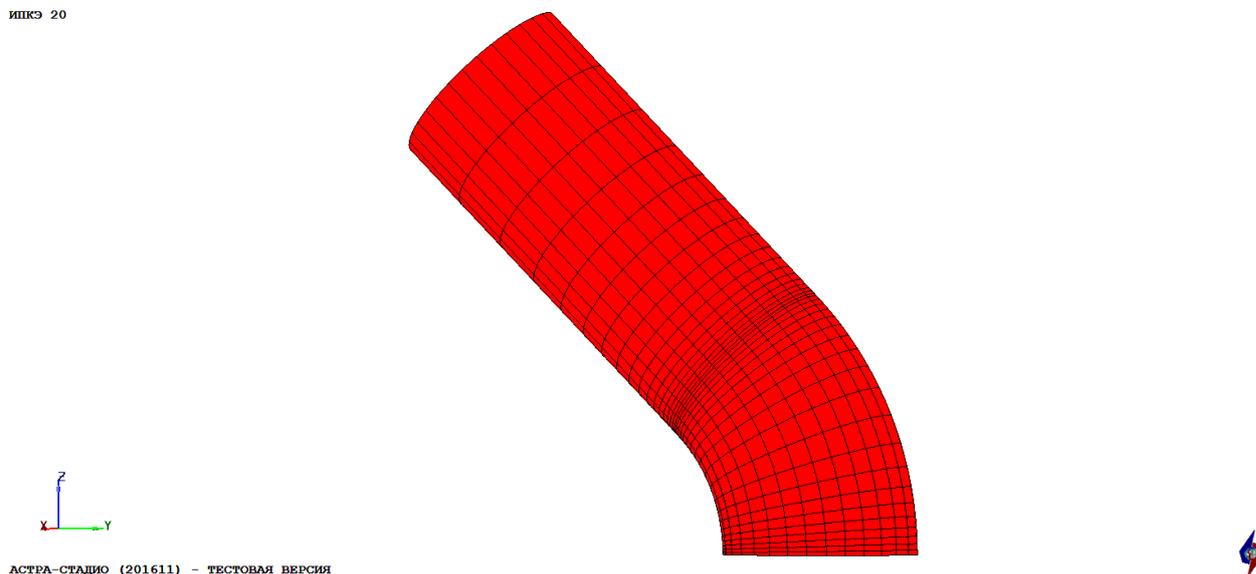
#### Описание модели

Используются объемные 20-ти узловые КЭ с 3-мя точками интегрирования по каждой оси. Заданы 3 слоя элементов по толщине гiba. Для материала использовалась модель изотропного упрочнения с билинейной диаграммой деформирования.

По результатам упругопластического расчета в АСТРА-СТАДИО и ANSYS построены графики зависимости параметра нагрузки от максимальной главной деформации (рис. Т301.2), применен критерий двойного упругого наклона. Максимальная главная деформация определяется в точке, где впервые появляются пластические деформации. Также построены графики зависимости производной относительной пластической работы от параметра нагрузки (рис. Т301.3) для определения предельной пластической нагрузки по критерию Скопинского. В качестве параметра нагрузки рассматривается коэффициент при максимальной расчетной нагрузке, изменяющийся в диапазоне [0; 1]. Результаты определения предельных пластических нагрузок по различным критериям сравниваются в табл.

Т301.1. На рис. Т301.4-7 показаны картины пластических деформаций в гире при различных уровнях нагрузки по результатам расчета в АСТРА-СТАДИО. Предельная пластическая нагрузка приблизительно соответствует моменту окончания перераспределения пластических деформаций в детали.

ИПКЭ 20



ИПКЭ 20

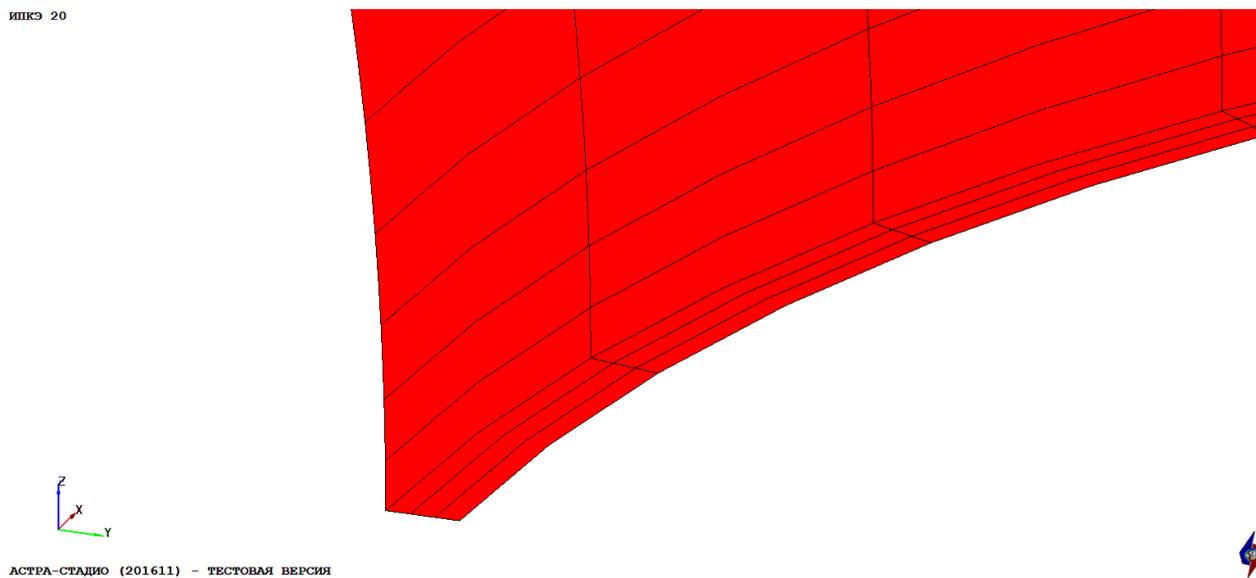


Рис. Т301.1. Тестовая модель. АСТРА-СТАДИО

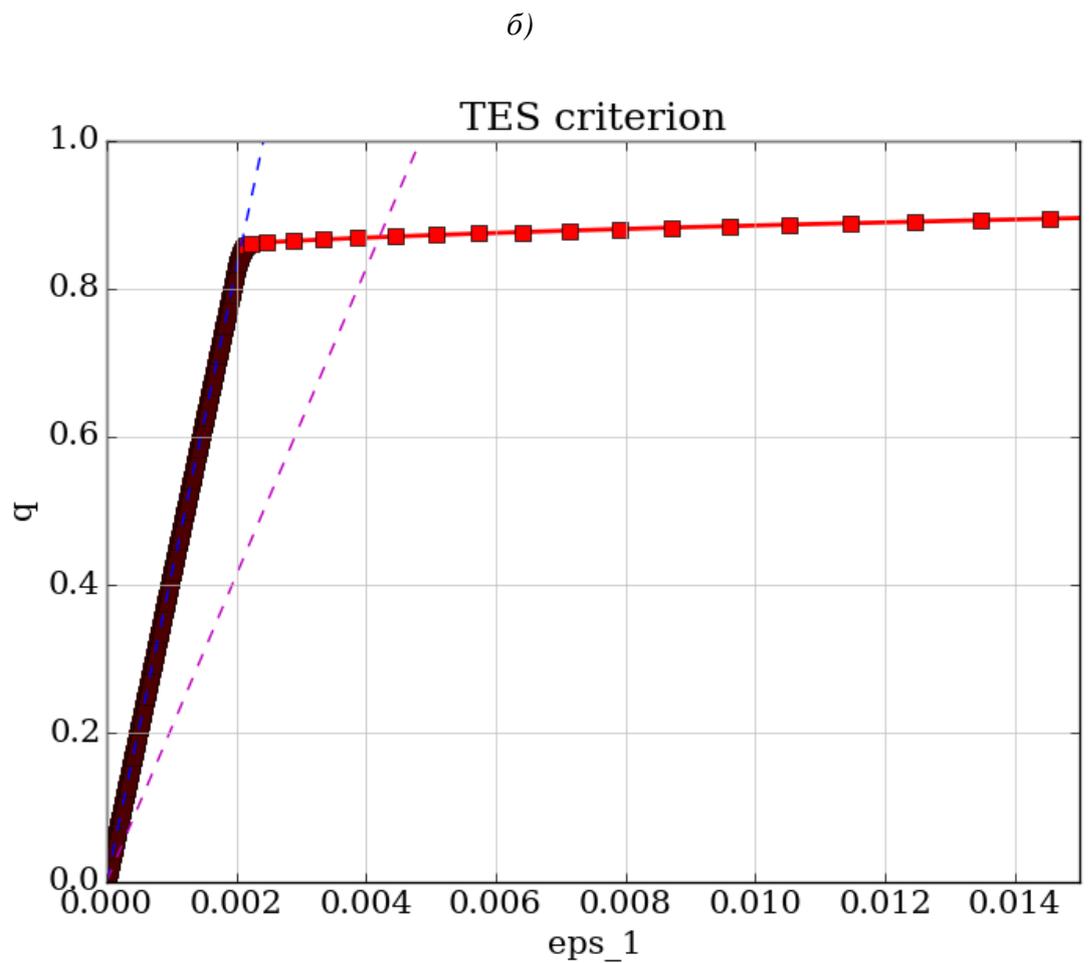
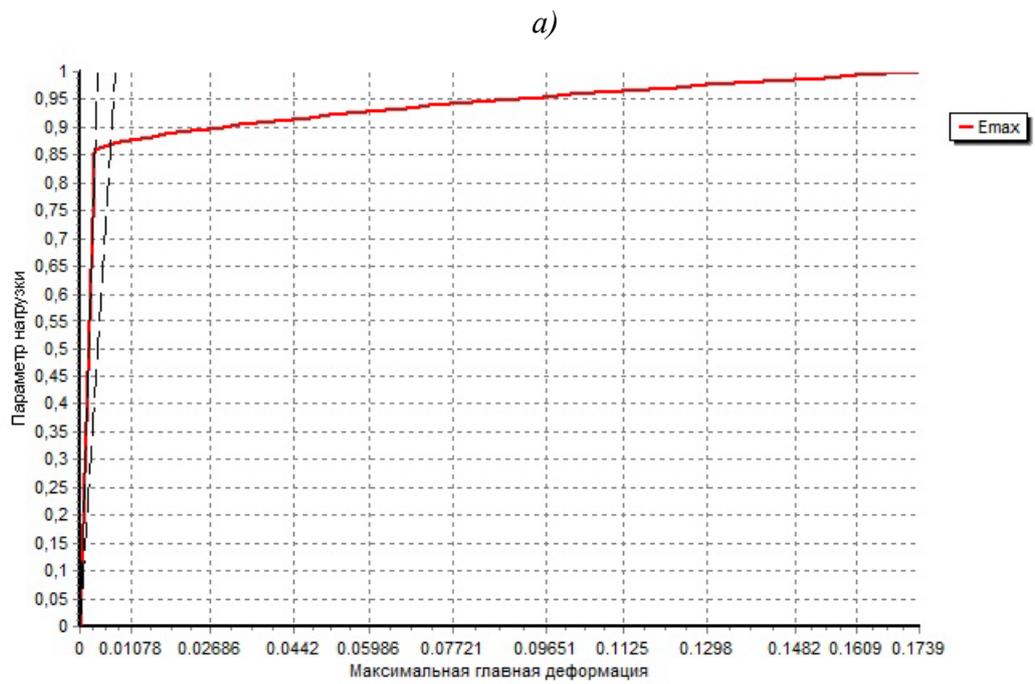
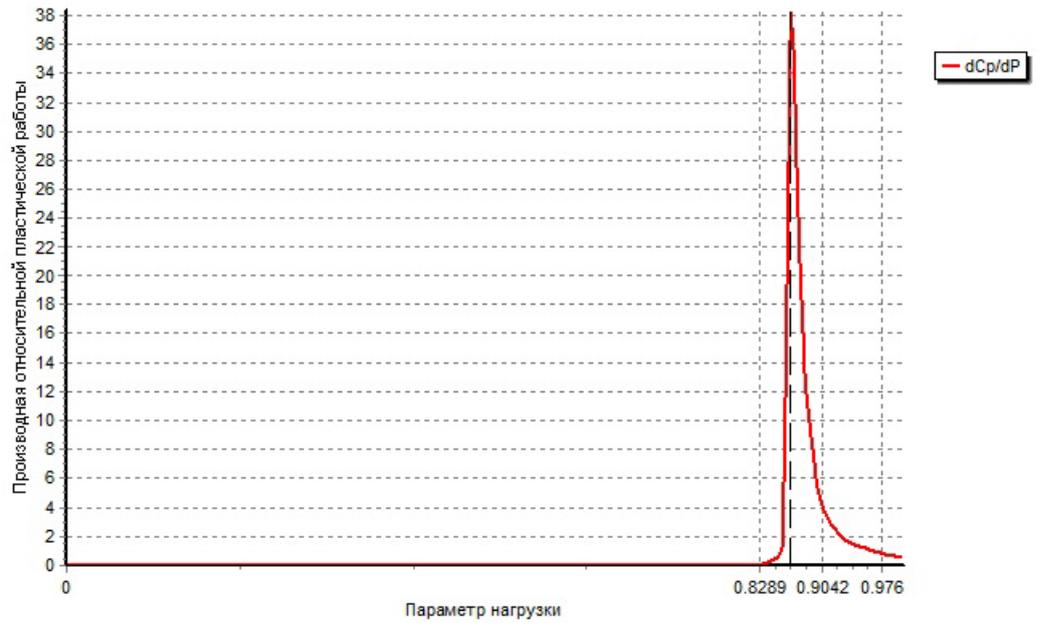


Рис. Т301.2. График зависимости параметра нагрузки от величины максимальной главной деформации. Критерий двойного упругого наклона. (а): по результатам расчета в АСТРА-СТАДИО, (б): по результатам ANSYS

### АСТРА-СТАДИО



### ANSYS

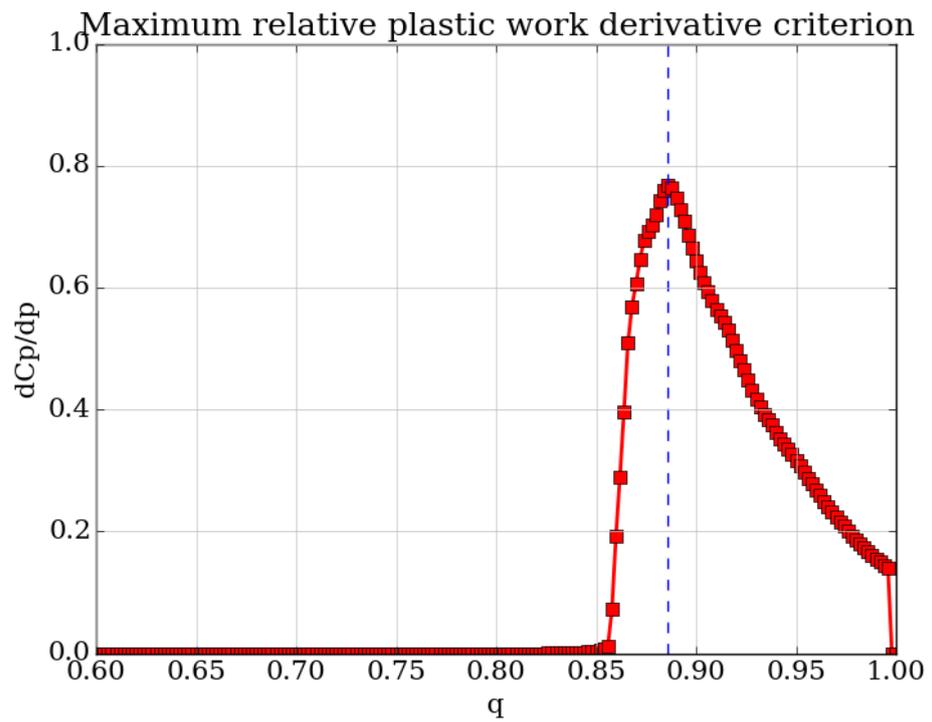
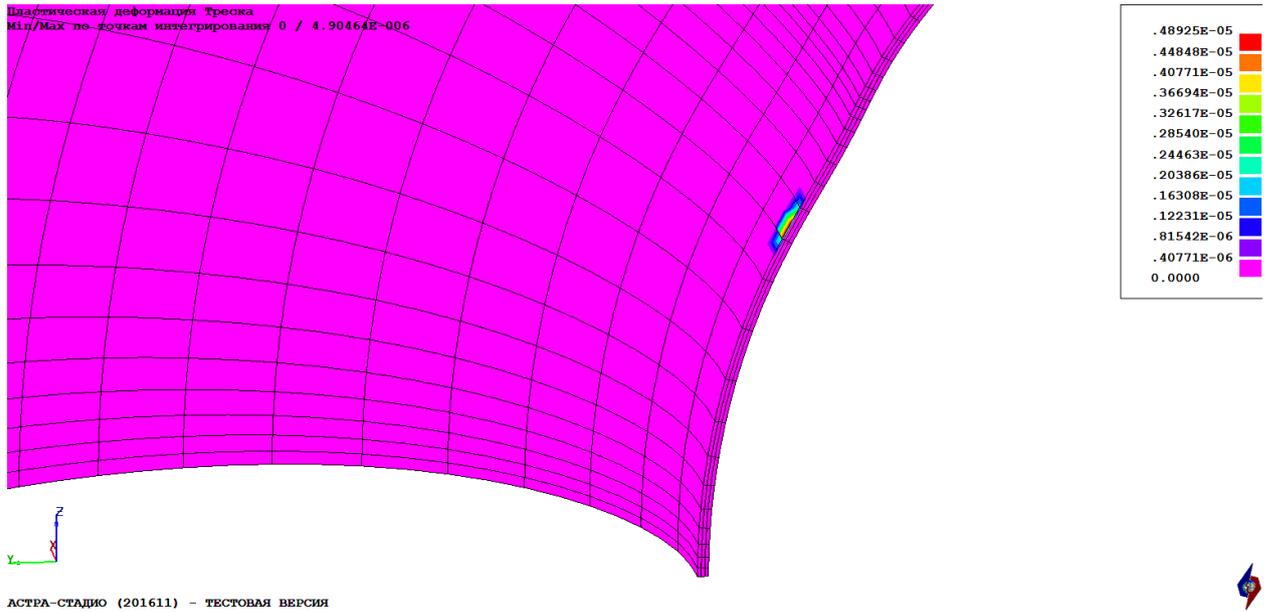


Рис. Т301.3. График зависимости производной относительной пластической работы от параметра нагрузки. Критерий Скопинского. (а): по результатам расчета в АСТРА-СТАДИО, (б): по результатам ANSYS

$p = 11.62 \text{ МПа}$  ( $q = 0.83$ )



$p = 11.76 \text{ МПа}$  ( $q = 0.84$ )

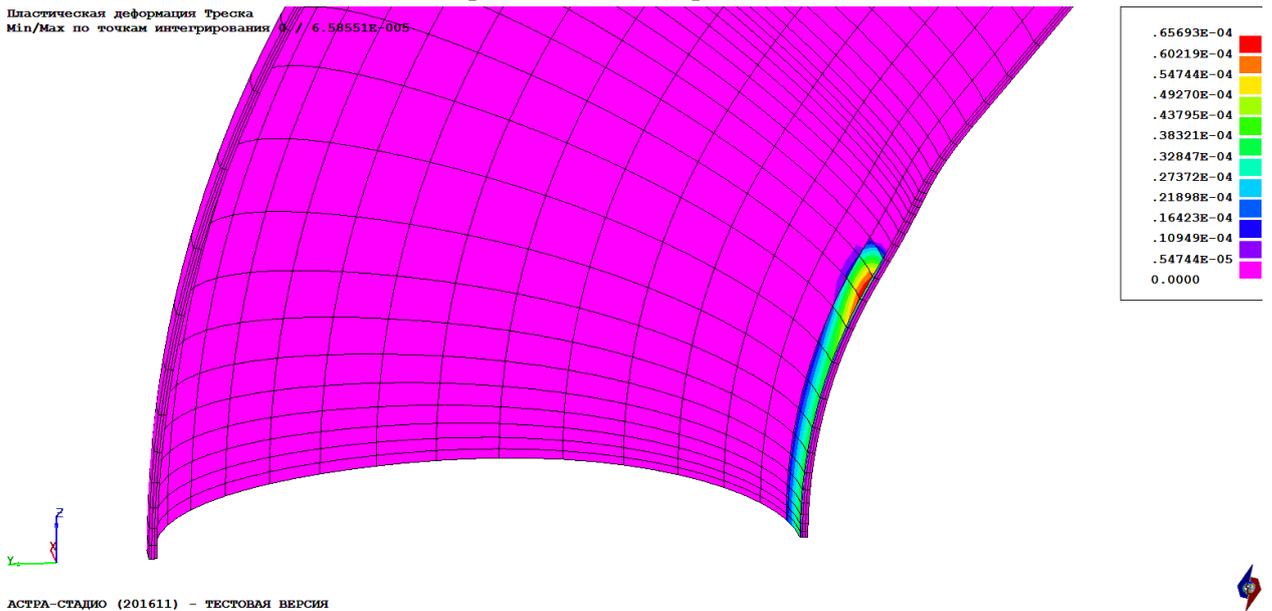
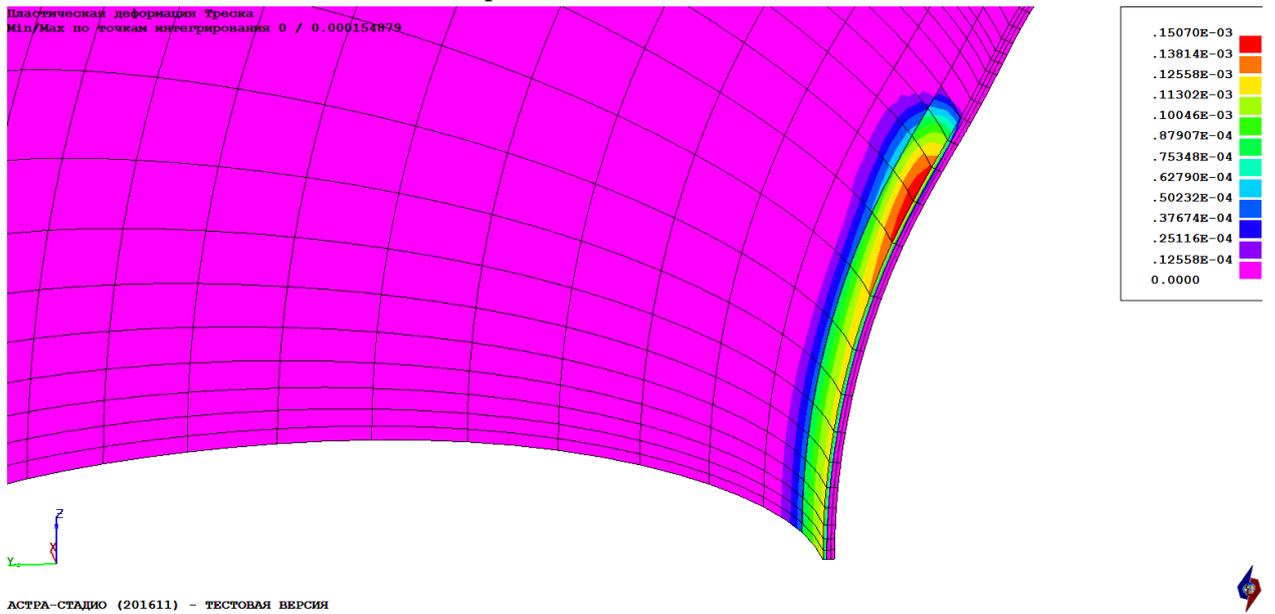


Рис. Т301.4. Эквивалентная пластическая деформация по Треска. АСТРА-СТАДИО

$p = 11.9 \text{ МПа (} k=0.85 \text{)}$



$p = 12.0 \text{ МПа (} k = 0.86 \text{)}$

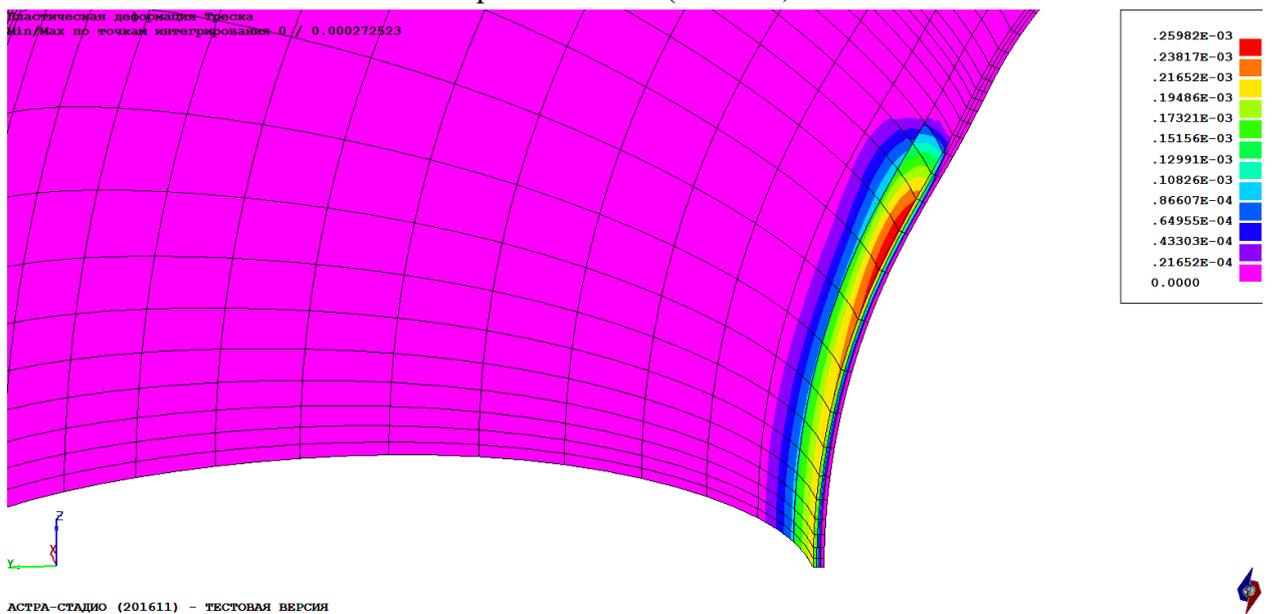
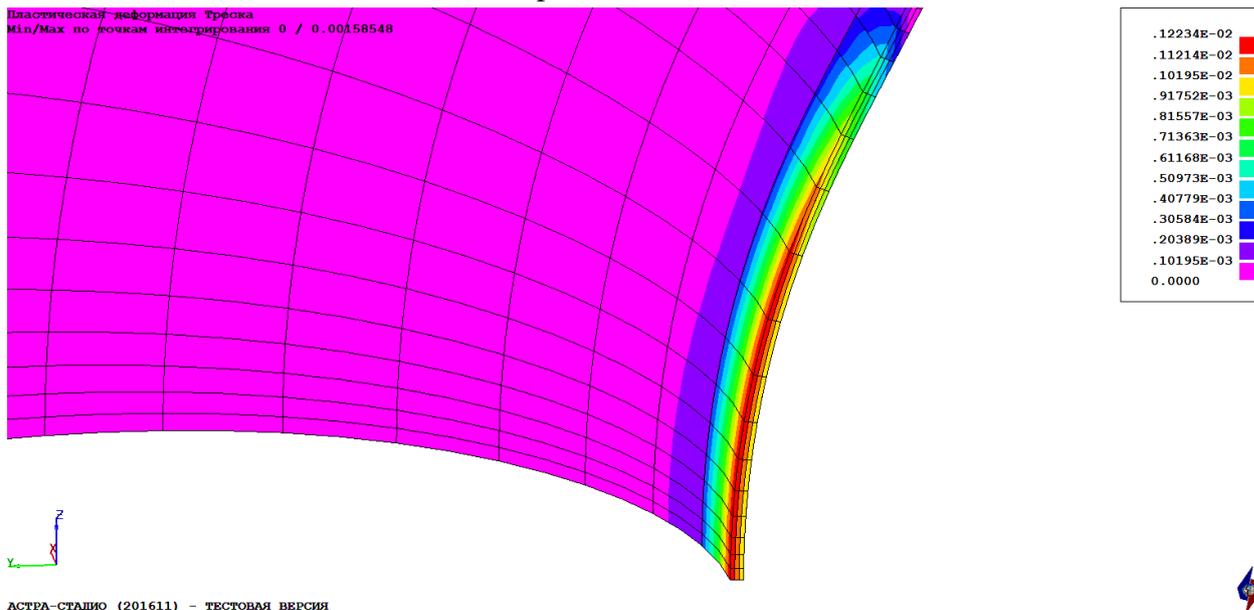


Рис. Т301.5. Эквивалентная пластическая деформация по Треска. АСТРА-СТАДИО

$p = 12.07 \text{ МПа}$



$p = 12.131 \text{ МПа}$  ( $q = 0.8665$ ). Предельное давление по критерию Скопинского

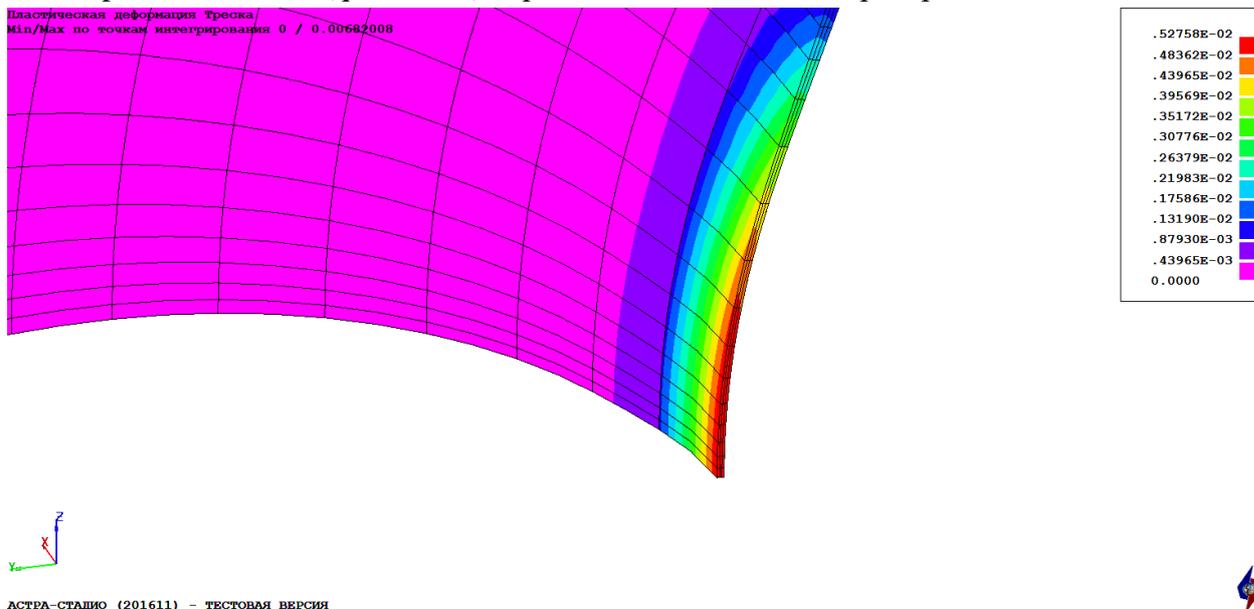
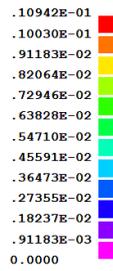
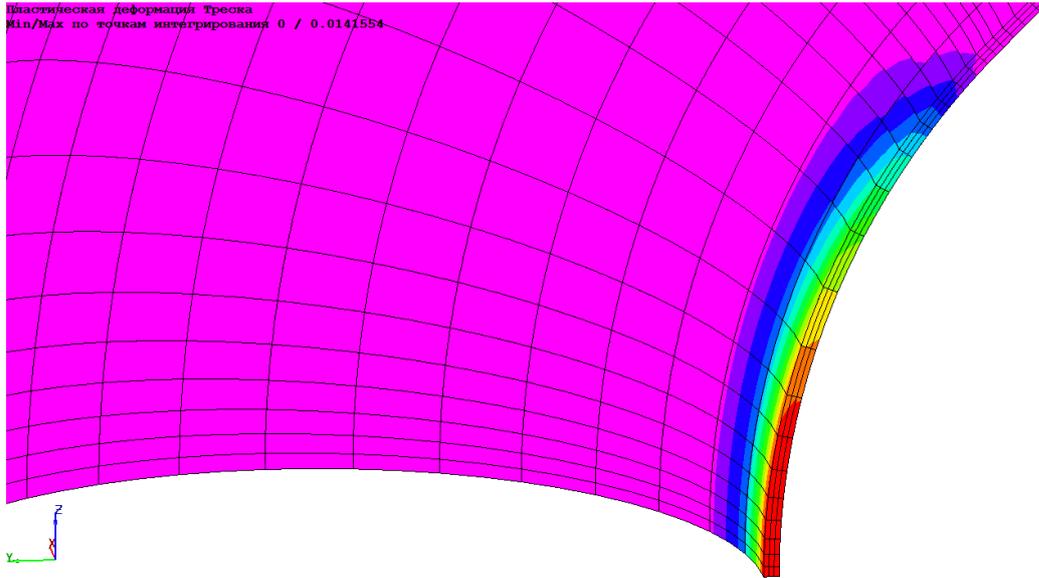


Рис. Т301.6. Эквивалентная пластическая деформация по Треска. АСТРА-СТАДИО

$p = 12.2 \text{ МПа} (q = 0.87)$

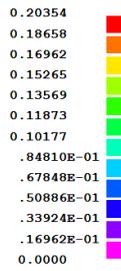
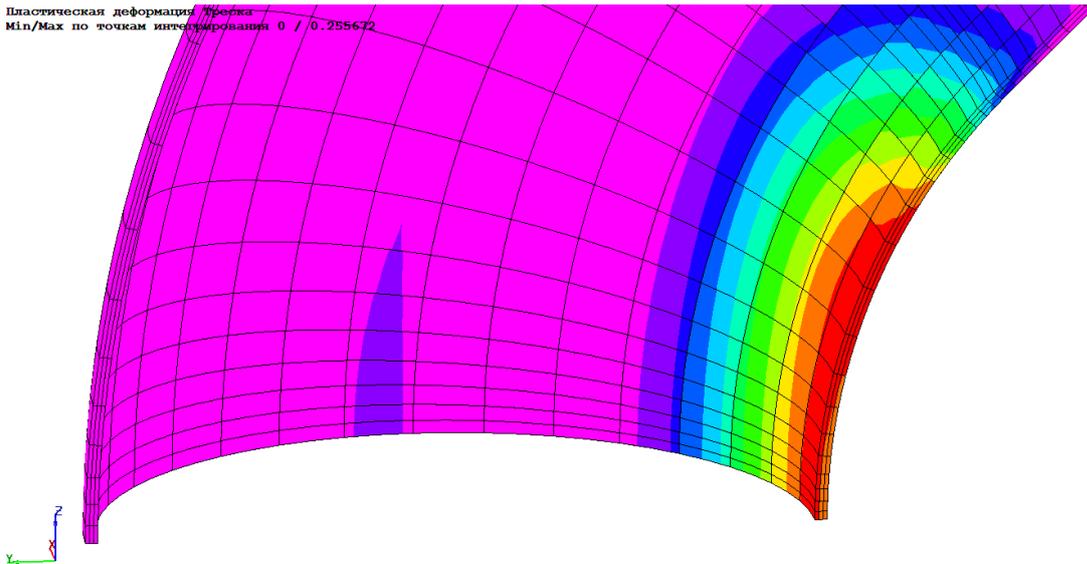
Пластическая деформация Треска  
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.0141554



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

$p = 14 \text{ МПа} (q = 1)$

Пластическая деформация Треска  
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.255672



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. Т301.7. Эквивалентная пластическая деформация по Треска. АСТРА-СТАДИО

Табл. Т301.1. Результаты определения предельной пластической нагрузки

Критерий	Предельная нагрузка*		
	АСТРА-СТАДИО	ANSYS	$\delta$ , %
Двойного упругого наклона (TES) (рис. Т301.2)	0.8682	0.8692	0.115
Максимум скорости изменения относительной пластической работы (рис. Т301.3)	0.8665	0.8860	2.201

\*Предельное значение параметра нагрузки  $q$

### Заключение

Наибольшее расхождение между АСТРА-СТАДИО и ANSYS по величинам предельной пластической нагрузки составило 2.20% для критерия максимума скорости изменения относительной пластической работы.

### Литература

1. Gerdeen J.C. A critical evaluation of plastic behavior data and a unified definition of plastic loads for pressure components // WRC Bulletin. 1979. No. 254. P. 1–64.
2. Скопинский В.Н., Берков Н.А., Вожова Н.В. Новый критерий определения предельной нагрузки в сосудах давления с патрубками на основе упругопластического анализа. // Машиностроение и инженерное образование. - 2011. - № 3. - С. 50-57.

### **Т302. Тройник. Определение предельного давления**

Рассматривается тройник под действием внутреннего давления. Определяется предельная пластическая нагрузка по критериям двойного упругого наклона и максимума скорости изменения относительной пластической работы. Сравниваются результаты расчета по программам ANSYS и АСТРА-СТАДИО.

#### **Исходные данные**

##### *Геометрические характеристики*

- параметры основной трубы (магистрала):
  - наружный диаметр  $D = 612$  мм;
  - толщина стенки  $S = 6$  мм;
  - половинная длина  $L = 1386.5$  мм;
- параметры штуцера (ответвления):
  - наружный диаметр  $d = 325$  мм;
  - толщина стенки  $s = 6$  мм;
  - длина  $l = 956$  мм.

##### *Физико-механические характеристики*

- модуль упругости  $E = 2e5$  МПа;
- коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ ;
- предел текучести  $\sigma_p = 339.4$  МПа;
- тангенциальный модуль  $E_t = 958.61$  МПа.

##### *Граничные условия*

- жестко закреплены по  $Y$  узлы в середине торца магистрали;
- условия симметрии (рассматривается четверть тройника).

##### *Параметры нагрузки*

- максимальное внутреннее давление  $p = 5$  МПа;
- осевые силы от давления, задаются как растягивающие напряжения на торцы: магистраль – 123.76 МПа, штуцер – 63.982 МПа.

#### **Описание модели**

Используются объемные 20-ти узловые КЭ с 3-мя точками интегрирования по каждой оси. Заданы 4 слоя элементов по толщине. Для материала использовалась модель изотропного упрочнения с билинейной диаграммой деформирования. Расчет проводился при разбиении максимальной нагрузки на 40 шагов.

По результатам упругопластического расчета в АСТРА-СТАДИО и ANSYS построены графики зависимости параметра нагрузки от максимальной главной деформации (рис. Т302.2), применен критерий двойного упругого наклона. Максимальная главная деформация определяется в точке, где впервые появляются пластические деформации. Также построены графики зависимости производной относительной пластической работы от параметра нагрузки (рис. Т302.3) для определения предельной пластической нагрузки по критерию Скопинского. В качестве параметра нагрузки рассматривается коэффициент при максимальной расчетной нагрузке, изменяющийся в диапазоне  $[0; 1]$ . Результаты опреде-

ления предельных пластических нагрузок по различным критериям сравниваются в табл. Т302.1.

ИПКЭ 20

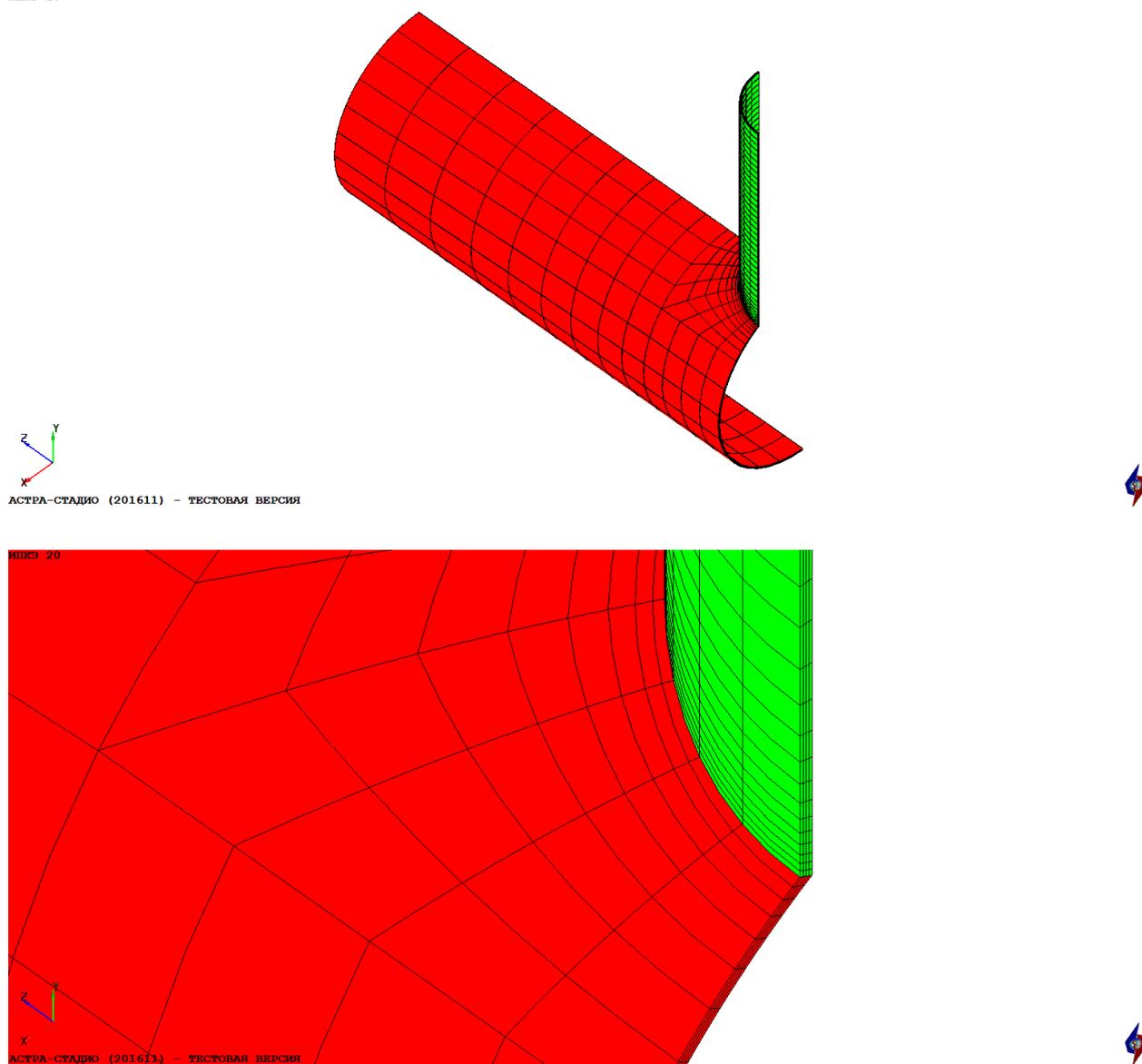


Рис. Т302.1. Тестовая модель. АСТРА-СТАДИО

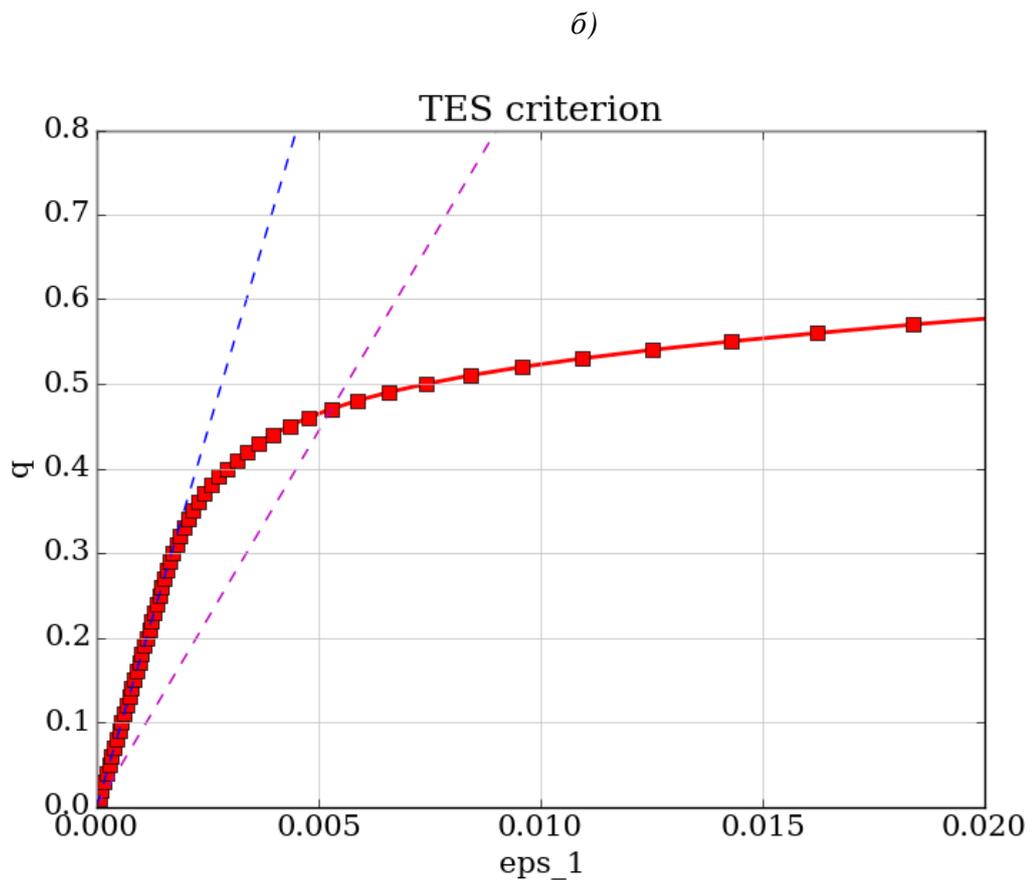
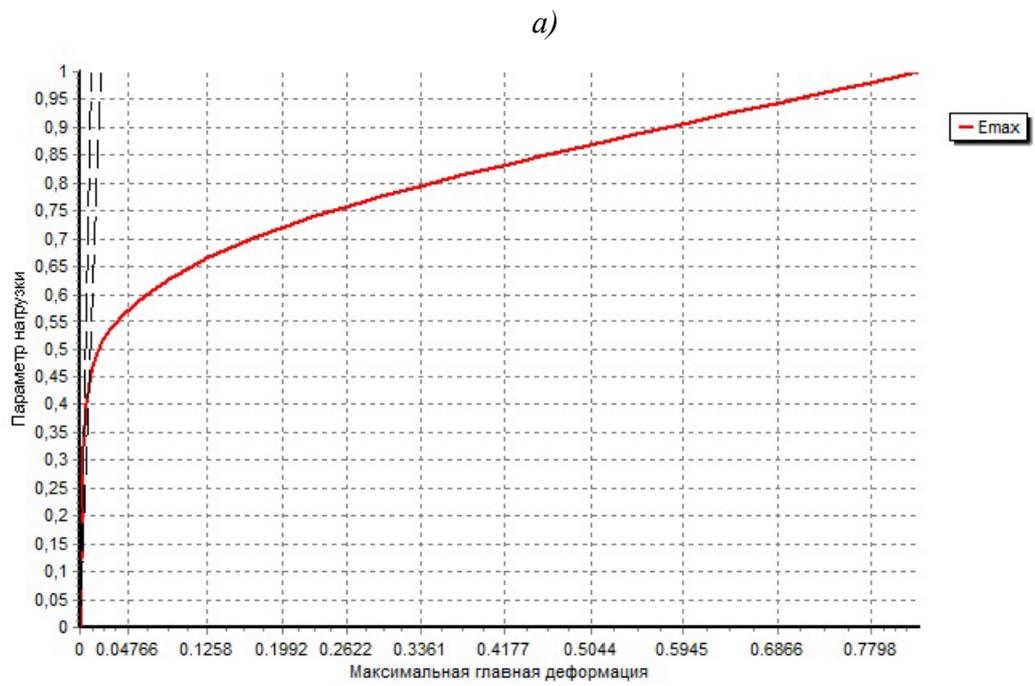
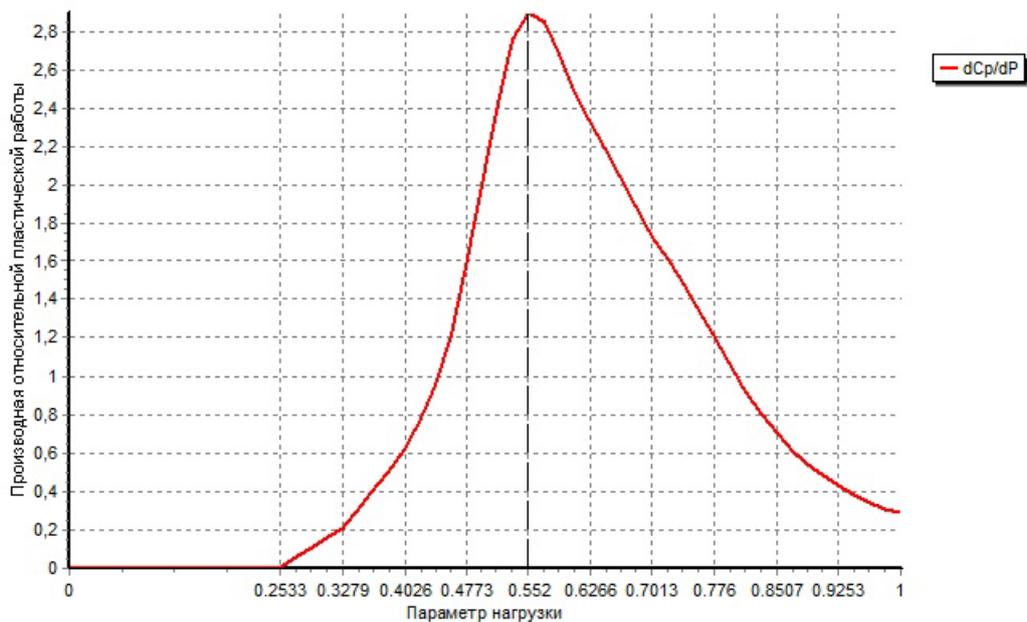


Рис. Т302.2. График зависимости параметра нагрузки от величины максимальной главной деформации. Критерий двойного упругого наклона. (а): по результатам расчета в АСТРА-СТАДИО, (б): по результатам ANSYS

### АСТРА-СТАДИО



### ANSYS

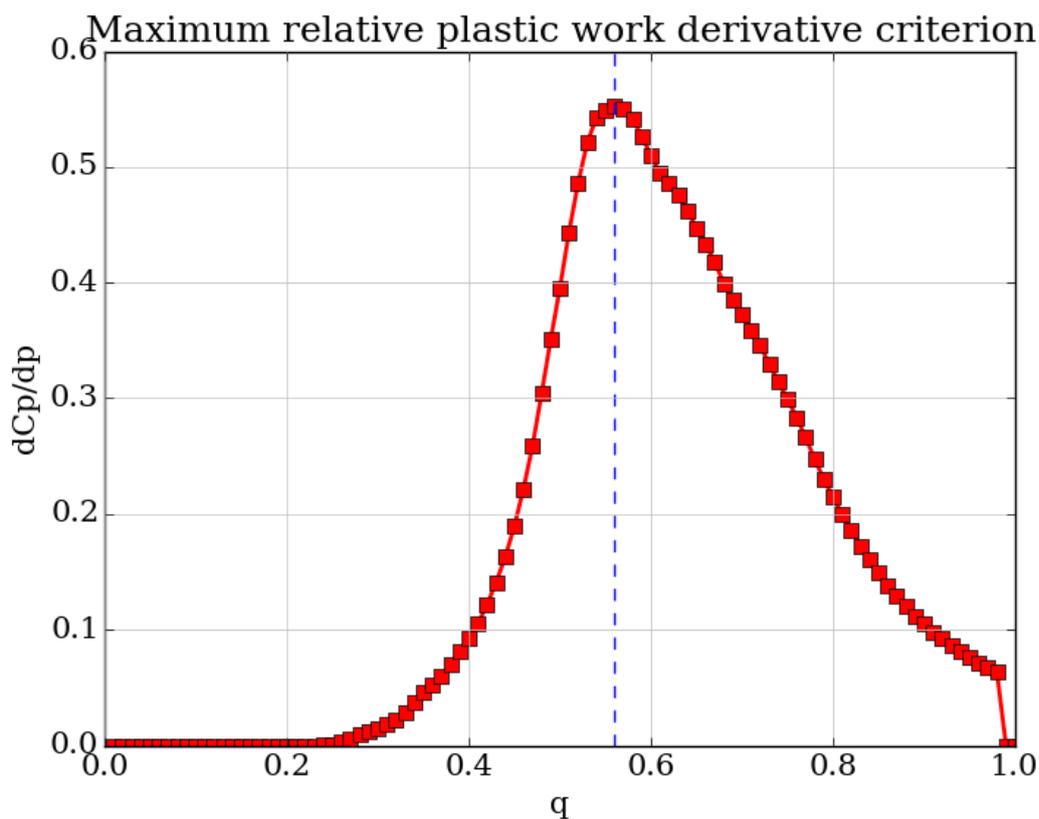
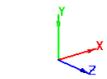
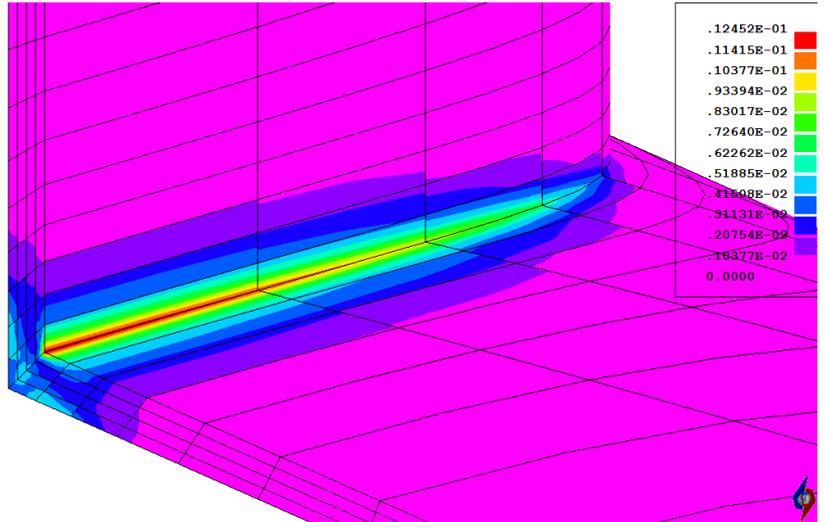


Рис. Т302.3. График зависимости производной относительной пластической работы от параметра нагрузки. Критерий Скопинского. (а): по результатам расчета в АСТРА-СТАДИО, (б): по результатам ANSYS

# АСТРА-СТАДИО

Пластическая деформация Треска  
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.0225367



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

# ANSYS

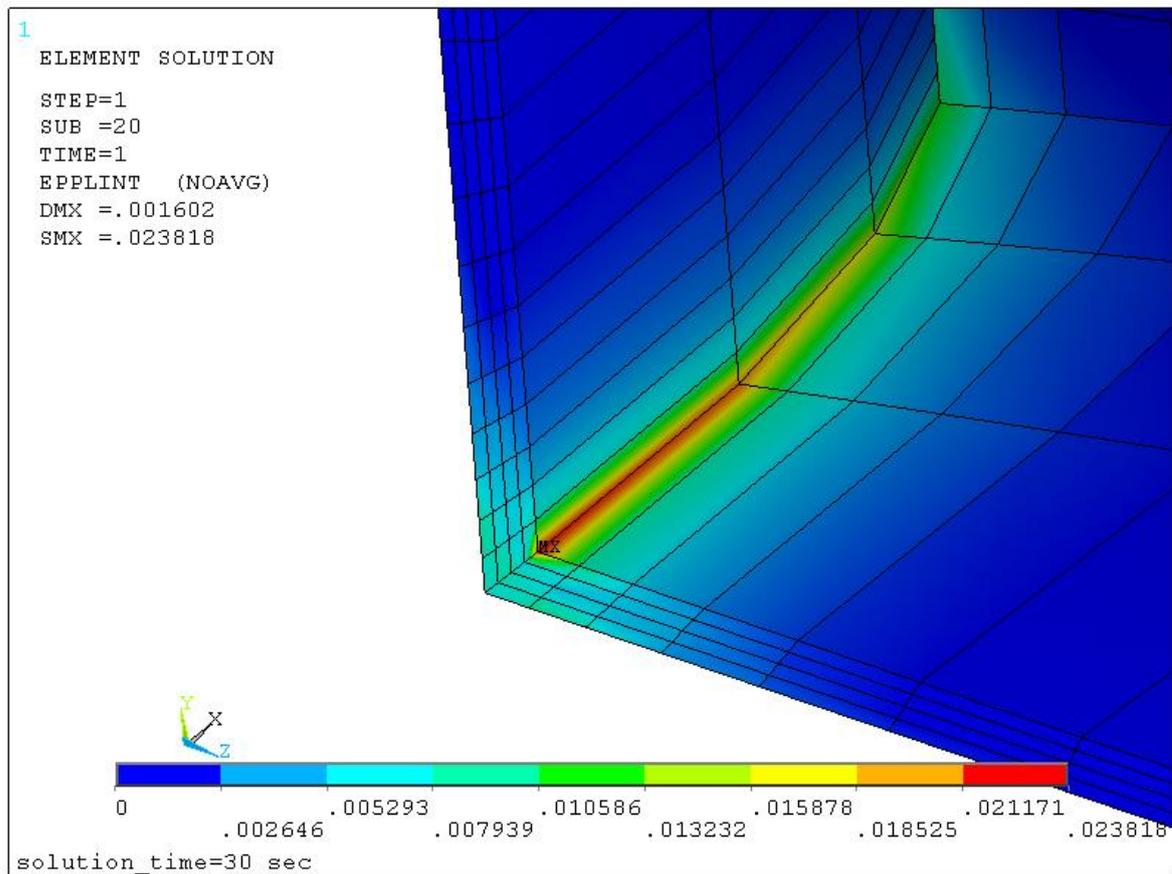
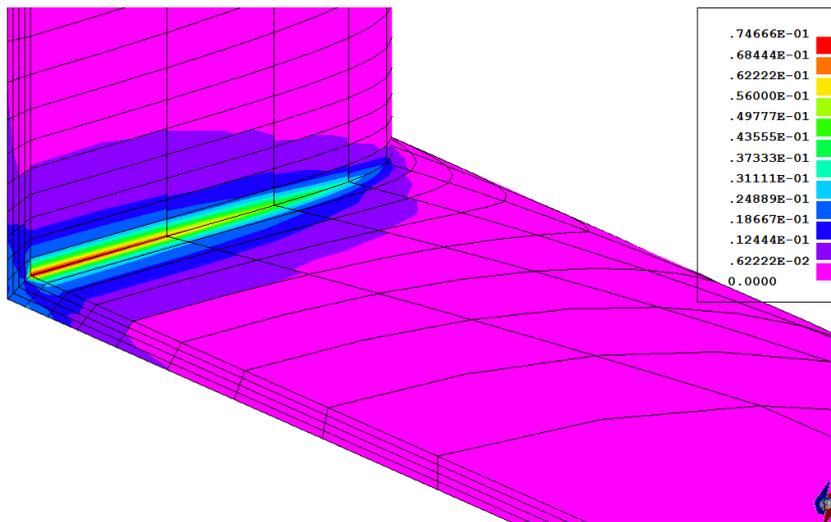


Рис. Т302.4. Распределение эквивалентных пластических деформаций Треска в сечении при предельной пластической нагрузке по критерию двойного упругого наклона

## АСТРА-СТАДИО

Пластическая деформация Треска  
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.129374



АСТРА-СТАДИО (201611) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

## ANSYS

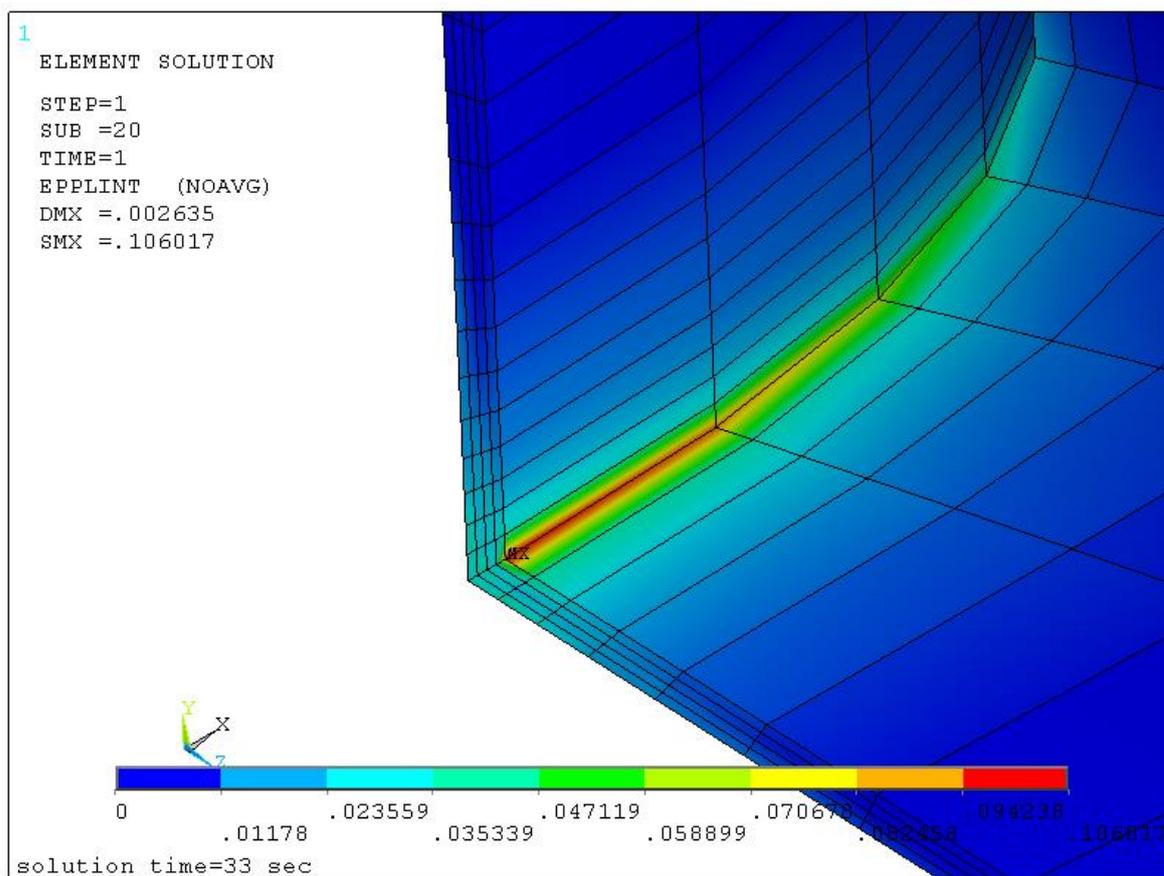


Рис. Т302.5. Распределение эквивалентных пластических деформаций Треска в сечении при предельной пластической нагрузке по энергетическому критерию Скопинского

Табл. Т302.1. Результаты определения предельной пластической нагрузки

Критерий	Предельная нагрузка*		
	АСТРА-СТАДИО	ANSYS	$\delta$ , %
Двойного упругого наклона (TES) (рис. Т301.2)	0.4421	0.4703	5.996
Максимум скорости изменения относительной пластической работы (рис. Т301.3)	0.5520	0.5600	1.429

\*Предельное значение параметра нагрузки  $q$

### **Заключение**

Наибольшее расхождение между АСТРА-СТАДИО и ANSYS по величинам предельной пластической нагрузки составило 6.00% для критерия двойного упругого наклона.