

Научно-исследовательский центр **СтаДиО**

“Семейство” программных комплексов
АСТРА-НОВА’2017™ (релиз 201711)

Верификационный отчет по новым возможностям



Москва, 2017 г.

Оглавление

1. Метод граничной сейсмостойкости (МГС).....	3
2. Нестандартные опоры	9
2.1. Элементарные примеры	9
2.1.1. Односторонняя опора/отрыв	9
2.1.2. Зазоры	19
2.2. Схема с несколькими опорами.....	21
2.3. Большие схемы	33
2.3.1. СПиР-САОР АЭС (TEST3).....	33
2.3.2. Система «коллекторы-реакторы» НЕФТЕХИМ (Нижекамск)	42
3. АСТРА-СТАДИО. Упругопластический расчет для полной модели. Учет всех нагрузок	49
3.1. Расчет на внутреннее давление. Сопоставление для полной модели и четверти ..	50
3.2. Расчет на сочетание нагрузок. Сопоставление с ANSYS	58
4. АСТРА-СТАДИО. Определение предельных нагрузок на основе трехмерных упругопластических расчетов по двум критериям. Вариантные расчеты.....	80
4.1. Прямая труба.....	80
4.2. Тройники тонко- и толстостенные, равно- и неравнопроходные.....	85

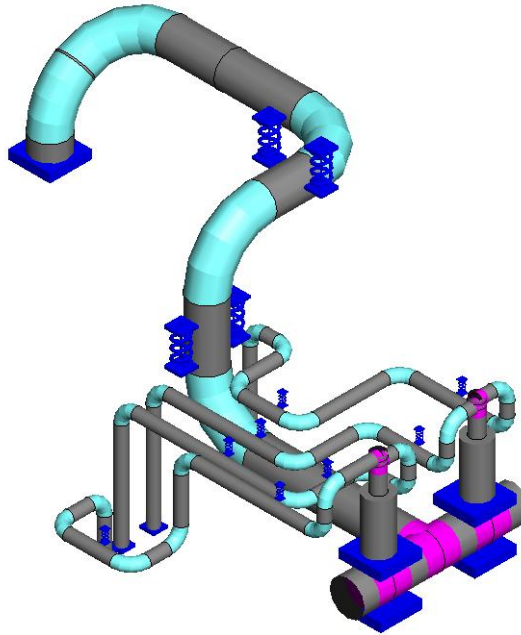
1. Метод граничной сейсмостойкости (МГС)

Верификация сейсмической квалификации методом граничной сейсмостойкости [1].

Модель: Верификация МГС.apr

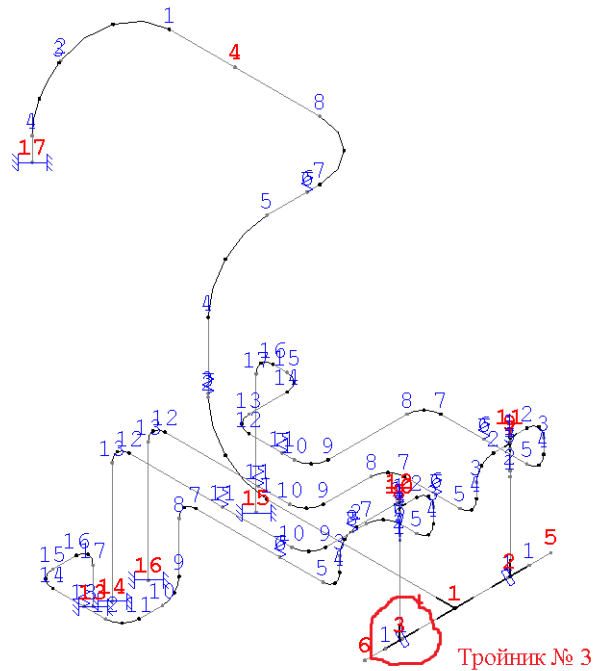
Деталь, выбранная для проверки сейсмической квалификации – тройник в узле № 3, см. Рис. 1.

Исходный трубопровод



АСТРА-АЭС'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ. САЭС ГПК+ОП

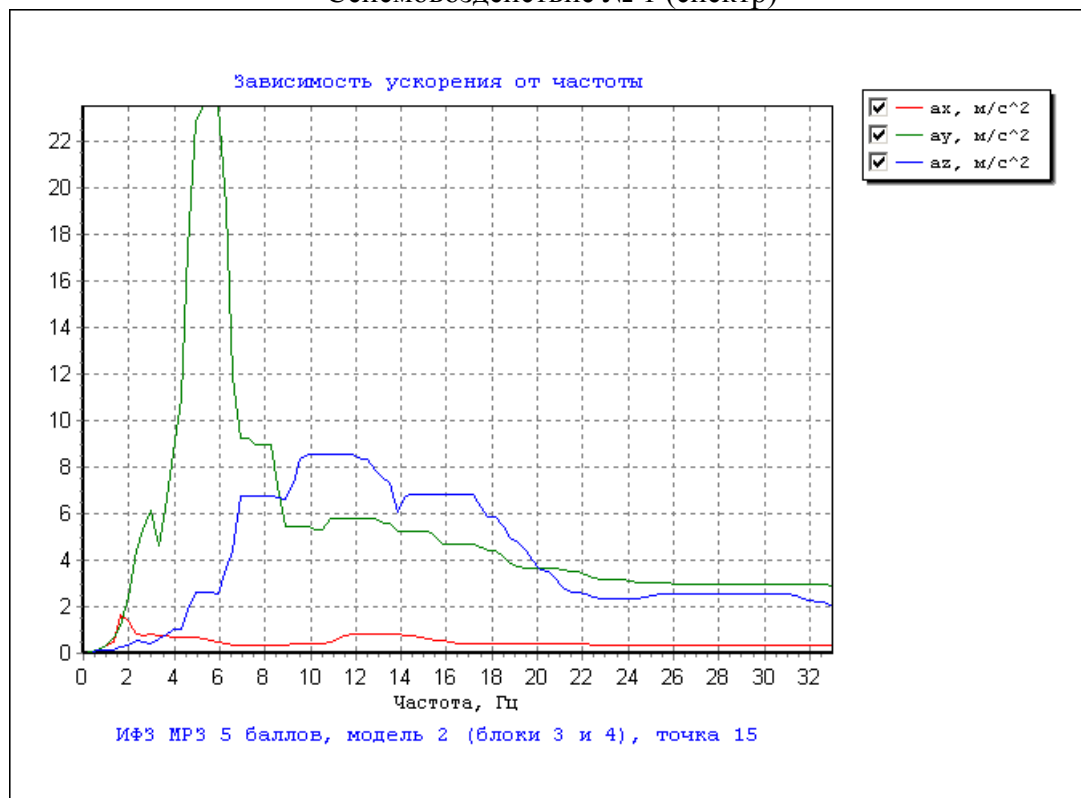
Исходный трубопровод



АСТРА-АЭС'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ. САЭС ГПК+ОП

Рис. 1 АСТРА-модель трубопроводной системы

Сейсмодействие № 1 (спектр)



Сейсмодействие № 2 (акселерограмма)

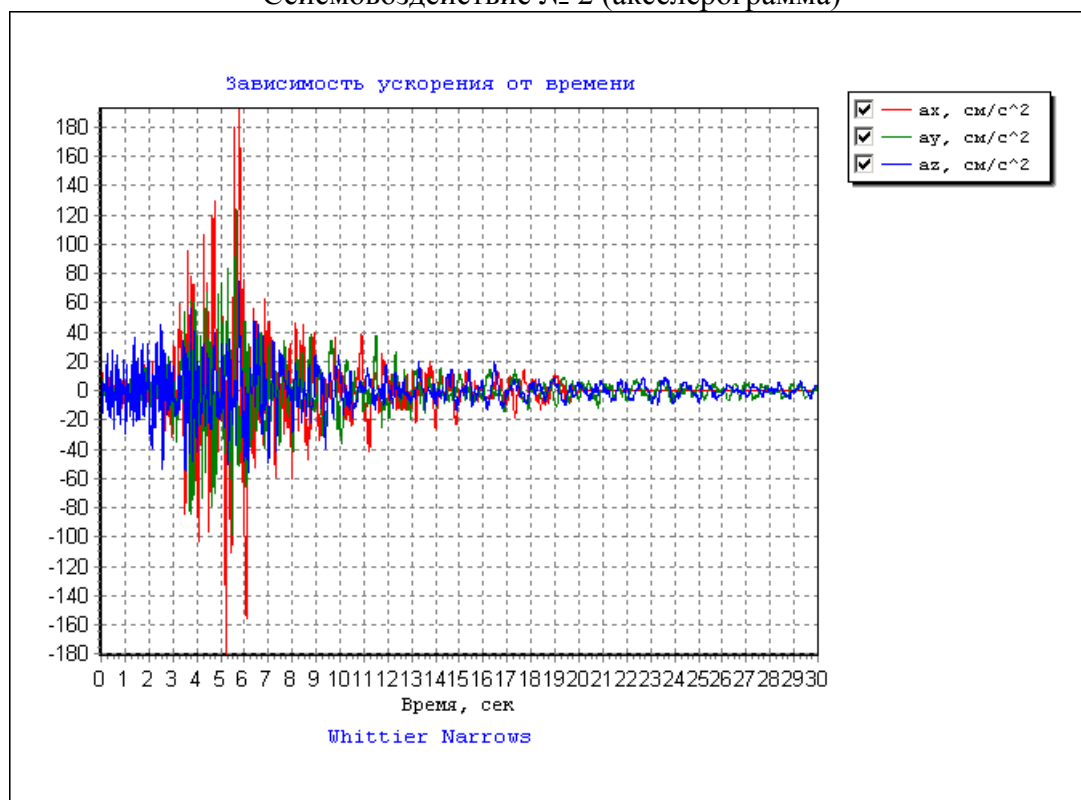
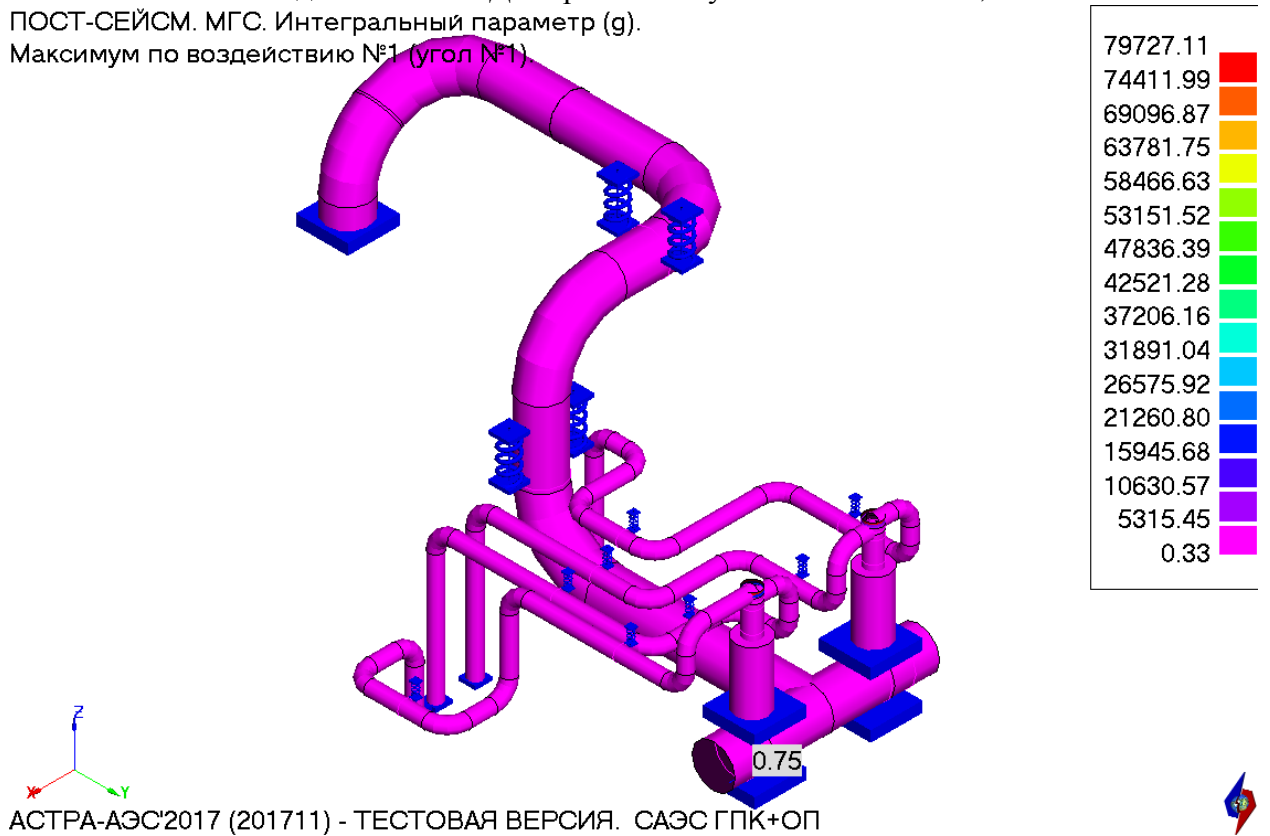


Рис. 2 Расчётные сейсмические воздействия

Воздействие № 1 Для тройника в узле № 3 $HCLPF = 0,75$
 ПОСТ-СЕЙСМ. МГС. Интегральный параметр (g).
 Максимум по воздействию №1 (угол №1)



Воздействие № 2. Для тройника в узле № 3 $HCLPF = 0,79$
 ПОСТ-СЕЙСМ. МГС. Интегральный параметр (g).
 Максимум по воздействию №2 (угол №1)

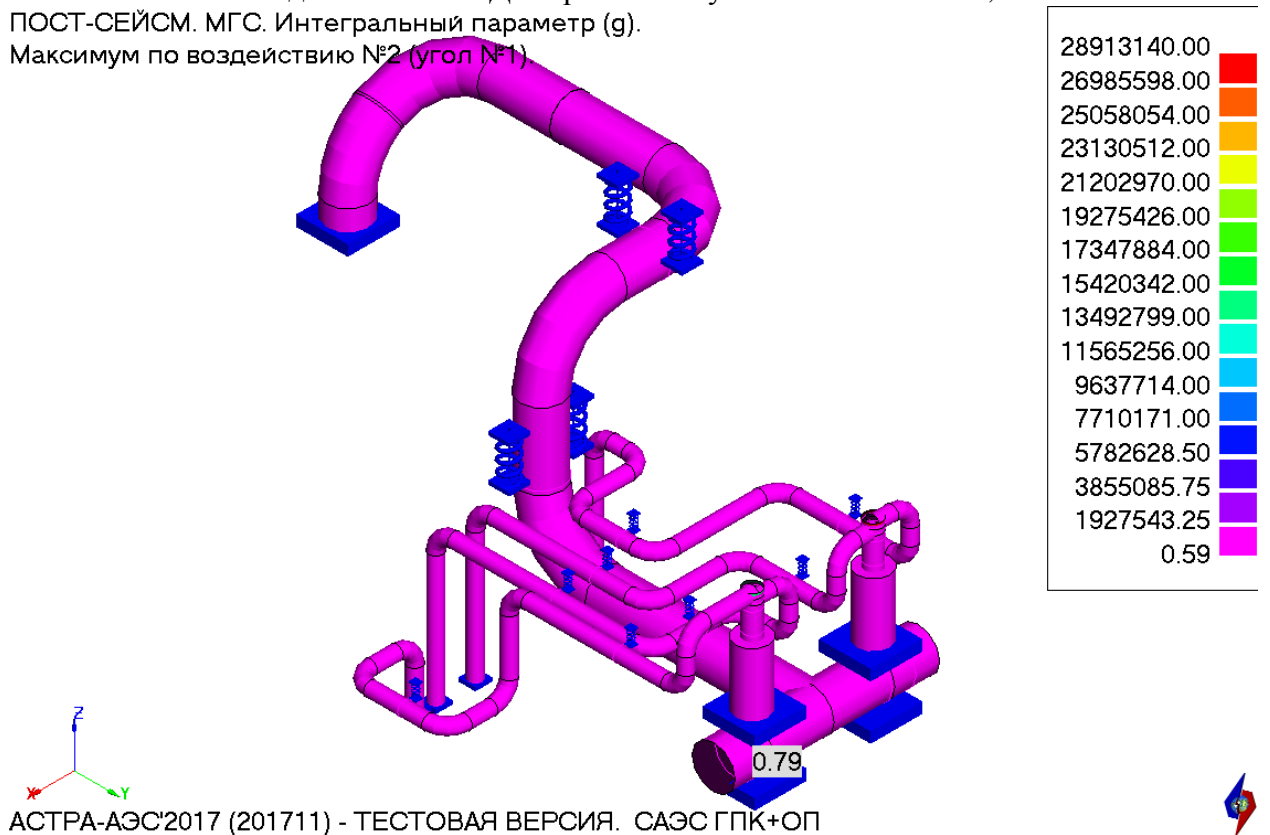


Рис. 3 Интегральный параметр сейсмостойкости HCLPF. Результаты по ПК АСТРА-НОВА. Визуализация

Имя проекта: C:\USERS\STD\DESKTOP\МГС\ВерификацияМГС
 Объект: САЭС ГПК+ОП
 Система: ТР-Д2(Е-Д)
 Дата создания проекта: 1
 Дата создания таблицы: 28-11-2017 | 16:51:07

Таблица 1. Сейсмическая квалификация элементов трубопровода по методу граничной сейсмостойкости.
 Результаты расчёта по ПНАЭ Г-7-002-86 (АСТРА-СЕЙСМ-201711-p1)

Возд-е (угол)	№ узла	Маркер	Интегральный параметр сейсмостойкости, g	Максимальное ускорение на грунте, g	Примечание
спектр-1 (1)	1		1.19	1.00	
	2		0.67	1.00	
	3		0.75	1.00	
	7		1.16	1.00	
	8		0.73	1.00	
	9		1.30	1.00	
	10		0.65	1.00	
аксел.-2 (1)	1		1.63	1.00	
	2		1.56	1.00	
	3		0.79	1.00	
	7		1.78	1.00	
	8		0.94	1.00	
	9		1.17	1.00	
	10		1.66	1.00	

Сейсмостойкость по МГС не обеспечена

Результаты расчёта интегрального параметра сейсмостойкости

Исходные данные:

Напряжения группы 2 (статика) $\sigma_2 = 65,21$ МПа

Напряжения от сейсмических нагрузок для воздействия № 1 $\sigma_s = 131,77$ МПа

Напряжения от сейсмических нагрузок для воздействия № 2 $\sigma_s = 87,62$ МПа

Допускаемые напряжения $[\sigma] = 153,8$ МПа

Коэффициент изменения номинального допустимого изгибного напряжения $CF2 = 1,6$

Коэффициент неупругого поглощения энергии $F_\mu = 1,5$

Пиковое ускорение грунта $PGA = 0.8$ (g)

I. Определение ускорения нулевого периода.

Для трёхкомпонентного спектра ответа (воздействие № 1) ускорение нулевого периода принимается равным векторной сумме ускорений для его высшей частоты:

99	32.34	0.33298	2.93378	2.18016
100	32.67	0.33298	2.93378	2.18015
101	33	0.33245	2.90941	2.01673

$$a_x = 0,33245 \text{ м/с}^2 = 0,0339 \text{ (g)}$$

$$a_y = 2,90941 \text{ м/с}^2 = 0,2966 \text{ (g)}$$

$$a_z = 2,01673 \text{ м/с}^2 = 0,2056 \text{ (g)}$$

Ускорение нулевого периода для воздействия № 1 составляет

$$ZPGA = (a_x^2 + a_y^2 + a_z^2)^{0,5} = (0,0339^2 + 0,2966^2 + 0,2056^2)^{0,5} = 0,3624 \text{ (g)}$$

Определение ускорения нулевого периода трёхкомпонентной акселерограммы проводится в два шага.

1. Определение максимального ответного ускорения осциллятора, при воздействии акселерограммы для заданного уровня демпфирования и частоты, соответствующей ускорению нулевого периода.
2. Векторное суммирование полученных значений компонент ускорений.

Ускорения по компонентам x , y , z для частоты 33 Гц, принятой, в качестве таковой, соответствующей нулевому периоду и при относительном демпфировании 0,02 Гц:

$$a_x = 2,0134 \text{ м/с}^2 = 0,2052 \text{ (g)}$$

$$a_y = 1,2692 \text{ м/с}^2 = 0,1294 \text{ (g)}$$

$$a_z = 0,7790 \text{ м/с}^2 = 0,0794 \text{ (g)}$$

Ускорение нулевого периода для воздействия № 2 составляет

$$ZPGA = (a_x^2 + a_y^2 + a_z^2)^{0,5} = (0,2052^2 + 0,1294^2 + 0,0794^2)^{0,5} = 0,2553 \text{ (g)}$$

II. Определение интегрального параметра сейсмостойкости HCLPF

Интегральный параметр сейсмостойкости вычисляется по формуле:

$$HCLPF = (CF2 \cdot [\sigma] - \sigma_2) / \sigma_s \cdot F_\mu \cdot ZPGA$$

Для воздействия № 1:

$$HCLPF = (1,6 \cdot 153,8 - 65,21) / 131,77 \cdot 1,5 \cdot 0,3624 = 0,75 \text{ (g)}$$

Для воздействия № 2:

$$HCLPF = (1,6 \cdot 153,8 - 65,21) / 87,62 \cdot 1,5 \cdot 0,2553 = 0,79 \text{ (g)}$$

Табл. 1 Результаты расчёта

Воздействие	АСТРА-НОВА	Ручной счёт	δ , %
1	0,75	0,75	0
2	0,79	0,79	0

Термины и определения

Метод граничной сейсмостойкости – метод анализ сейсмостойкости трубопроводов, оборудования конструкций АЭС.

Сейсмическая квалификация – проверка сейсмостойкости спроектированных элементов АЭС.

Интегральный параметр сейсмостойкости HCLPF – характеристика граничной сейсмостойкости трубопровода, оборудования или конструкции, отнесённая к пиковому значению ускорения на уровне грунта.

Пиковое ускорение грунта – максимальное ускорение грунта при сейсмоздействии.

Коэффициент неупругого поглощения энергии – коэффициент, учитывающий неупругое рассеяние энергии при проведении расчёта в линейно-упругой постановке.

Ускорение нулевого периода – ускорение спектра ответа в асимптотической области спектра, которая обычно лежит в диапазоне частот более 33 Гц.

Литература

1. Методика расчётного анализа сейсмостойкости элементов действующих АЭС в рамках метода граничной сейсмостойкости. МТ-Т.0.03.326-13. ГП «НАЭК «ЭНЕРГОАТОМ», 2013 г.

2. A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin (Revision 1) Rep. EPRI NP-6041-SLR1, Palo Alto, CA (1991)

2. Нестандартные опоры

В версии 201711 реализованы нестандартные опоры (Рис. 4), учитывающие:

- односторонние связи по осям общей или местной системы координат. Односторонние связи учитываются по линейным направлениям;
- зазоры (возможность для трубы перемещаться на заданное расстояние без сопротивления до вступления в контакт с опорой). Учитываются только в рабочем состоянии.

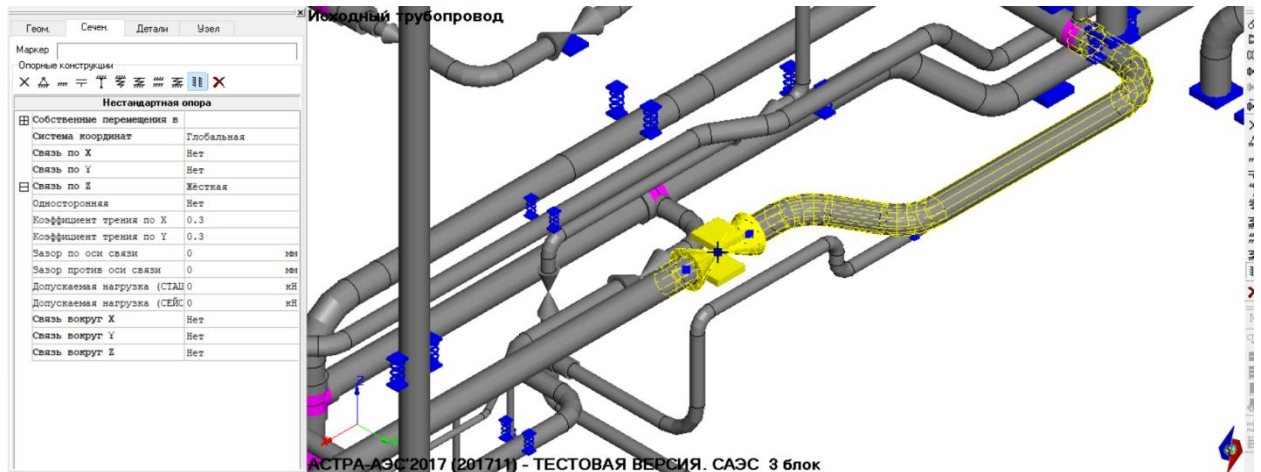


Рис. 4 Задание нестандартной опоры

2.1. Элементарные примеры

2.1.1. Односторонняя опора/отрыв

Рассматривается элементарная расчетная схема, состоящая из одного участка, содержащего нестандартную опору (Рис. 5). В опоре задаются различные односторонние связи. Труба жестко закреплена на одном торце, на другом торце в направлении связи прикладывается сосредоточенная сила $P = 100$ кН ориентированная так, чтобы вызывать отрыв или прижим в опоре.

Опора задается в общей системе координат. Собственный вес трубы не учитывается. Трение в опоре не учитывается.

Тест 1. Односторонняя по Z

Модель: one_supp_separat_Z_nst.anp

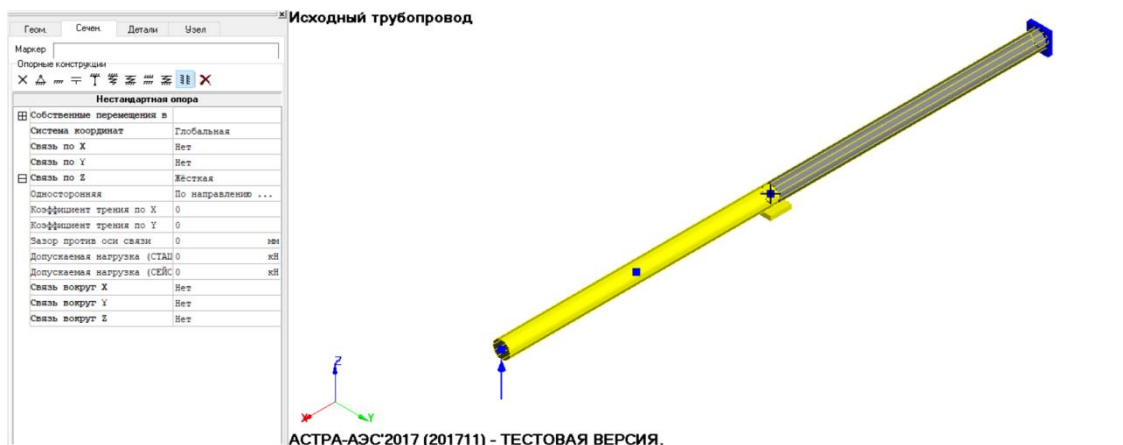
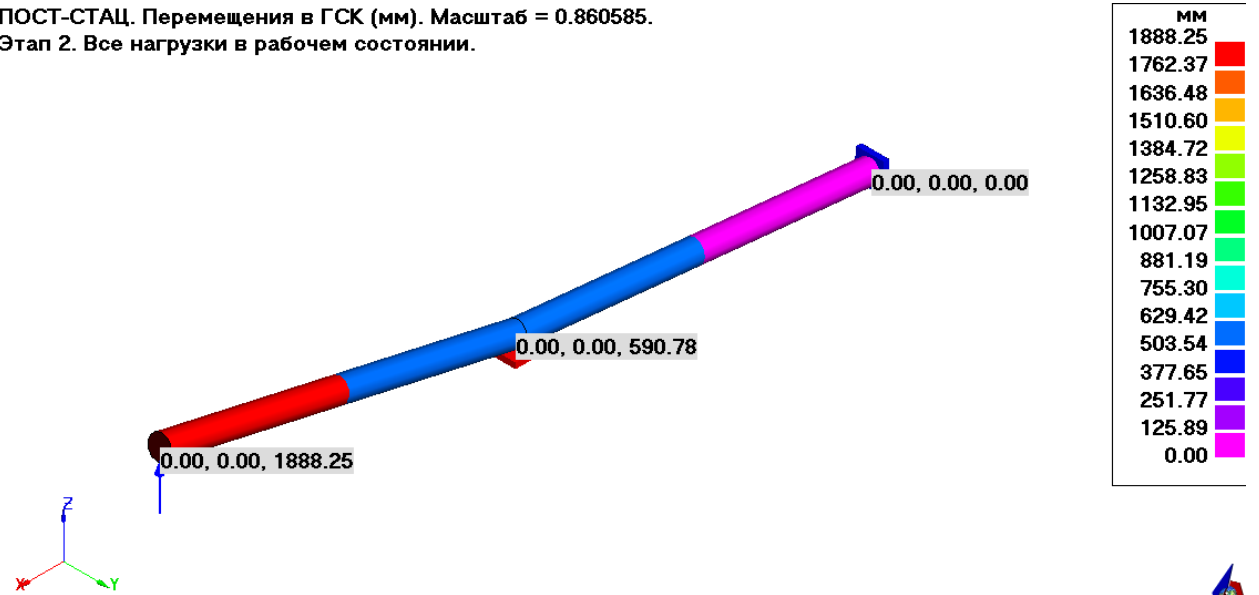


Рис. 5 Задание нестандартной опоры

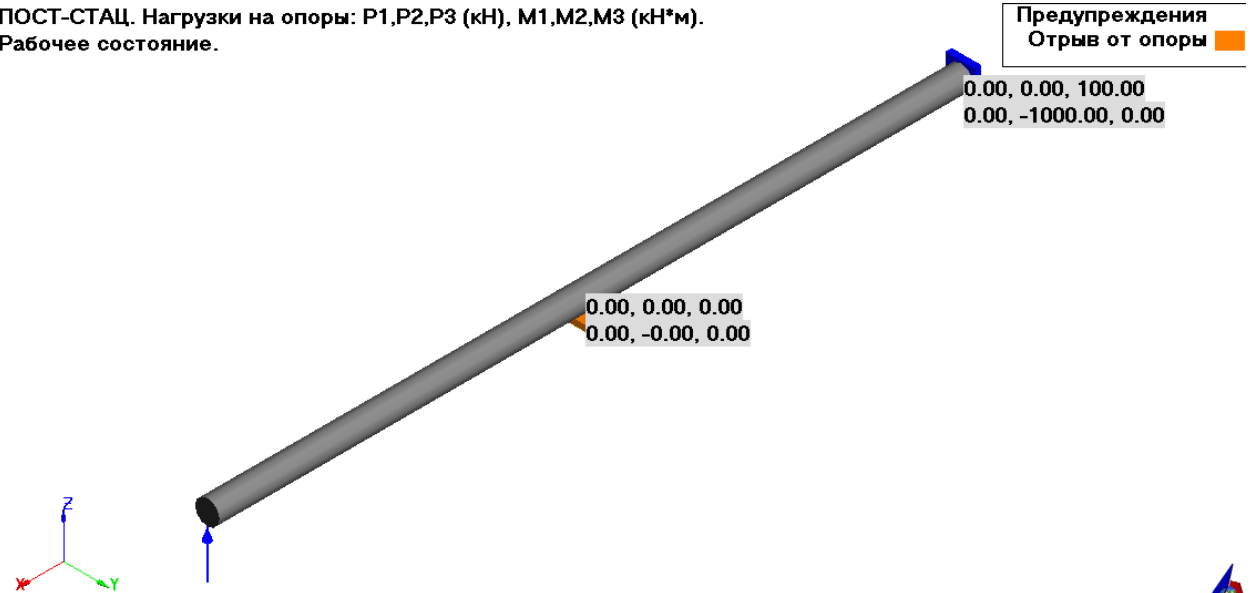
ПОСТ-СТАЦ. Перемещения в ГСК (мм). Масштаб = 0.860585.
 Этап 2. Все нагрузки в рабочем состоянии.



АСТРА-АЭС'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 6 Перемещения. Односторонняя связь по Z. Отрыв

ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
 Рабочее состояние.

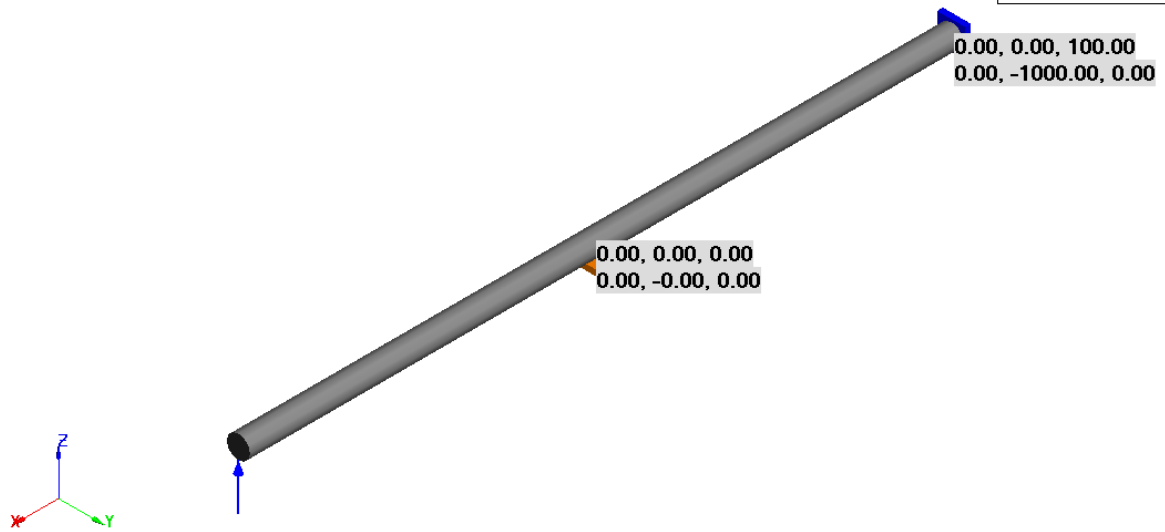


АСТРА-АЭС'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 7 Нагрузки на опору в рабочем состоянии. Односторонняя связь по Z. Отрыв

ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Холодное состояние.

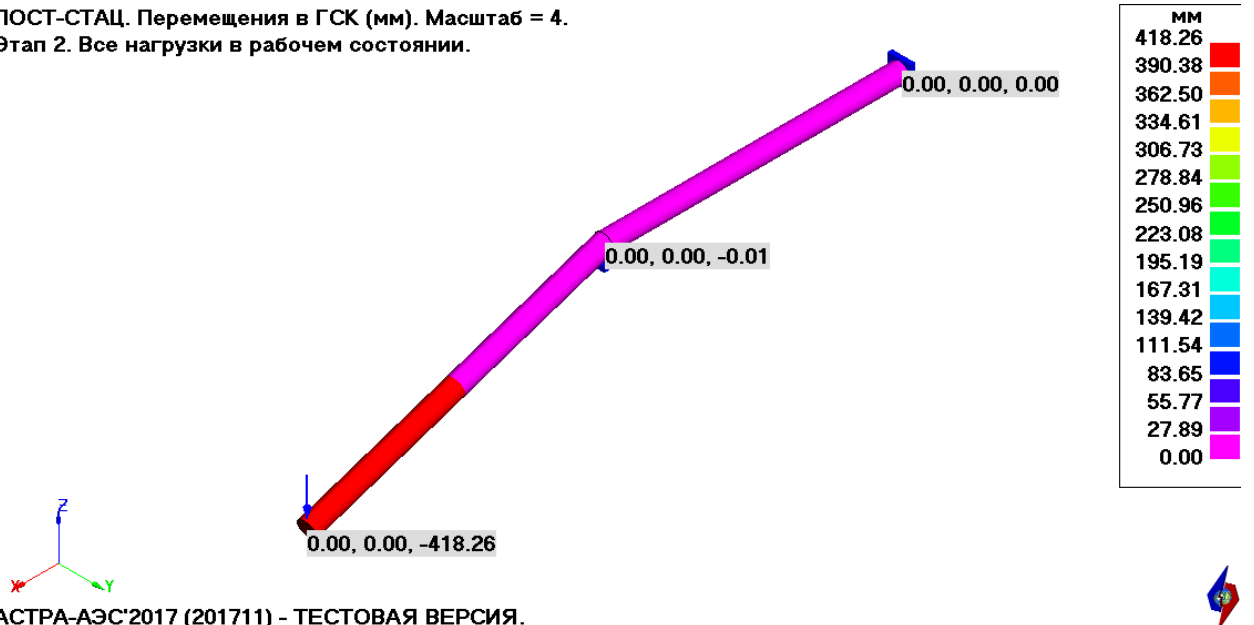
Предупреждения
Отрыв от опоры



АСТРА-АЭС'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 8 Нагрузки на опору в холодном состоянии. Односторонняя связь по Z. Отрыв

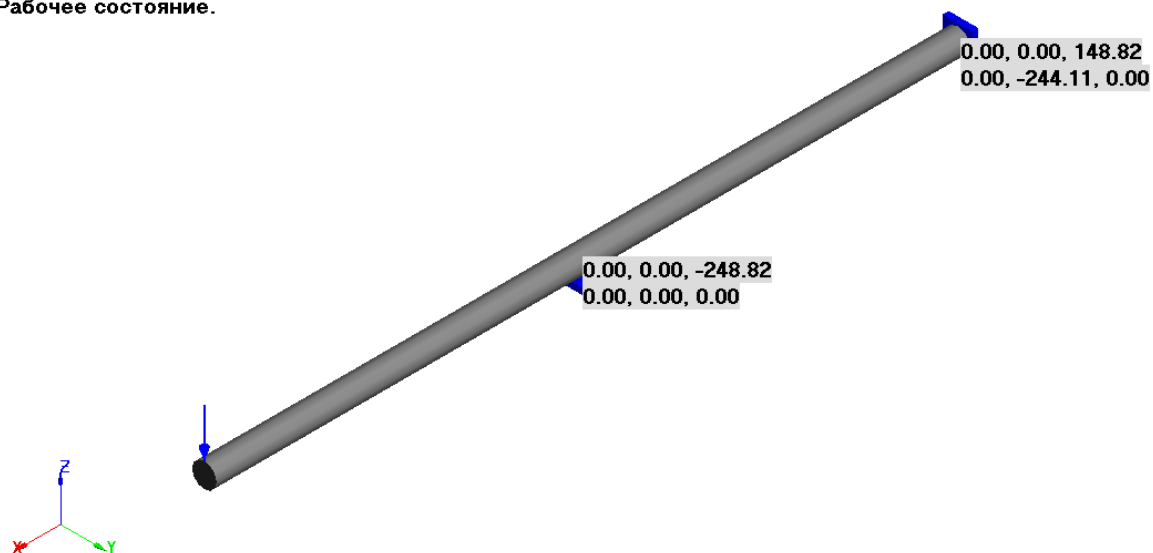
ПОСТ-СТАЦ. Перемещения в ГСК (мм). Масштаб = 4.
Этап 2. Все нагрузки в рабочем состоянии.



АСТРА-АЭС'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 9 Перемещения. Односторонняя связь по Z. Прижим

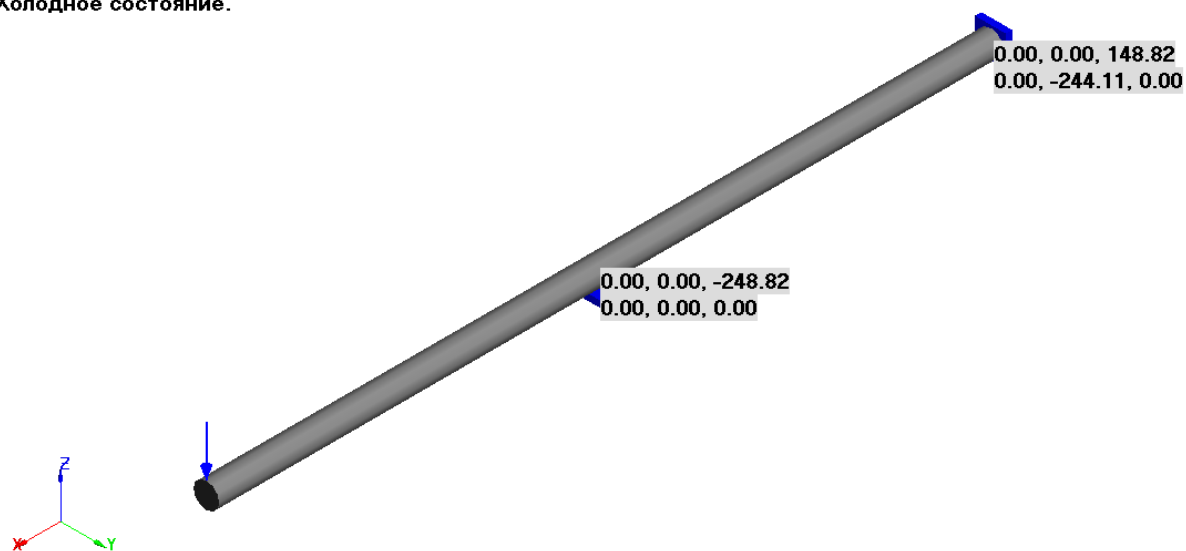
ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Рабочее состояние.



АСТРА-АЭС'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 10 Нагрузки на опору в рабочем состоянии. Односторонняя связь по Z. Прижим

ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Холодное состояние.



АСТРА-АЭС'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 11 Нагрузки на опору в холодном состоянии. Односторонняя связь по Z. Прижим

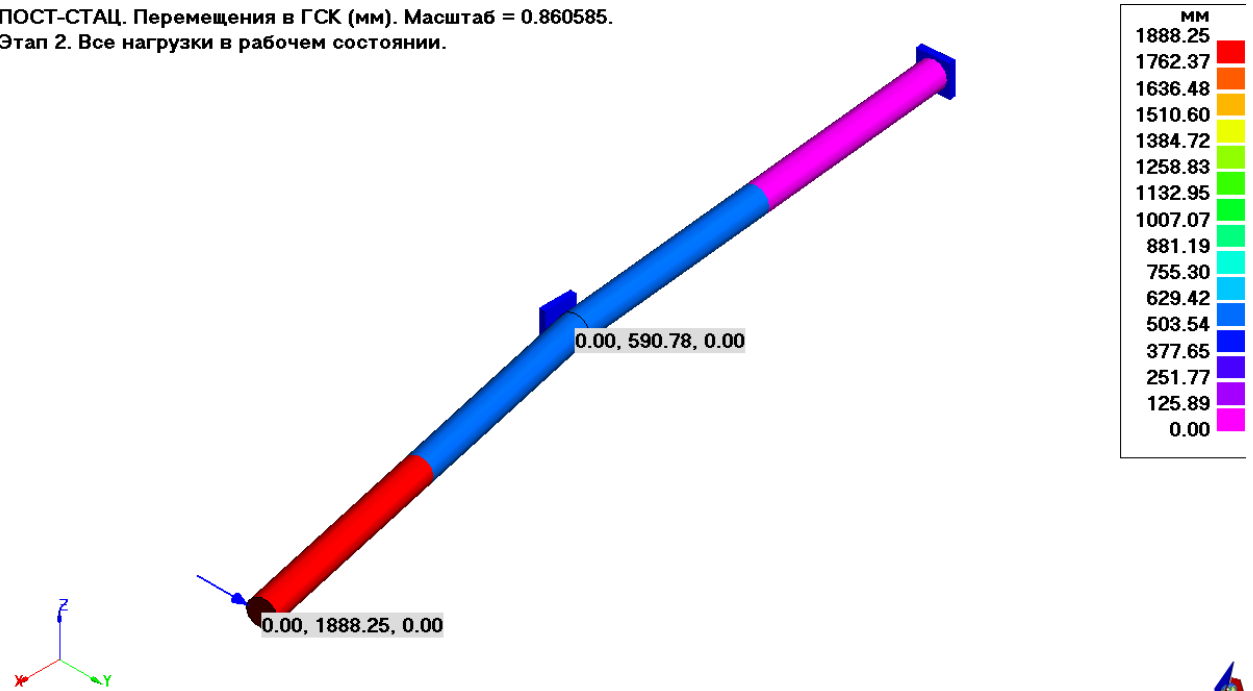
Результаты для нестандартной опоры в данном случае идентичны результатам с односторонней опорой скольжения.

Тест 2. Односторонняя по Y

Модель: one_supp_separat_Y_nst.anp

ПОСТ-СТАЦ. Перемещения в ГСК (мм). Масштаб = 0.860585.

Этап 2. Все нагрузки в рабочем состоянии.

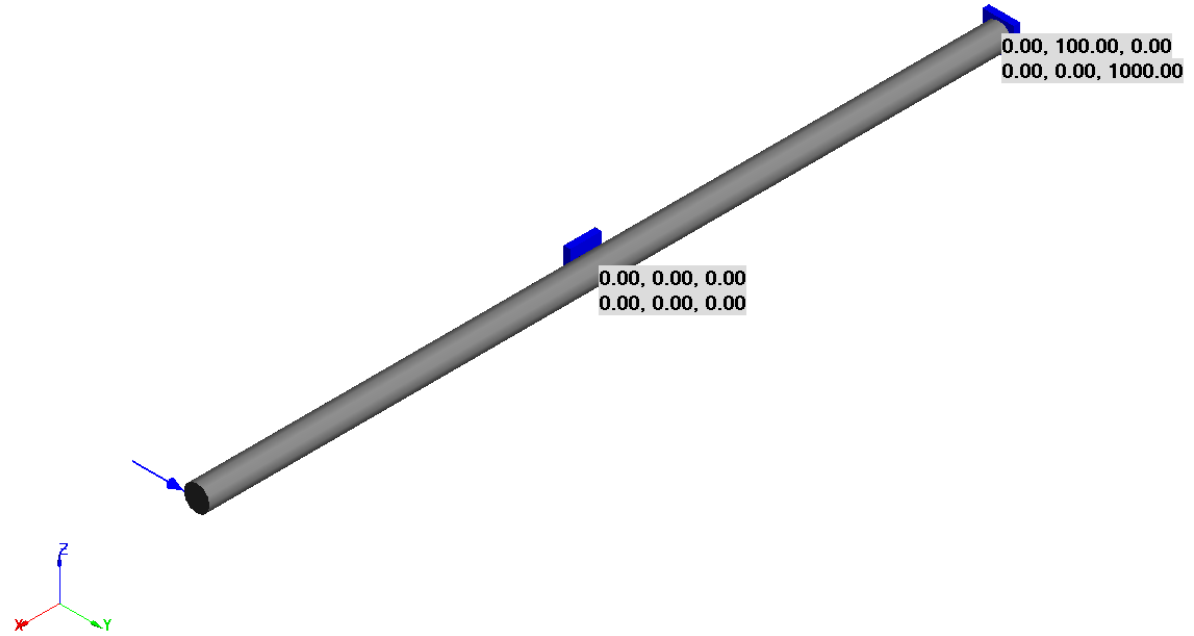


АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 12 Перемещения. Односторонняя связь по Y. Отрыв

ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).

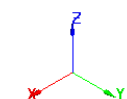
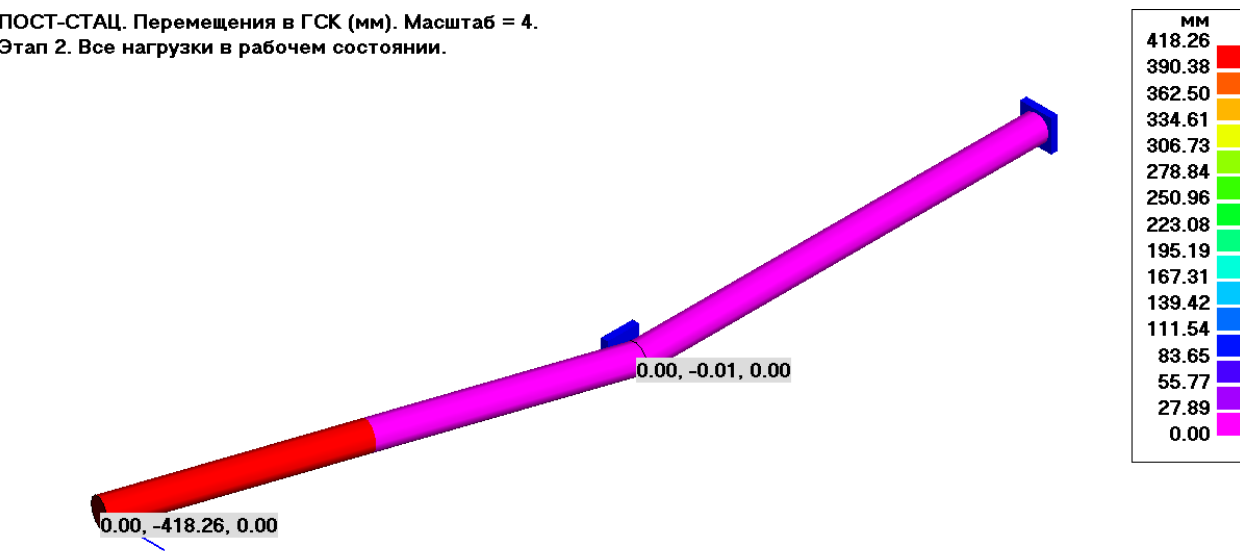
Рабочее состояние.



АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 13 Нагрузки на опору. Односторонняя связь по Y. Отрыв

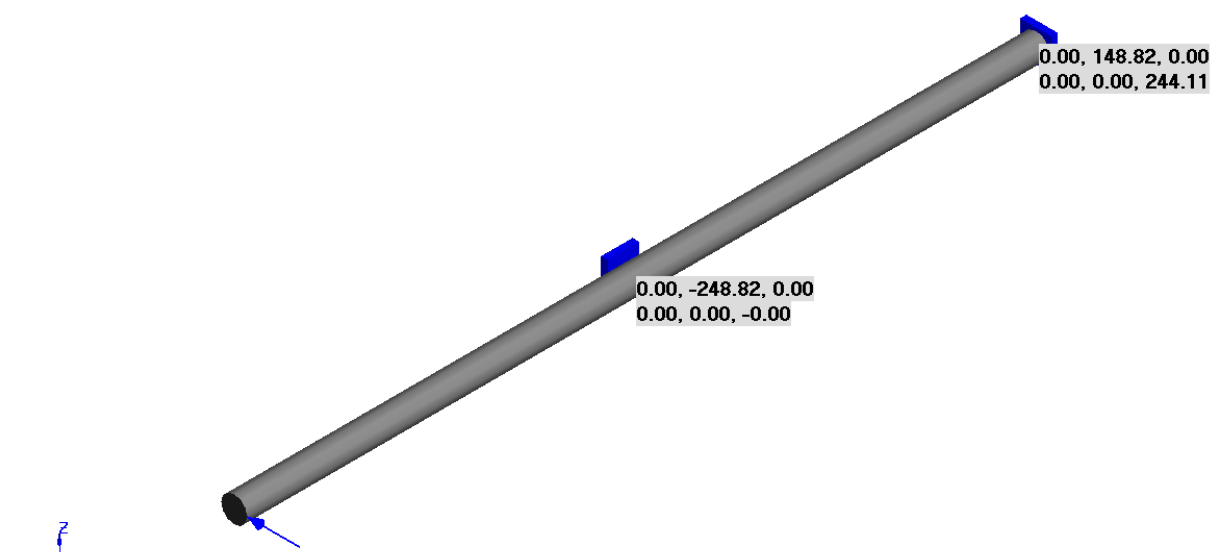
ПОСТ-СТАЦ. Перемещения в ГСК (мм). Масштаб = 4.
Этап 2. Все нагрузки в рабочем состоянии.



АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 14 Перемещения. Односторонняя связь по Y. Прижим

ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Рабочее состояние.



АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 15 Нагрузки на опоры. Односторонняя связь по Y. Прижим

Протокол расчета:

Расчет низкотемпературный, учет трения: Гипрокаучук

Ввод _____
Время счета - 0.07 сек
Этап 1 _____
Начало 15 час 36 мин 47.57 сек
Время счета - 0.00 сек
Этап 2б _____
Начало 15 час 36 мин 47.57 сек
Время счета - 0.00 сек
Число итераций 2
Этап 1 _____
Начало 15 час 36 мин 47.58 сек
Время счета - 0.00 сек
Этап 4 _____
Начало 15 час 36 мин 47.58 сек
Время счета - 0.01 сек
Число итераций 3
Этап 3 _____
Время счета - 0.01 сек
Расчет завершен _____
Время окончания - 15 час 36 мин 47.63 сек
Время счета - 0.14 сек

Протокол сходимости:

ЭТАП 2

Итерация №1 Этап 2
Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UY(1). eps = (0,0,0,0,0,0).
Итерация №2 Этап 2
Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UY(2). eps = (0,0,0,0,0,0).

ЭТАП 4

Итерация №1 Этап 4
Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UY(1). eps = (0,0,0,0,0,0).
Итерация №2 Этап 4
Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UY(2). eps = (0,0,0,0,0,0).
Итерация №3 Этап 4
Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UY(3). eps = (0,0,0,0,0,0).

ЭТАП 2

Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UY(1). eps = (0,0,0,0,0,0).

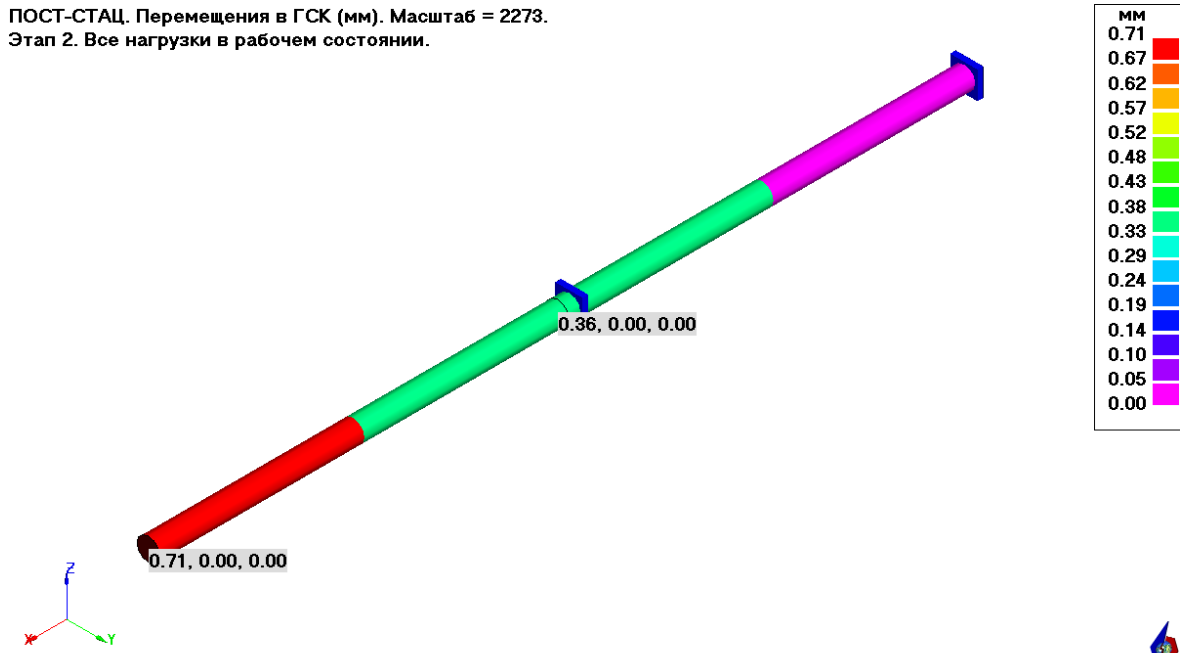
ЭТАП 4

Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UY(1). eps = (0,0,0,0,0,0).

Тест 3. Односторонняя по X

Модель: one_supp_separat_X_nst.anp

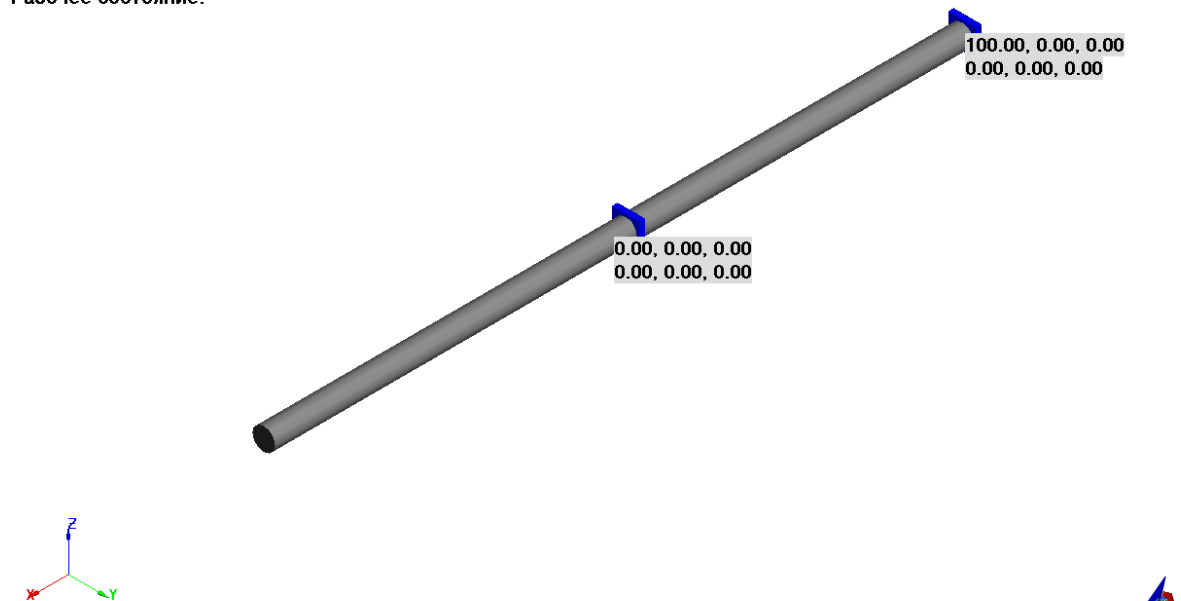
ПОСТ-СТАЦ. Перемещения в ГСК (мм). Масштаб = 2273.
Этап 2. Все нагрузки в рабочем состоянии.



АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 16 Перемещения. Односторонняя связь по X. Отрыв

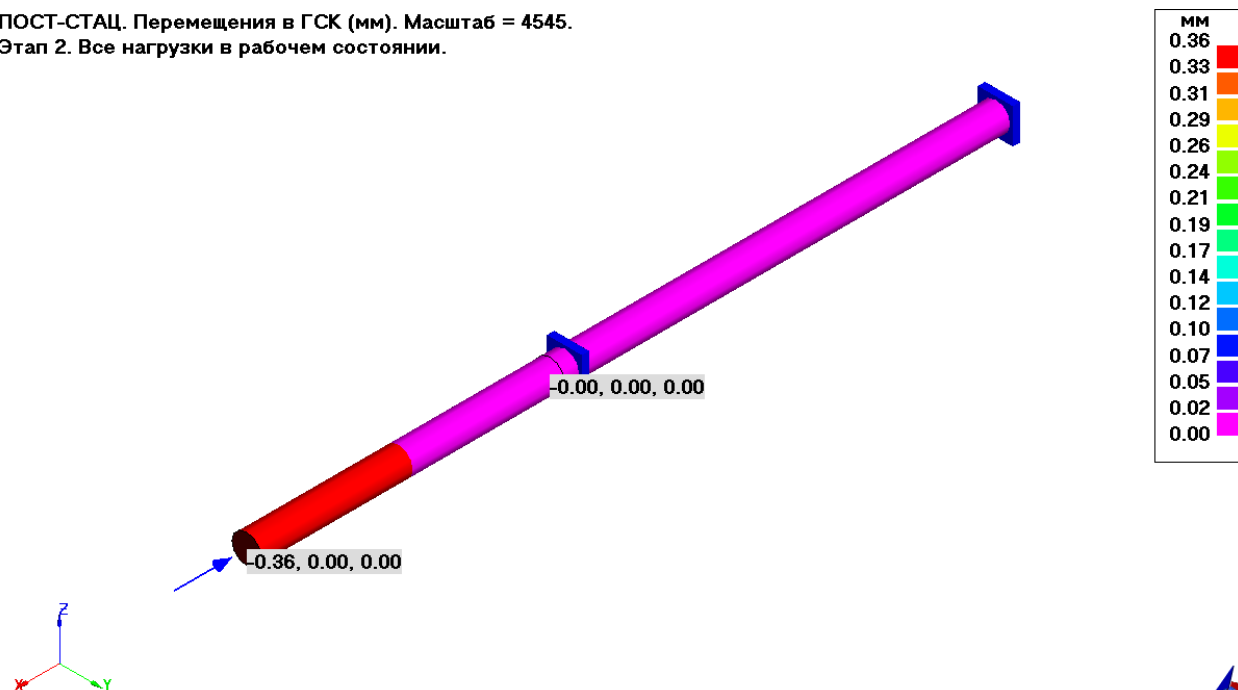
ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Рабочее состояние.



АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 17 Нагрузки на опору. Односторонняя связь по X. Отрыв

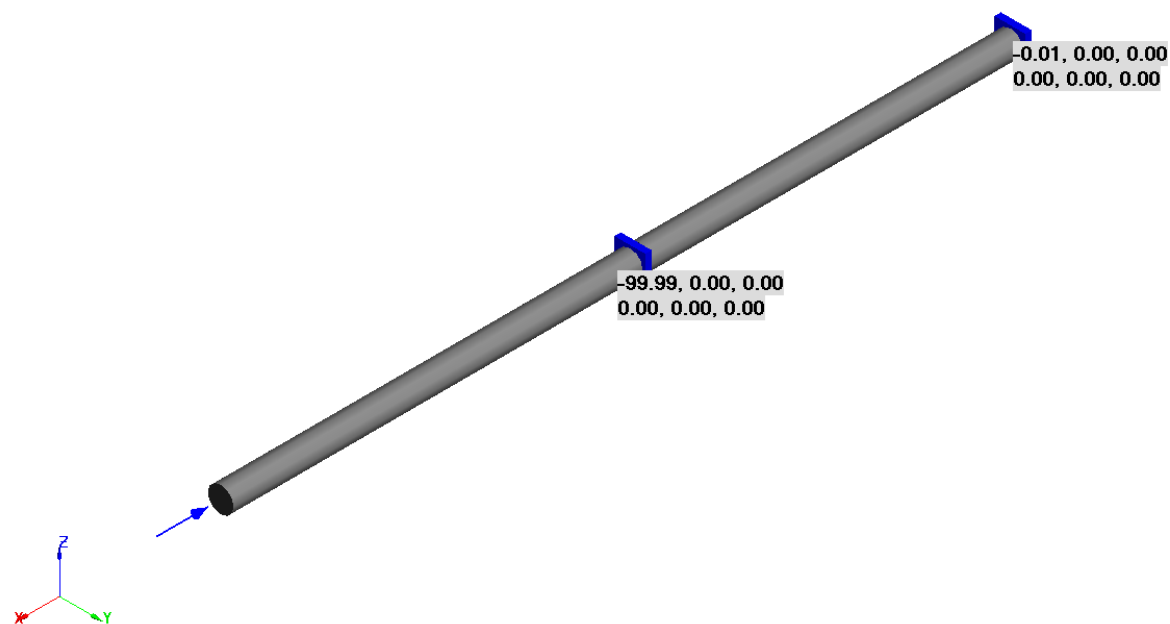
ПОСТ-СТАЦ. Перемещения в ГСК (мм). Масштаб = 4545.
Этап 2. Все нагрузки в рабочем состоянии.



АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 18 Перемещения. Односторонняя связь по X. Прижим

ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Рабочее состояние.



АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 19 Нагрузки на опоры. Односторонняя связь по X. Прижим

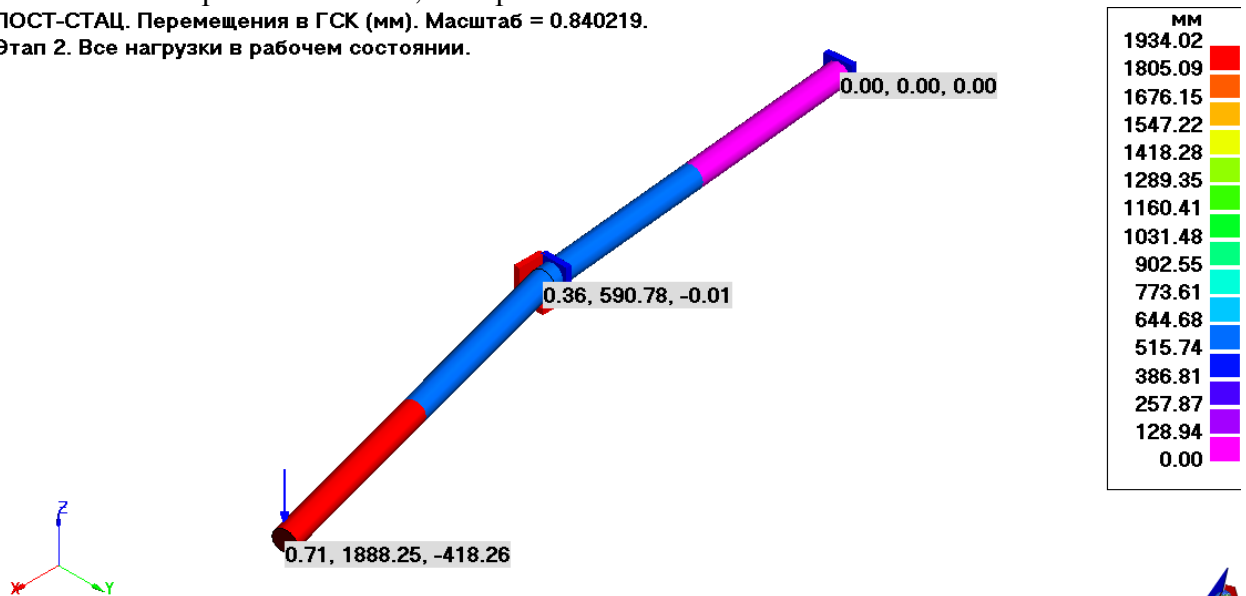
Тест 4. Односторонняя по X,Y,Z

Модель: one_supp_separat_XYZ_nst.anp

На консольном конце трубы задаются силы $F_x = 100$ кН, $F_y = 100$ кН, $F_z = -100$ кН для обеспечения отрыва по осям X, Y и прижатия по оси Z.

ПОСТ-СТАЦ. Перемещения в ГСК (мм). Масштаб = 0.840219.

Этап 2. Все нагрузки в рабочем состоянии.



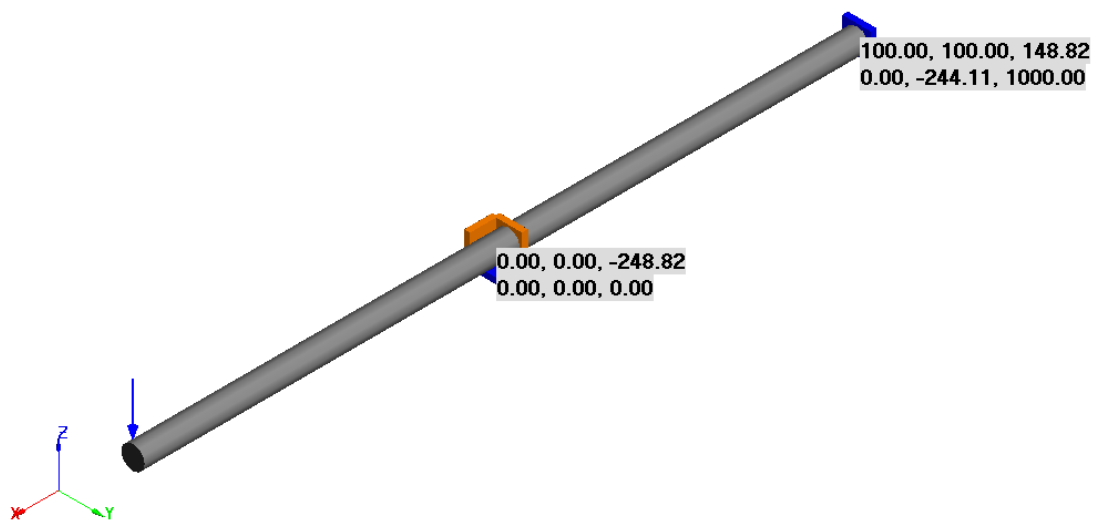
АСТРА-АЭС'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 20 Перемещения. Односторонние связи по XYZ

ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).

Рабочее состояние.

Предупреждения
Отрыв от опоры



АСТРА-АЭС'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 21 Нагрузки на опору. Односторонние связи по XYZ

Заключение

На примерах с одной нестандартной опорой показана корректность учета отрывов (нагрузки на опору при отрыве нулевые, перемещения как в схеме без опоры) в односторонних связях.

2.1.2. Зазоры

Рассматривается элементарная схема: консольная труба с нестандартной опорой в середине. В опоре задаются зазоры в различных направлениях. На свободный конец трубы прикладывается сила $P = 1$ кН. Собственный вес трубы и трение в опоре не учитываются.

Тест 1. Зазор по Y

Модель: one_supp_gap_Y_nst.anp

Исходный трубопровод

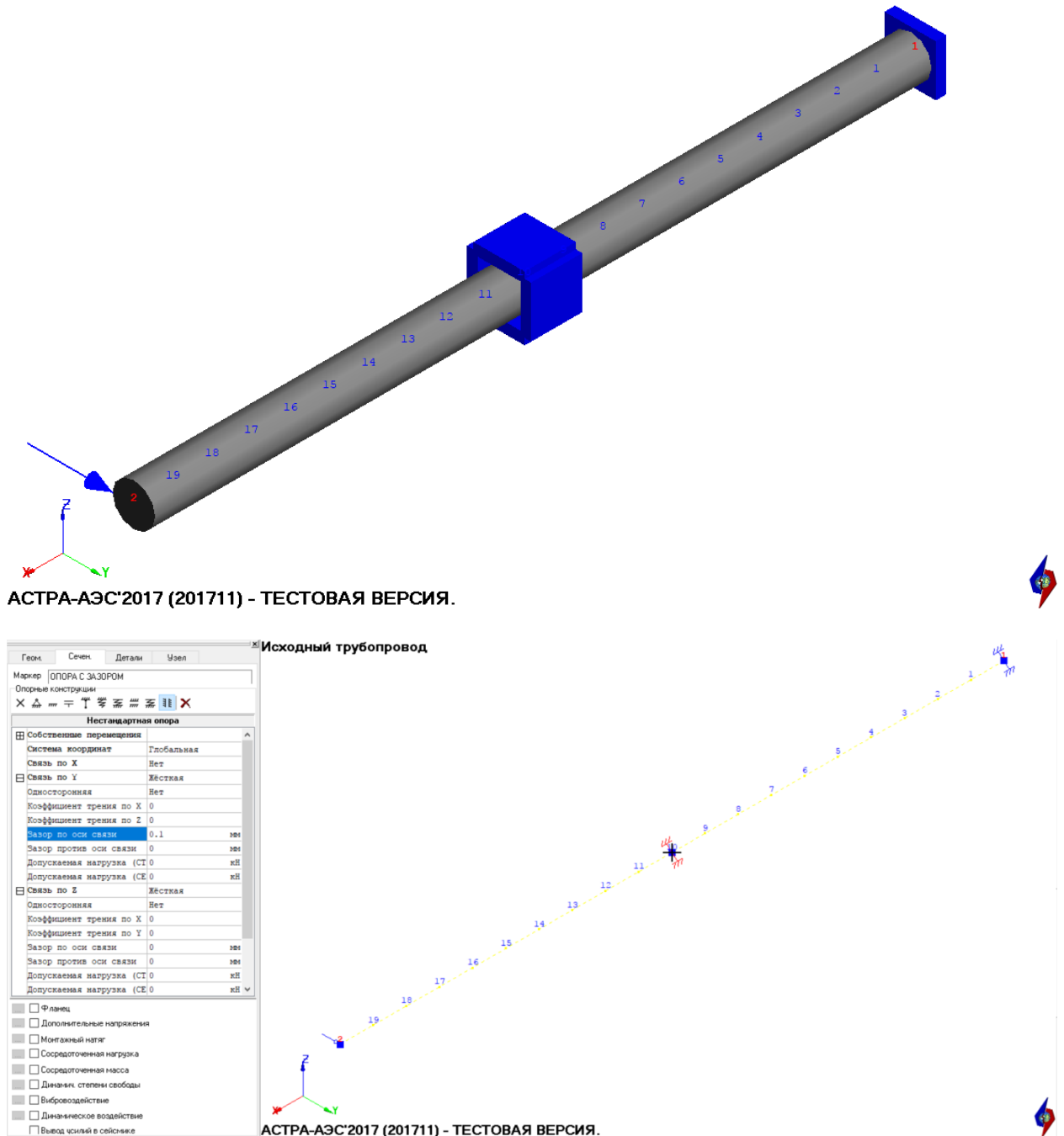
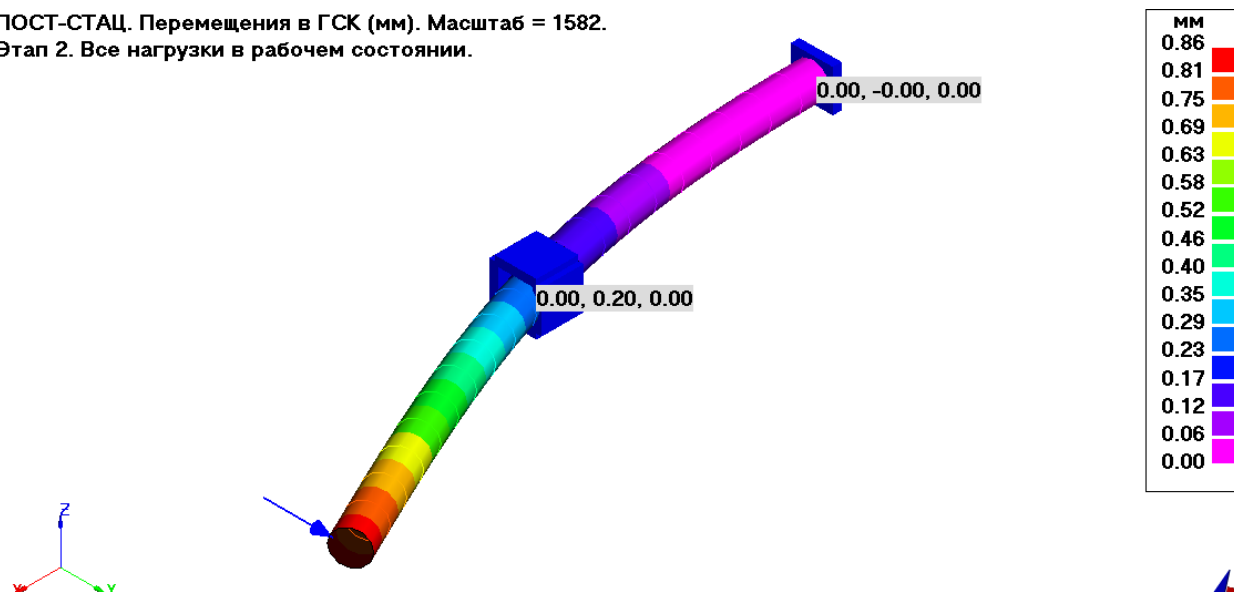


Рис. 22 Тестовый пример

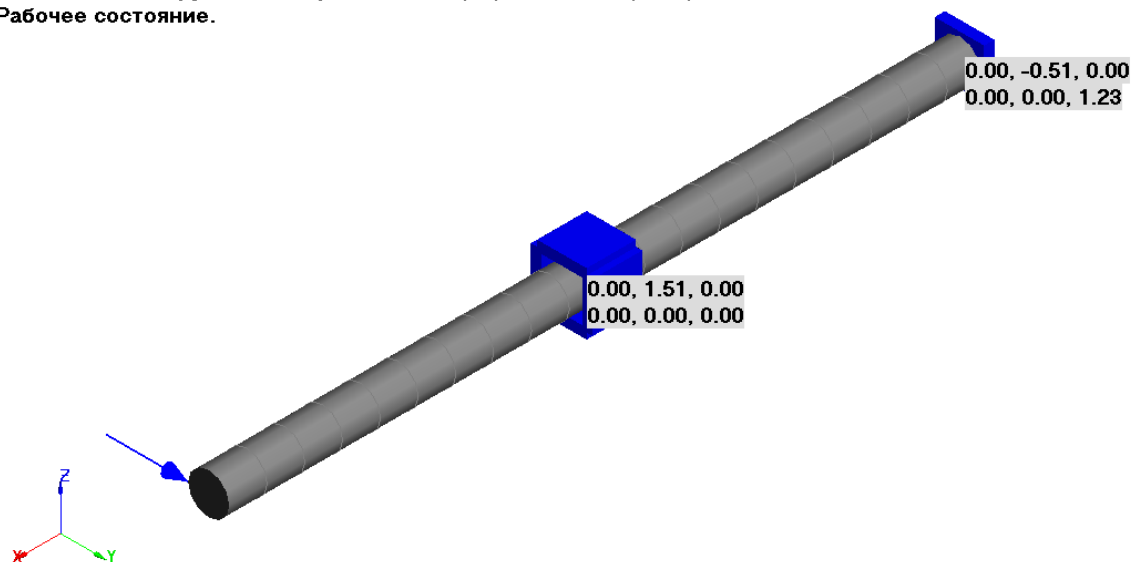
ПОСТ-СТАЦ. Перемещения в ГСК (мм). Масштаб = 1582.
Этап 2. Все нагрузки в рабочем состоянии.



АСТРА-АЭС'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 23 Перемещения на этапе 2. Зазор 0.2 мм в направлении связи

ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Рабочее состояние.



АСТРА-АЭС'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 24 Нагрузки на опоры. Зазор 0.2 мм в направлении связи

Табл. 2 Нагрузки на опоры по оси Y. Сопоставление с ПК CAESAR

№	Величина зазора, мм	Нагрузка на опору по оси Y, кН		Δ, %
		АСТРА-НОВА	CAESAR	
1	0	2.47	2.471	0.04
2	0.1	1.99	1.981	0.45
3	0.2	1.51	1.491	1.27
4	0.3	1.03	1.001	2.90
5	0.4	0.54	0.511	5.68
6	0.5	0.06	0.020	
7	0.6	0.00	0.000	

Примечание. В текущей версии в холодном состоянии (на этапе 4) зазоры не учитываются.

Определены нагрузки на опору в зависимости от величины зазора (Табл. 2). Проведено сопоставление с ПК CAESAR. Полученные результаты достаточно близки.

Заключение

На примере с одной нестандартной опорой показана корректность учета зазоров – при перекрытии зазора перемещения равны величине зазора, с увеличением величины зазора нагрузка на опору снижается.

2.2. Схема с несколькими опорами

Рассматривается схема, содержащая 2 неподвижные опоры и 4 односторонние (Рис. 25).

Вес материала задан нулевым. К концу трубы прикладывается сосредоточенная сила величиной 10 кН.

Тест 1. Односторонние опоры по Z

Модель: multi_supp_separat_Z_nst.anp

Рассматриваются варианты моделирования односторонних связей по вертикальной оси Z с помощью опор скольжения и нестандартных опор. Результаты по перемещениям, нагрузкам на опоры, статусам опор, а также число итераций на этапах 2 и 4 идентичны.

Исходный трубопровод

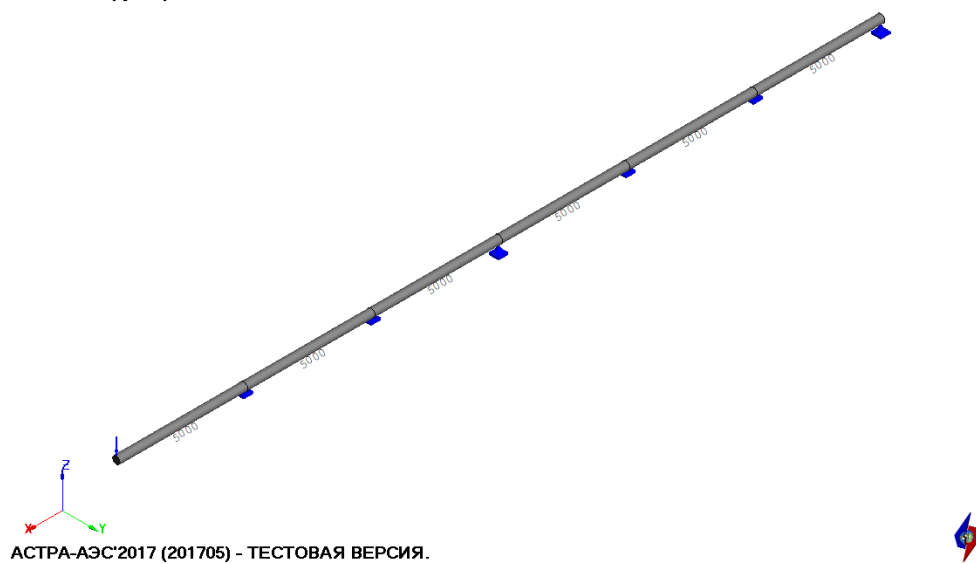
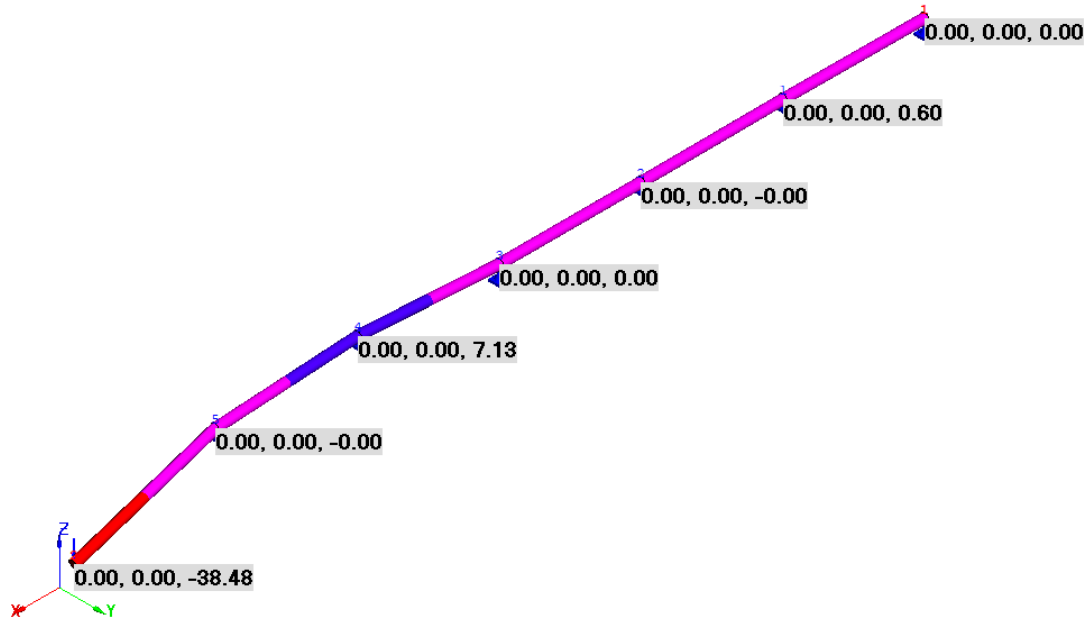


Рис. 25 Тестовая модель

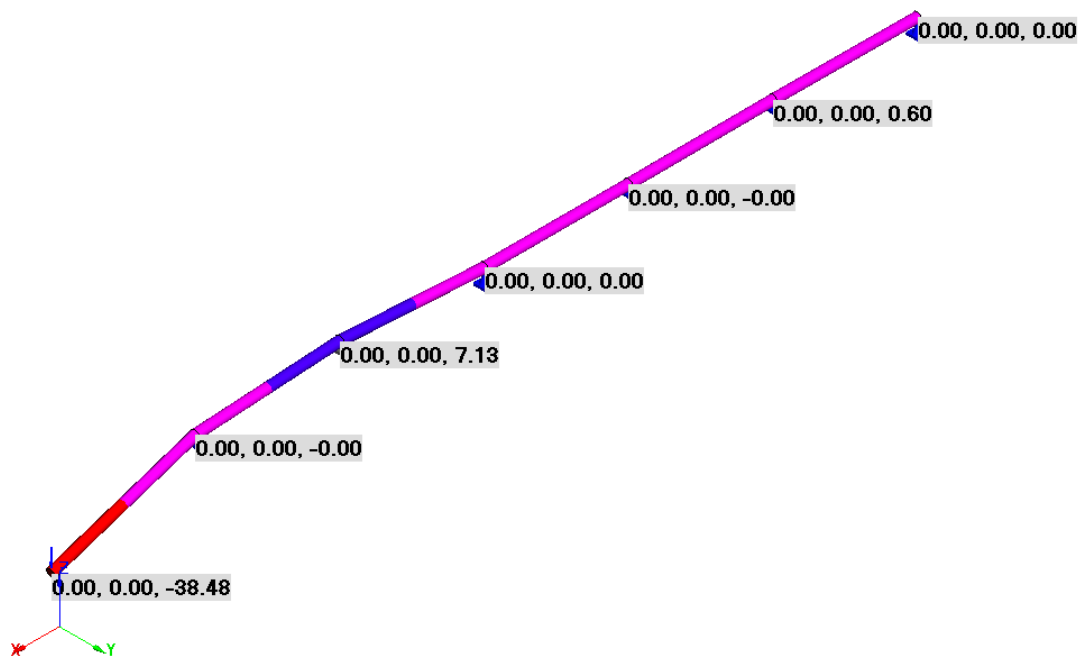
ПОСТ-СТАЦ. Перемещения в ГСК (мм). Масштаб = 43.
Этап 2. Все нагрузки в рабочем состоянии.



АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 26 Перемещения. Опоры скольжения


ПОСТ-СТАЦ. Перемещения в ГСК (мм). Масштаб = 43.
Этап 2. Все нагрузки в рабочем состоянии.

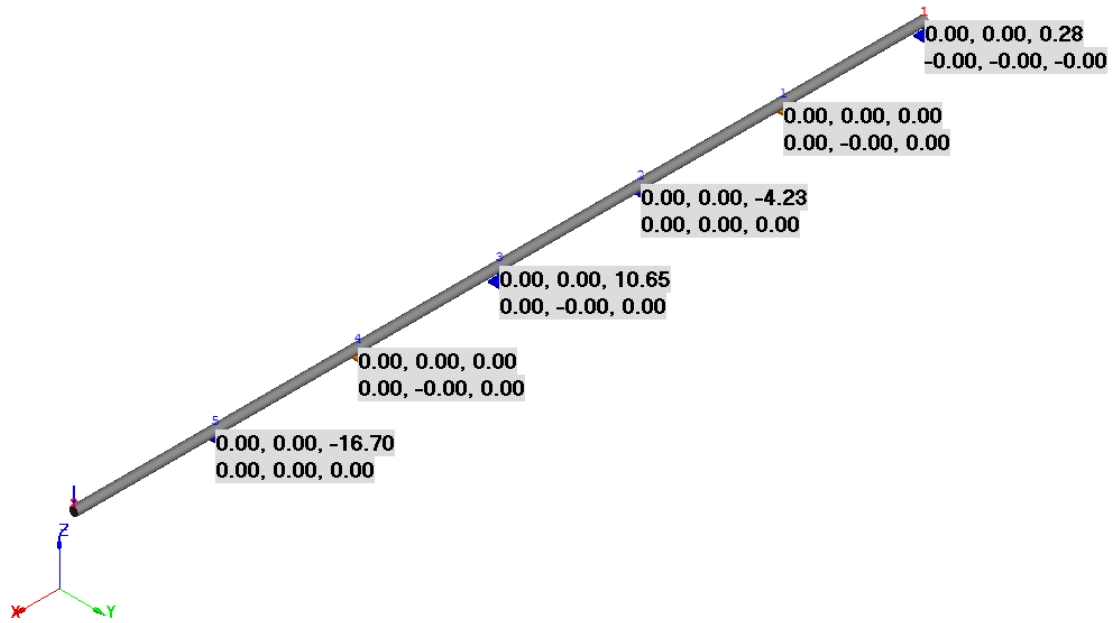


АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 27 Перемещения. Нестандартные опоры

ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Рабочее состояние.


Предупреждения
Отрыв от опоры 

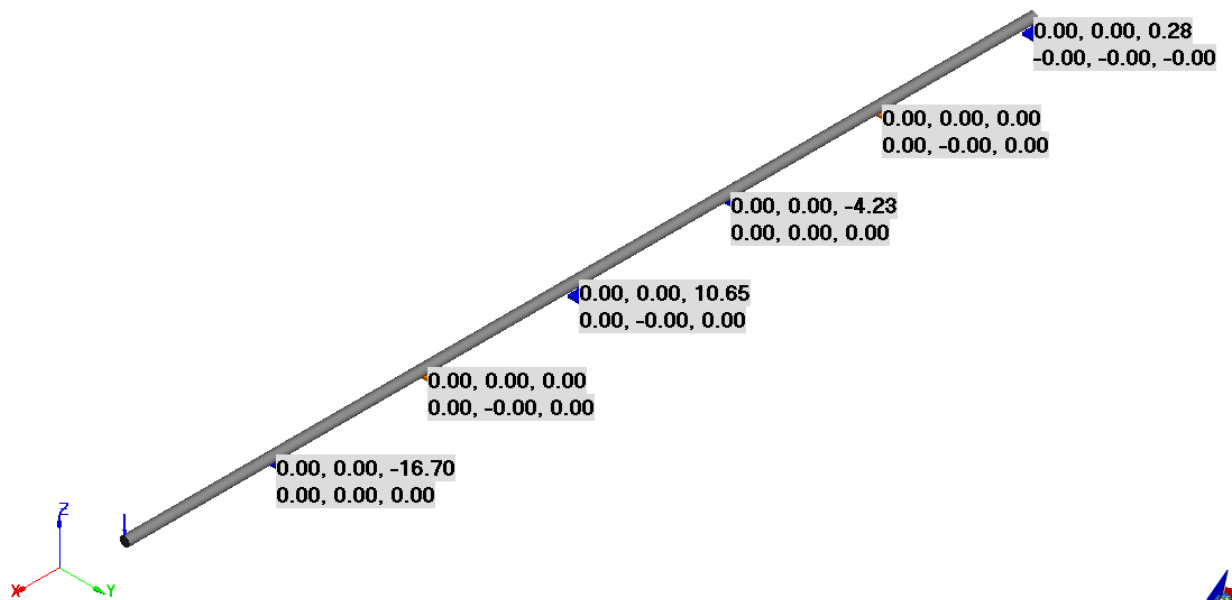


АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 28 Нагрузки на опоры. Опоры скольжения

ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Рабочее состояние.

Предупреждения
Отрыв от опоры 



АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 29 Нагрузки на опоры. Нестандартные опоры

Протокол расчета:

Расчет низкотемпературный, учет трения: Гипрокаучук

Ввод _____
Время счета - 0.13 сек
Этап 1 _____
Начало 16 час 39 мин 9.26 сек
Время счета - 0.00 сек
Этап 2б _____
Начало 16 час 39 мин 9.26 сек
Время счета - 0.00 сек
Число итераций 4
Этап 1 _____
Начало 16 час 39 мин 9.28 сек
Время счета - 0.00 сек
Этап 4 _____
Начало 16 час 39 мин 9.28 сек
Время счета - 0.00 сек
Число итераций 5
Этап 3 _____
Время счета - 0.00 сек
Расчет завершен _____
Время окончания - 16 час 39 мин 9.32 сек
Время счета - 0.19 сек

Протокол сходимости:

ЭТАП 2

Итерация №1 Этап 2

Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(1). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(1). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).

Итерация №2 Этап 2

Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(2). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).

Итерация №3 Этап 2

Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(1). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(3). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).

Итерация №4 Этап 2

Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(2). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(4). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).

ЭТАП 4

Итерация №1 Этап 4

Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(1). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(1). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).

Итерация №2 Этап 4

Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(2). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).

Итерация №3 Этап 4

Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(1). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(3). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).

Итерация №4 Этап 4

Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(2). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(4). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).

Итерация №5 Этап 4

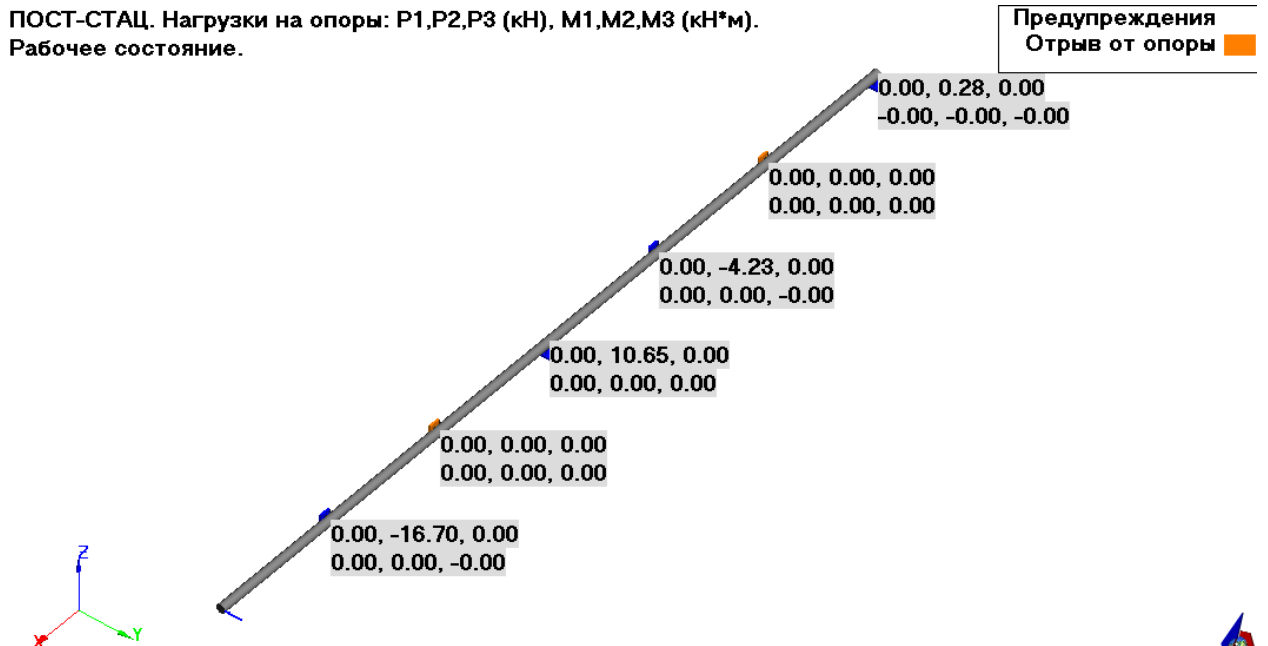
Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(3). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UZ(5). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).

Тест 2. Односторонние опоры по Y

модель: multi_supp_separat_Y_nst.anp

Рассматривался пример аналогичный предыдущему, но с односторонними опорами по оси Y. Полученные результаты идентичны предыдущему примеру с поправкой на направление.

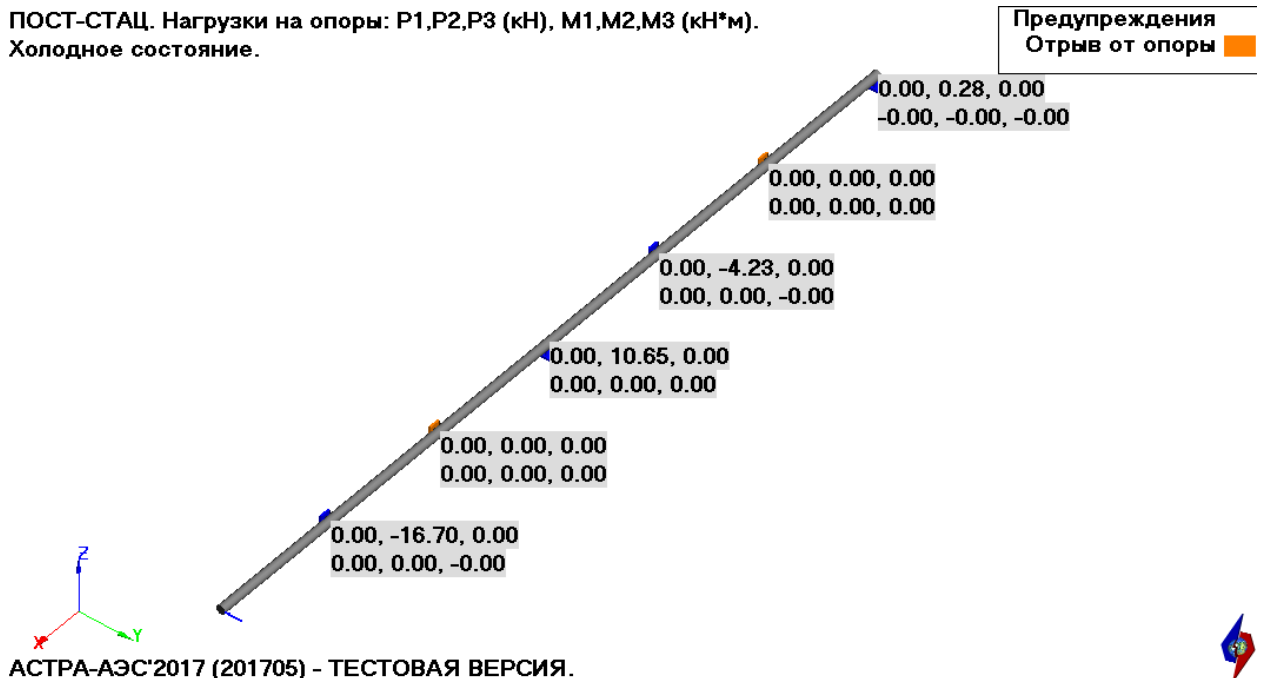
ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Рабочее состояние.



АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 30 Нагрузки на опоры в рабочем состоянии. Нестандартные опоры

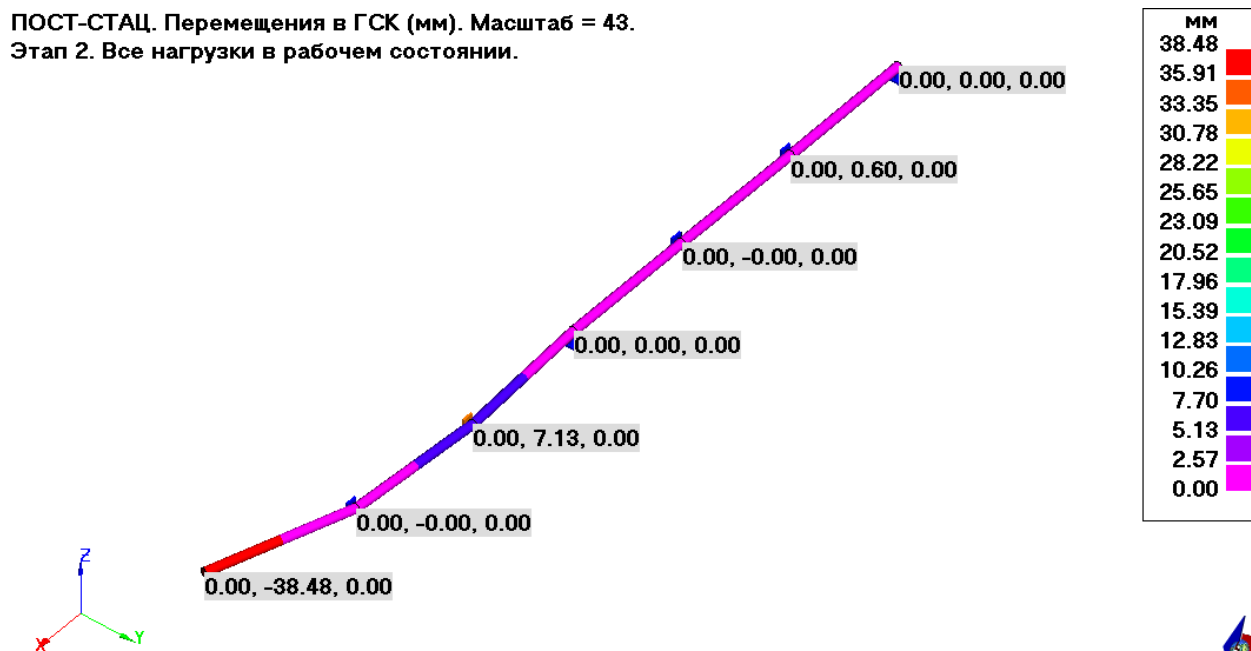
ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Холодное состояние.



АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 31 Нагрузки на опоры в холодном состоянии. Нестандартные опоры

ПОСТ-СТАЦ. Перемещения в ГСК (мм). Масштаб = 43.
Этап 2. Все нагрузки в рабочем состоянии.



АСТРА-АЭС'2017 (201705) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 32 Перемещения. Нестандартные опоры

Тест 3. Односторонние опоры по Y с зазором

модель: multi_supp_separat_gap_Y_nst.anp

Рассматривался вариант задания зазора величиной 40мм в односторонней опоре в сечении 5.

Для данной схемы происходит снижение нагрузки на опору в сечении 5 и прижим соседней опоры.

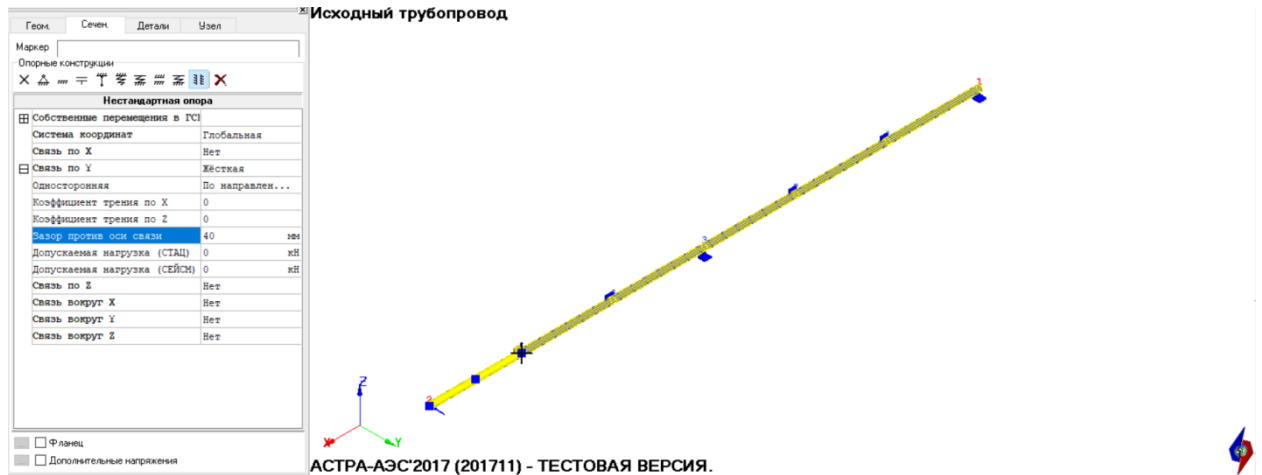


Рис. 33 Тестовая схема

ПОСТ-СТАЦ. Перемещения в ГСК (мм). Масштаб = 14.
Этап 2. Все нагрузки в рабочем состоянии.

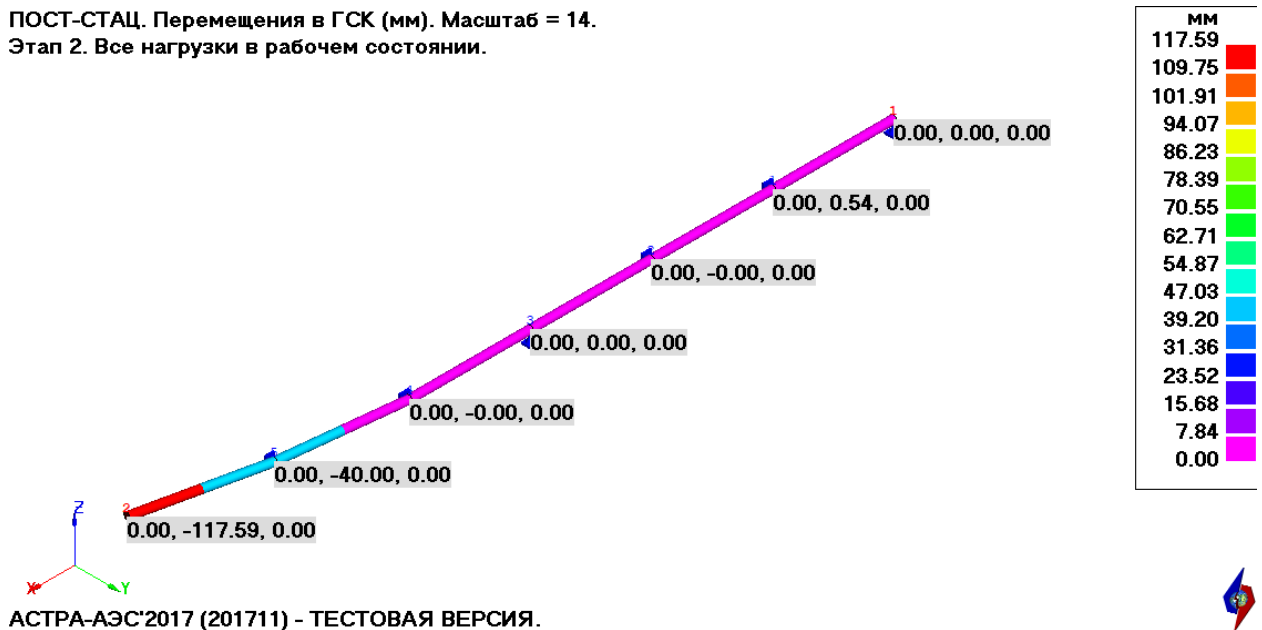
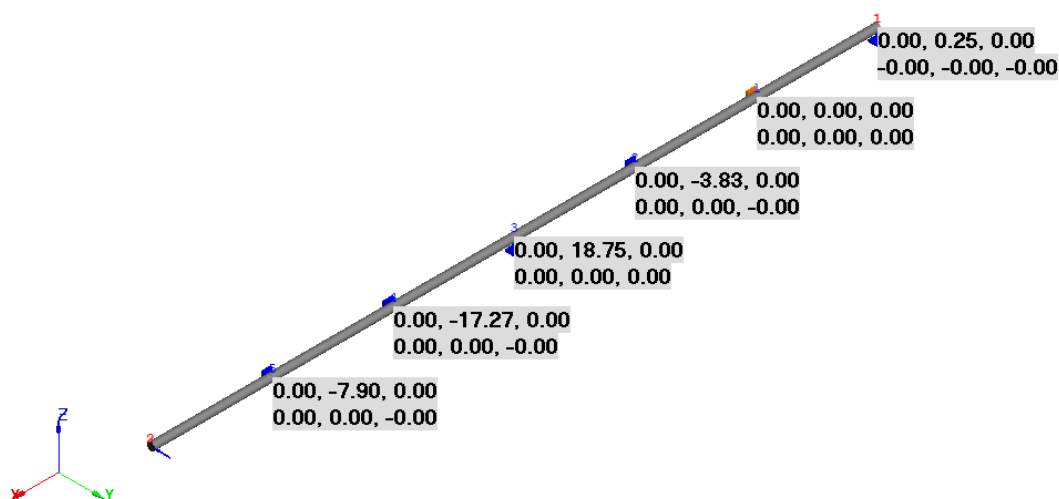


Рис. 34 Перемещения на этапе 2. Нестандартные опоры

ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Рабочее состояние.

Предупреждения
Отрыв от опоры



АСТРА-АЭС'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 35 Нагрузки на опоры на этапе 2. Нестандартные опоры

Протокол сходимости:

ЭТАП 2

Итерация №1 Этап 2

- Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UY(1). eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
- Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) Перекр. зазоров: (UY-). eps = (0,0,0,0,0,0).

Итерация №2 Этап 2

- Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UY(2). eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
- Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) Перекр. зазоров: (UY-). eps = (0,0,0,0,0,0).

ЭТАП 4

Итерация №1 Этап 4

- Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UY(1). eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
- Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) Перекр. зазоров: (UY-). eps = (0,0,0,0,0,0).

Итерация №2 Этап 4

- Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UY(1). eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
- Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UY(1). eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) Перекр. зазоров: (UY-). eps = (0,0,0,0,0,0).

Итерация №3 Этап 4

- Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
- Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UY(2). eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) Перекр. зазоров: (UY-). eps = (0,0,0,0,0,0).

Итерация №4 Этап 4

- Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: UY(1). eps = (0,0,0,0,0,0).
- Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).

Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: УУ(3). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) Перекр. зазоров: (УУ-). eps = (0,0,0,0,0,0).
Итерация №5 Этап 4
Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: УУ(2). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: УУ(4). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) Перекр. зазоров: (УУ-). eps = (0,0,0,0,0,0).
Итерация №6 Этап 4
Опора 1, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: УУ(3). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 2, уч-к № 1 (1 - 2) eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 3, уч-к № 1 (1 - 2) Двусторонняя опора, eps = 0
Опора 4, уч-к № 1 (1 - 2) Отрыв: УУ(5). eps = (0,0,0,0,0,0).
Опора 5, уч-к № 1 (1 - 2) Перекр. зазоров: (УУ-). eps = (0,0,0,0,0,0).

Заключение

Показана корректность работы алгоритма учета отрыва/прижима в односторонних связях и зазоров при наличии в схеме нескольких нестандартных опор.

2.3. Большие схемы

2.3.1. СПиР-САОР АЭС (TEST3)

Рассматривалась схема EXAMPLES/AES/TEST3.ANP, где отдельные опоры заменялись на нестандартные. Рассмотренные варианты:

- замена опоры без отрыва на нестандартную двустороннюю и одностороннюю;
- замена опоры с отрывом на нестандартную одностороннюю.

Тест 1. Замена односторонней опоры скольжения на участке №107 (72-73) в сечении 3 на нестандартную.

Модель: TEST3_nst_supp1.anp

Результаты при замене опоры скольжения на нестандартную не изменяются.

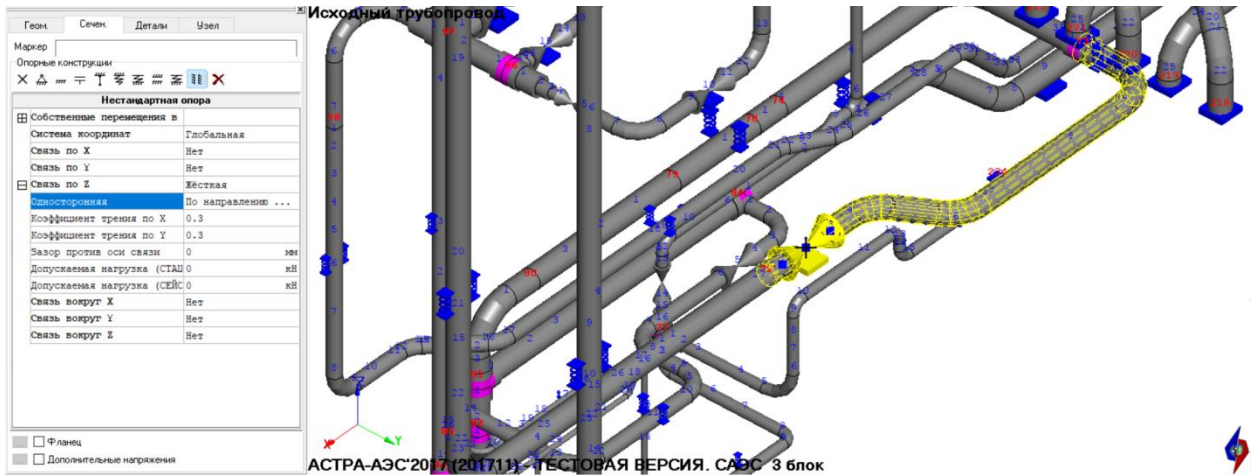


Рис. 36 Расчетная схема. Заменяемая опора

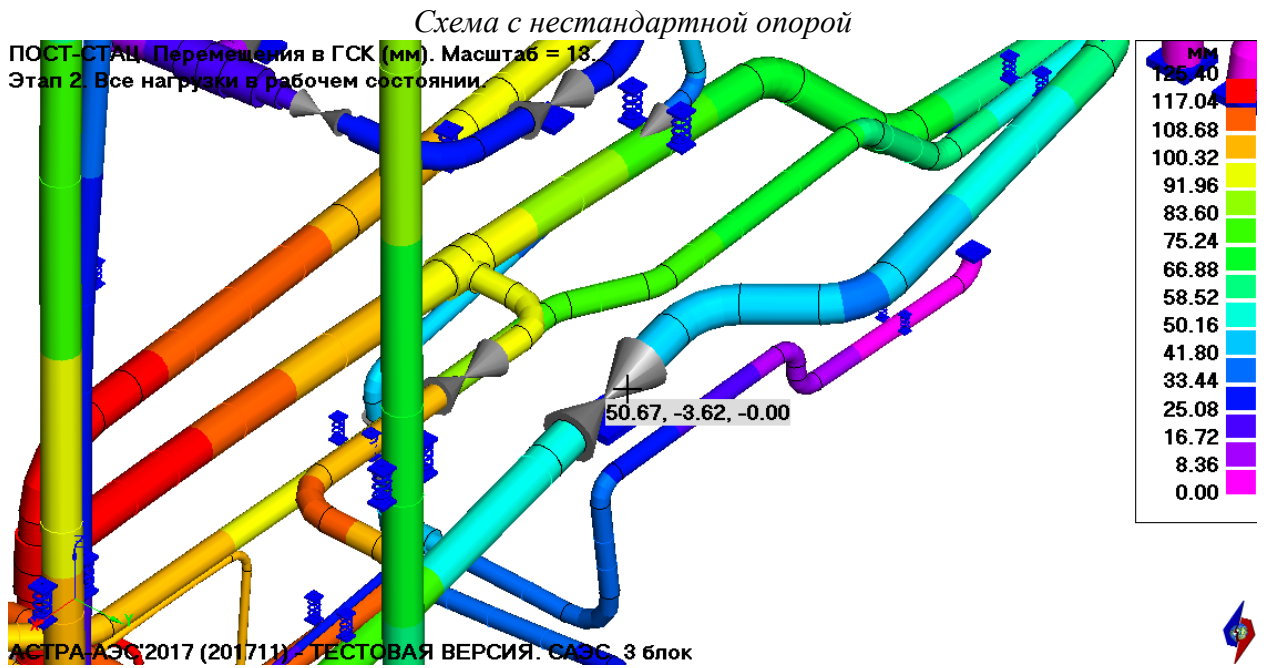
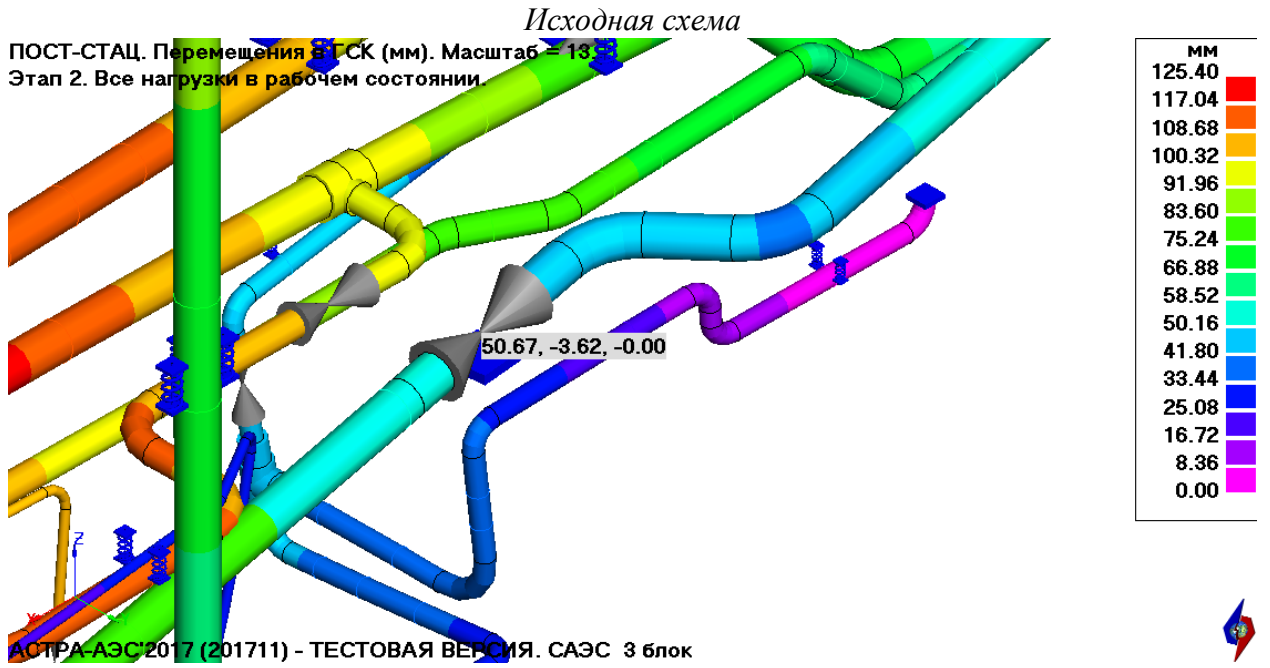


Рис. 37 Перемещения на этапе 2, мм

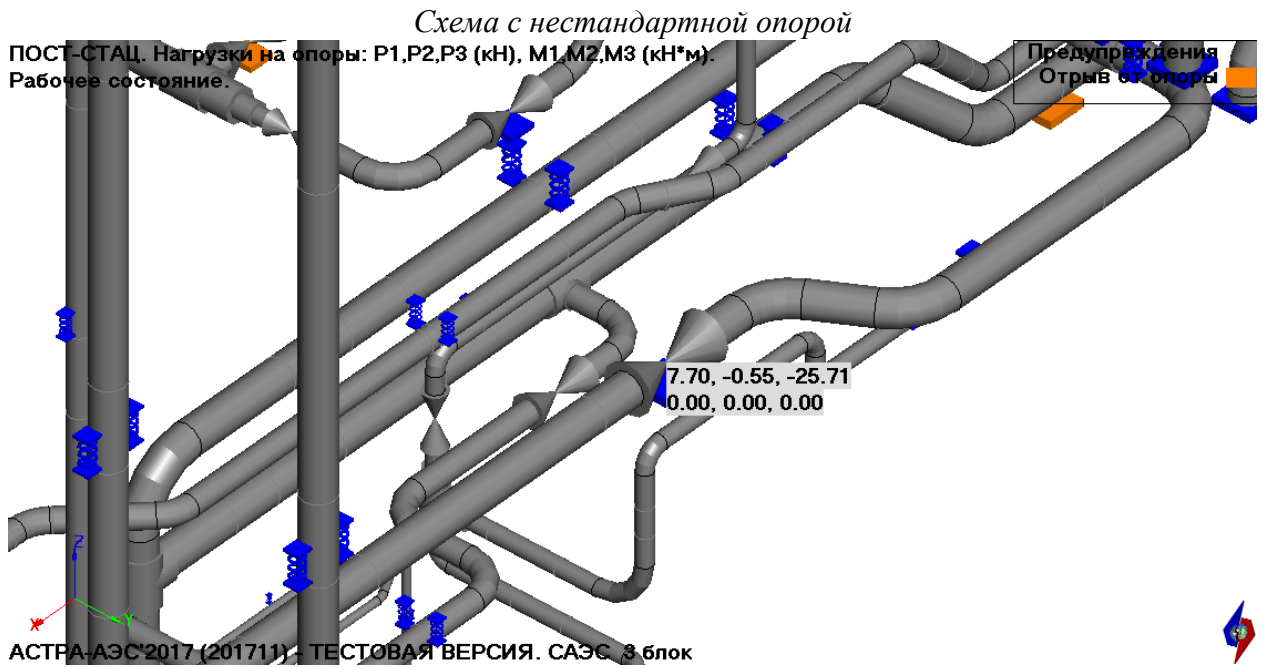
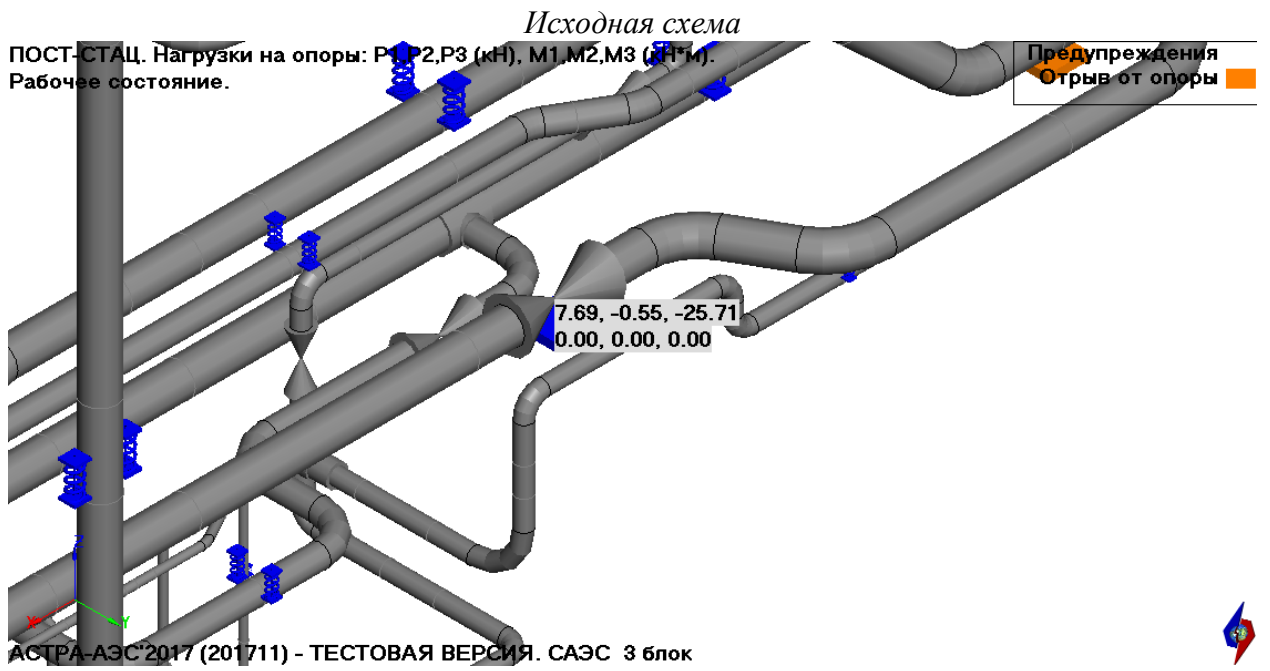


Рис. 38 Нагрузки на опору на этапе 2, кН

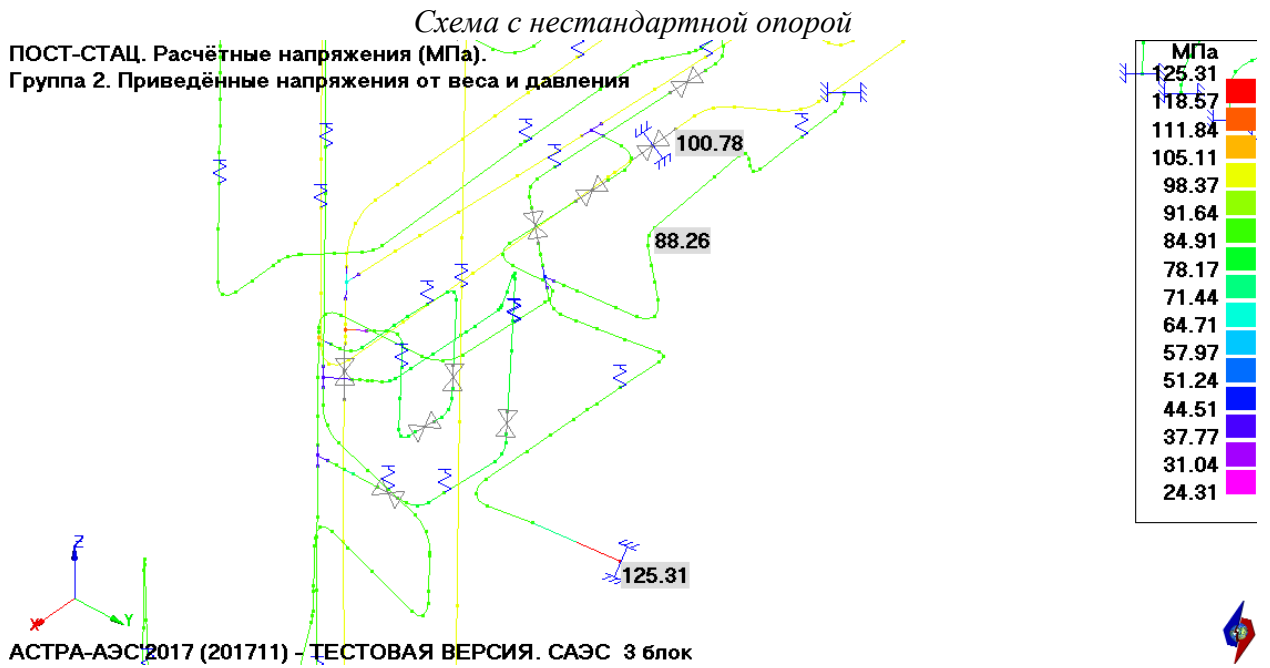
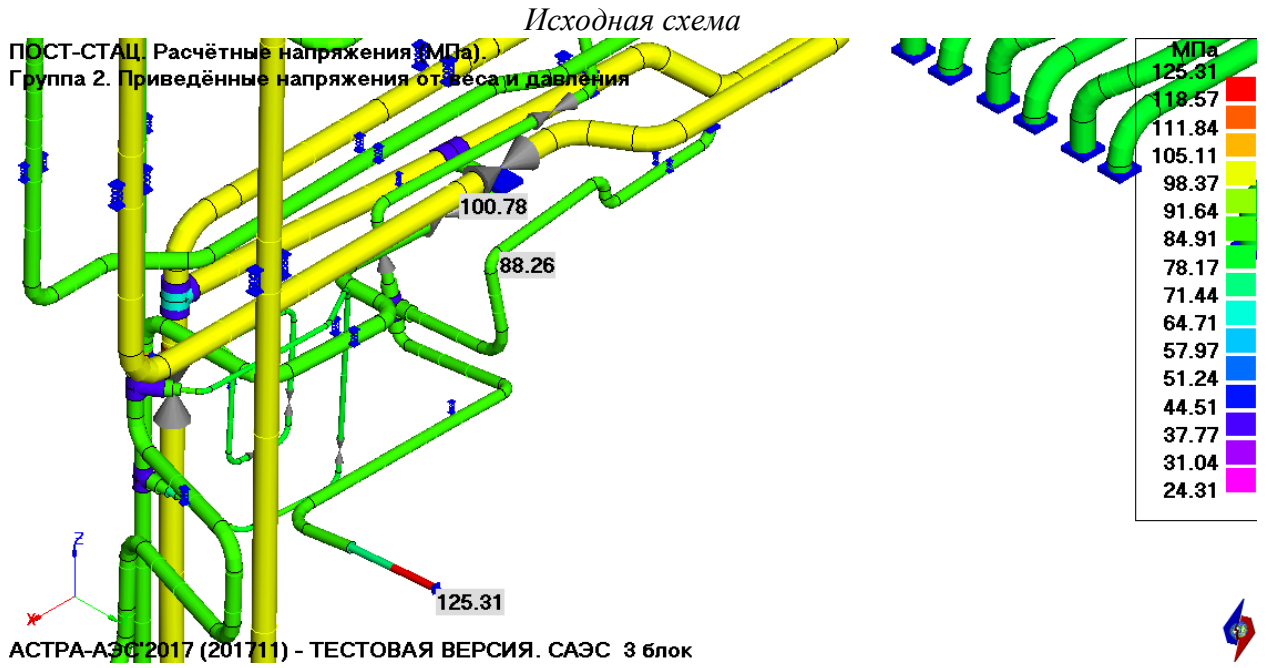


Рис. 39 Напряжения на этапе 2, МПа

Тест 2. Замена односторонней опоры скольжения на участке №118 (84-238) в сечении 9 на нестандартную

Модель: TEST3_nst_supp2.anp

Результаты при замене опоры скольжения на нестандартную не изменяются.

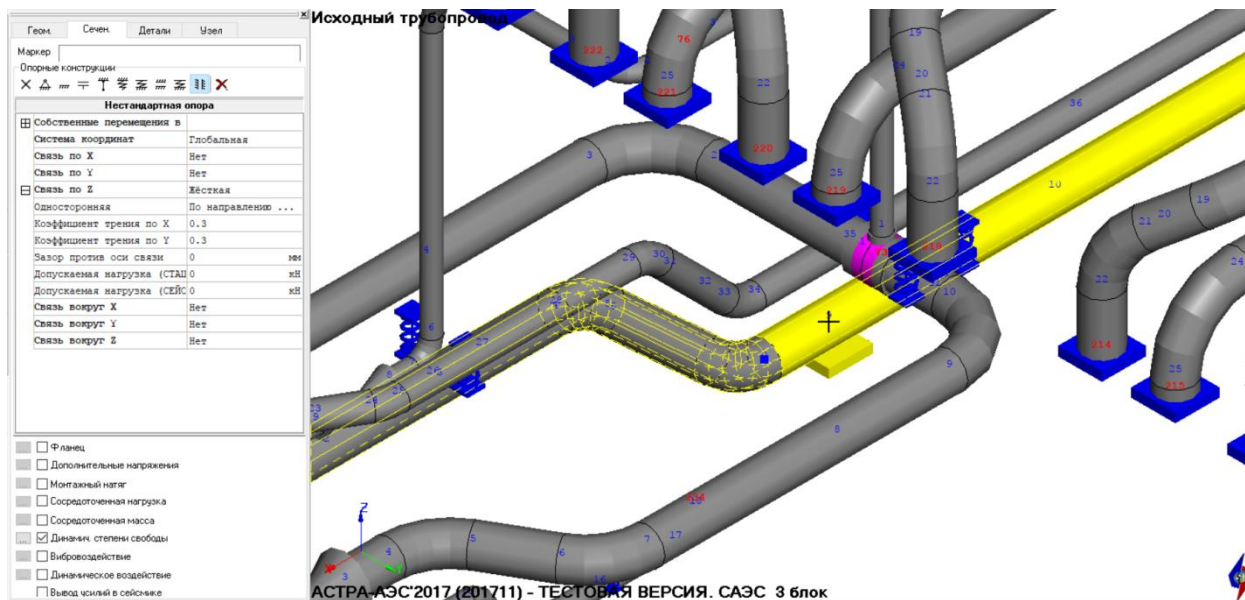


Рис. 40 Расчетная схема. Заменяемая опора

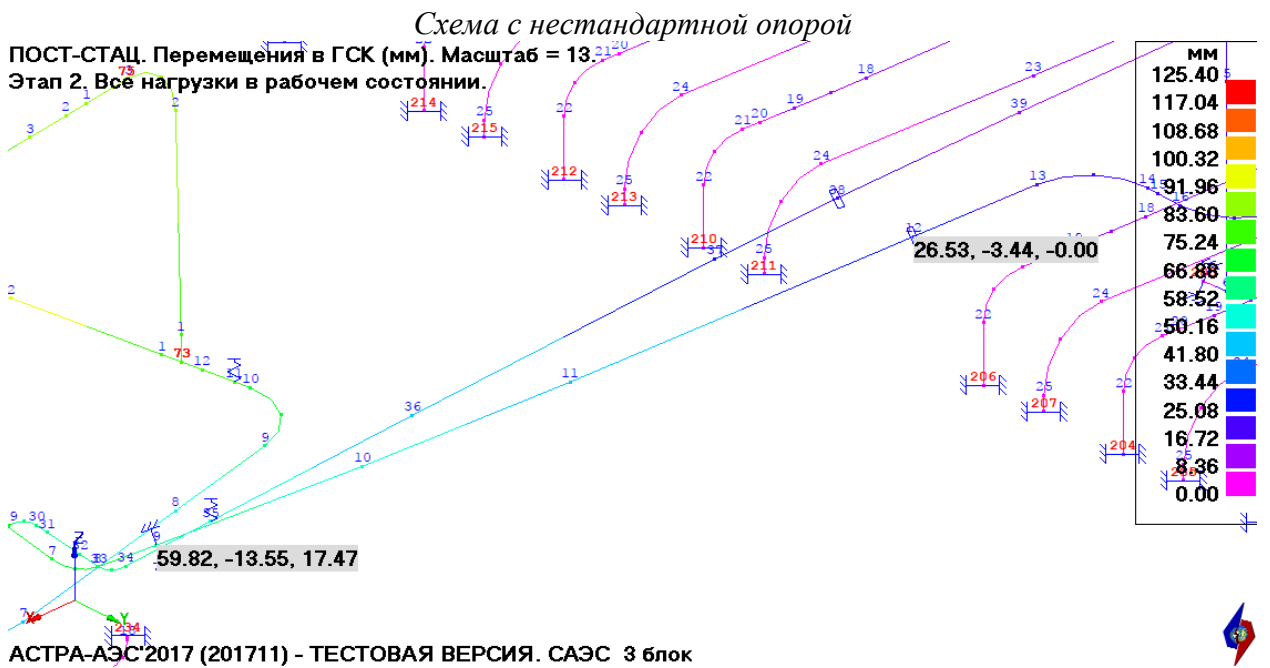


Рис. 41 Перемещения на этапе 2, мм

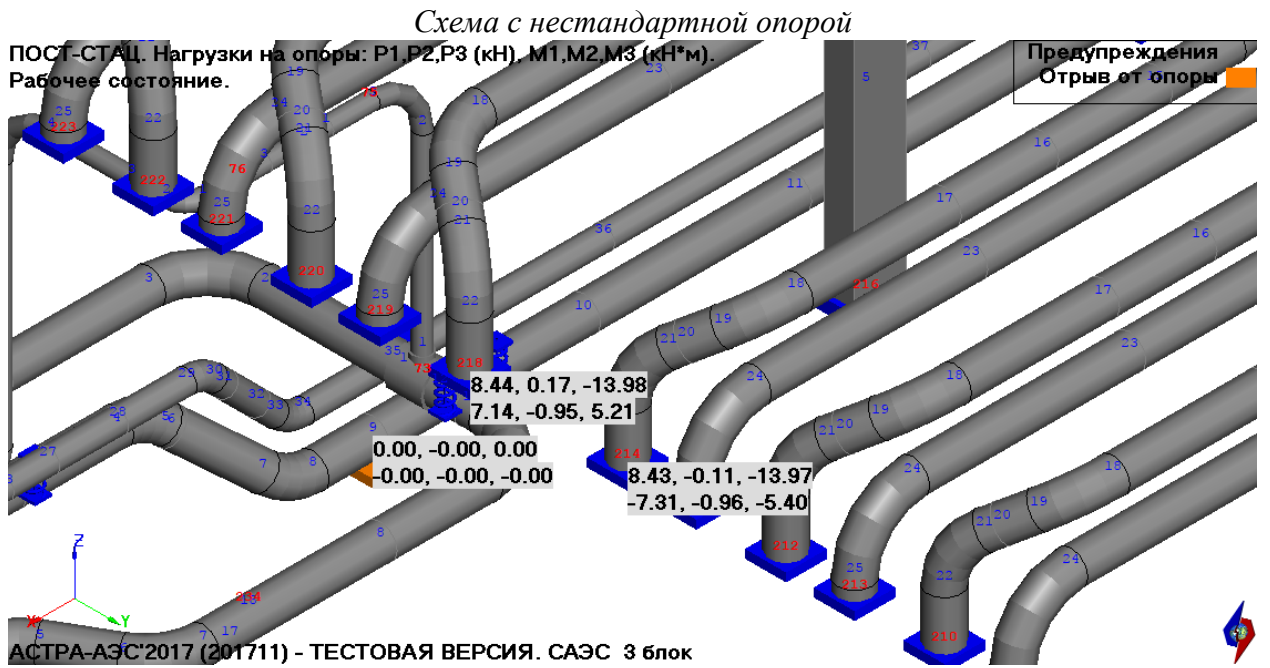
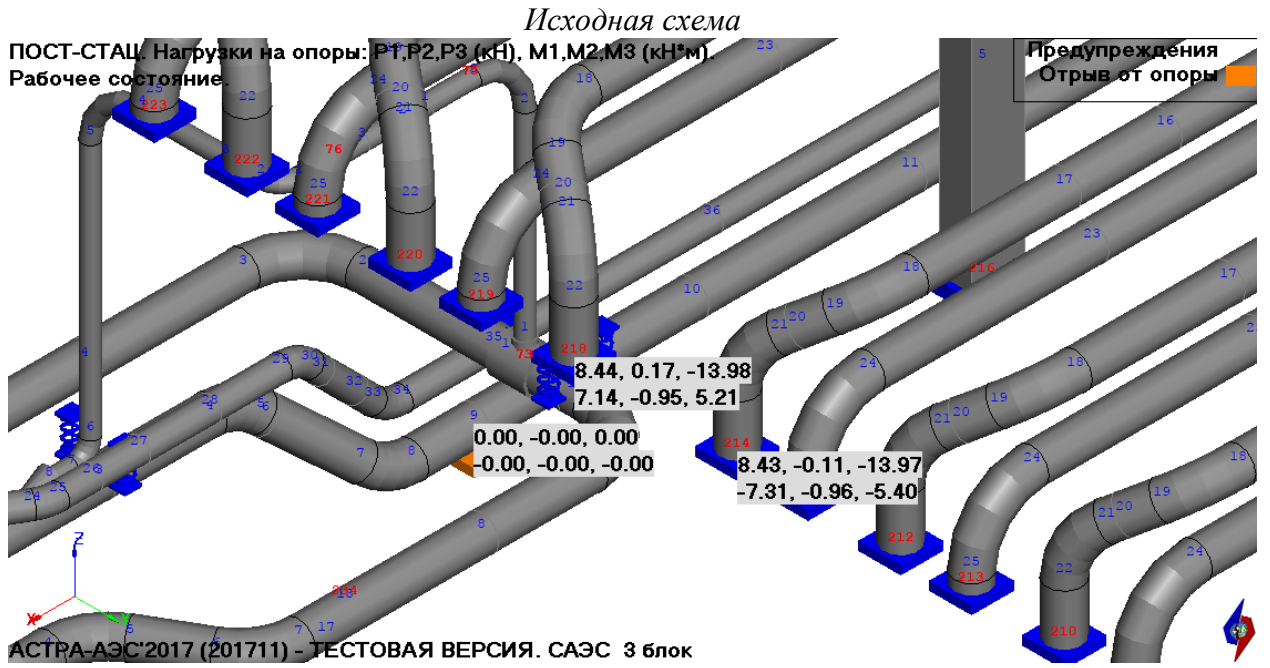


Рис. 42 Нагрузки на опоры на этапе 2, кН

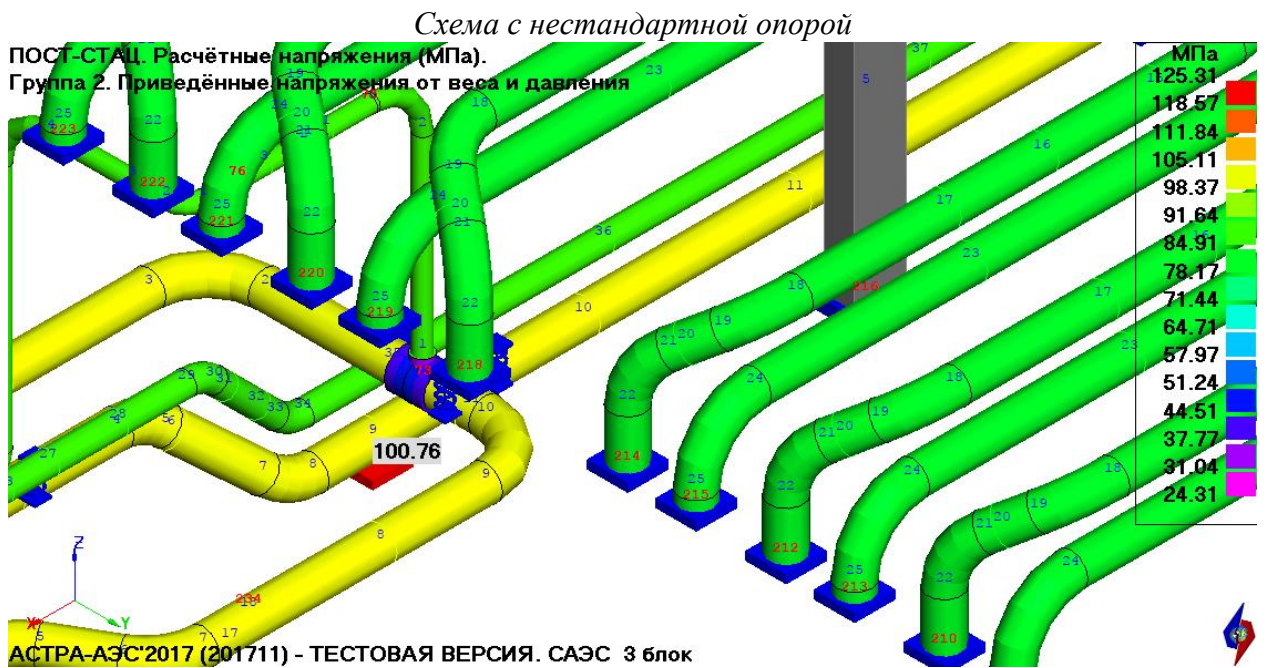
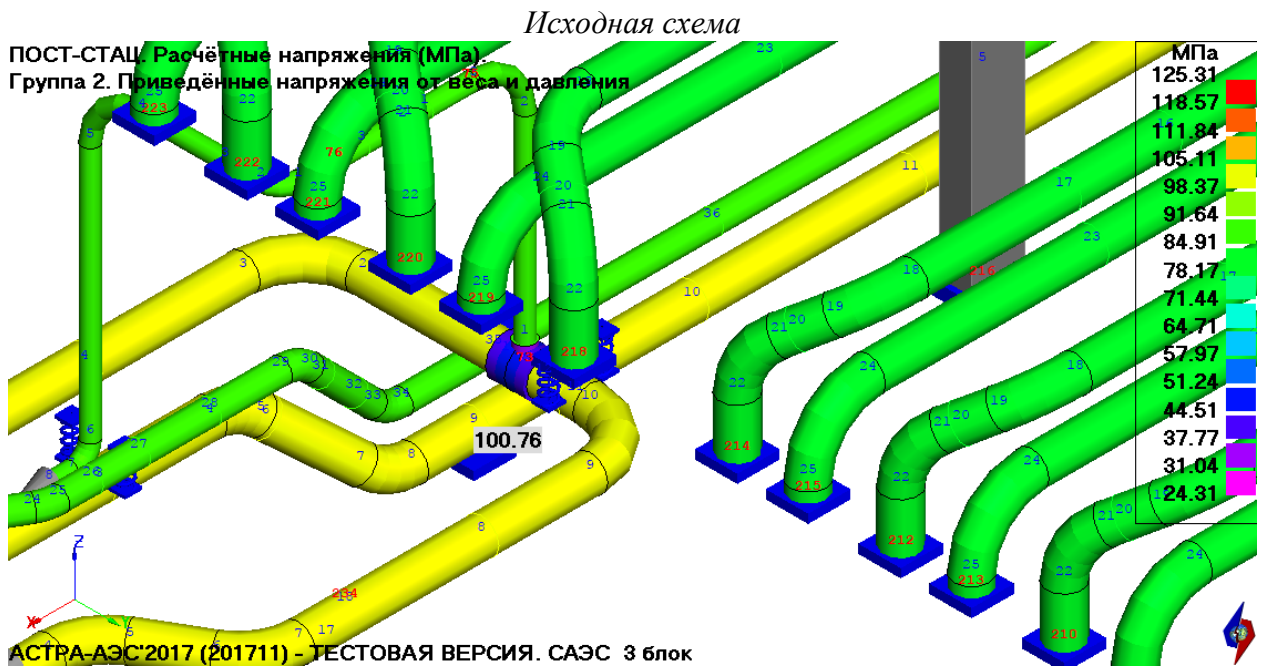


Рис. 43 Напряжения на этапе 2, МПа

Протокол расчета:

Расчет низкотемпературный, учет трения: Гипрокаучук

Ввод _____

Время счета - 0.34 сек

Этап 1 _____

Начало 18 час 30 мин 56.46 сек

Время счета - 0.06 сек

Этап 2б _____

Начало 18 час 30 мин 56.53 сек

Время счета - 2.89 сек

Число итераций 42

Этап 1 _____

Начало 18 час 30 мин 59.42 сек

Время счета - 0.07 сек

Этап 4 _____

Начало 18 час 30 мин 59.50 сек

Время счета - 1.50 сек

Число итераций 26

Этап 3 _____

Время счета - 1.59 сек

Расчет завершен _____

Время окончания - 18 час 31 мин 1.17 сек

Время счета - 5.05 сек

Заключение

На реальной схеме разветвленной ТС показана эквивалентность результатов при замене односторонних опор скольжения на нестандартные с односторонними связями по вертикальной оси.

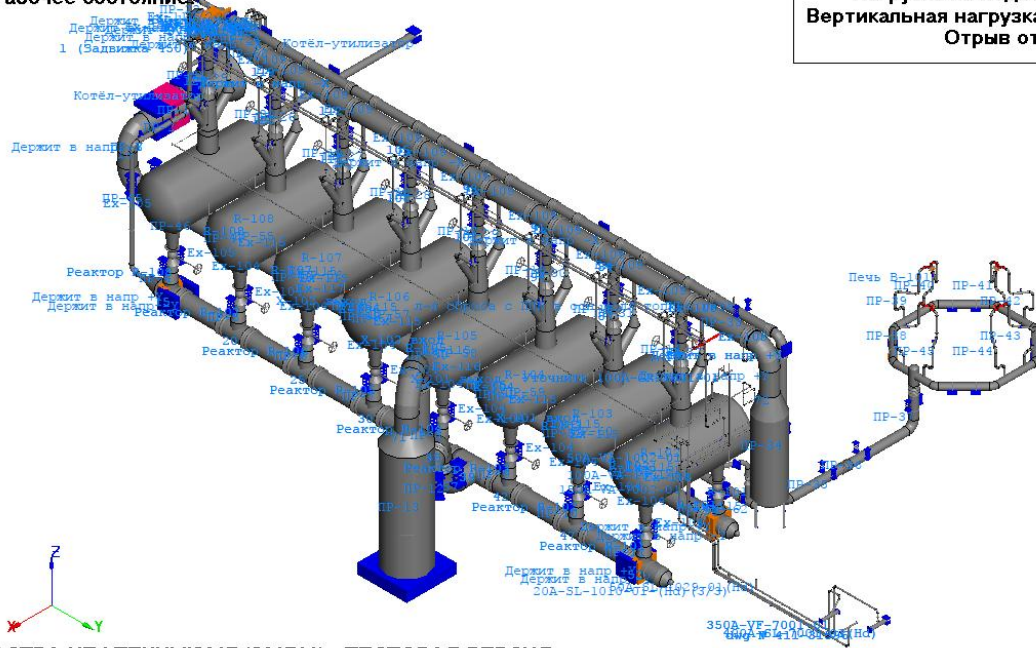
2.3.2. Система «коллекторы-реакторы» НЕФТЕХИМ (Нижекамск)

Модель: Нижекамск_нест.apr

Рассматривалась схема (Рис. 44), содержащая нестандартные опоры двух типов: односторонние по оси X в г.с.к. (Рис. 45), односторонние в направлении трубы (Рис. 46). Трубопровод рассчитывается по РТМ 38.001-94 (НЕФТЕХИМ) как высокотемпературный.

На рисунках (Рис. 50 - Рис. 53) показаны нагрузки на нестандартные опоры в рабочем и холодном состояниях. Как можно видеть, опоры типа 1 прижаты в рабочем состоянии и отрываются в холодном состоянии. Опоры типа 2 включены в работу в холодном состоянии, в рабочем состоянии в них имеет место отрыв или слабый прижим.

ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Рабочее состояние:



АСТРА-НЕФТЕХИМ'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 44 Расчетная схема

Исходный трубопровод

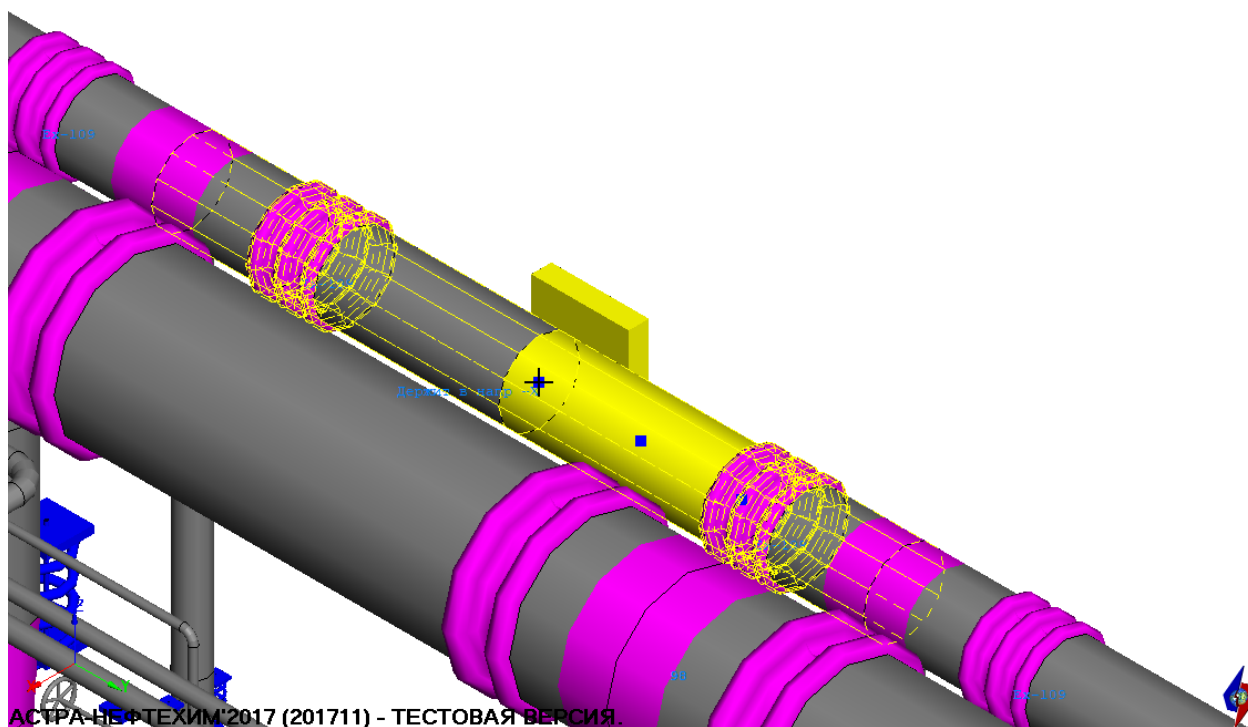


Рис. 45 Односторонние опоры типа 1

Исходный трубопровод

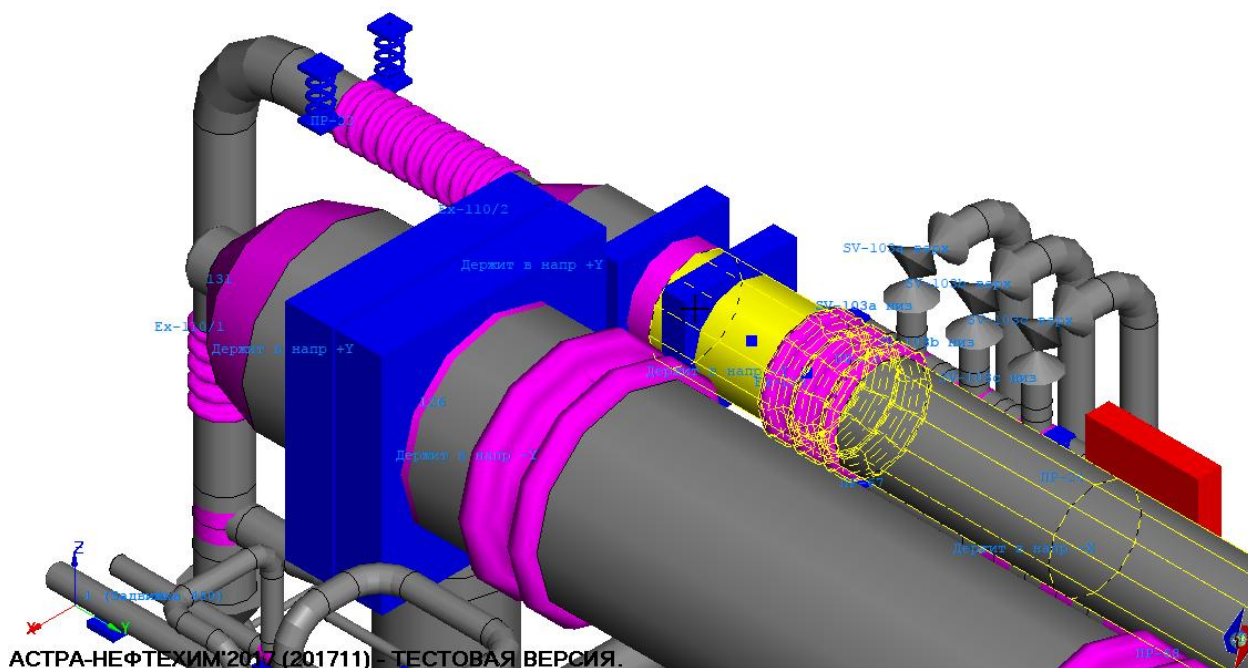


Рис. 46 Односторонние опоры типа 2

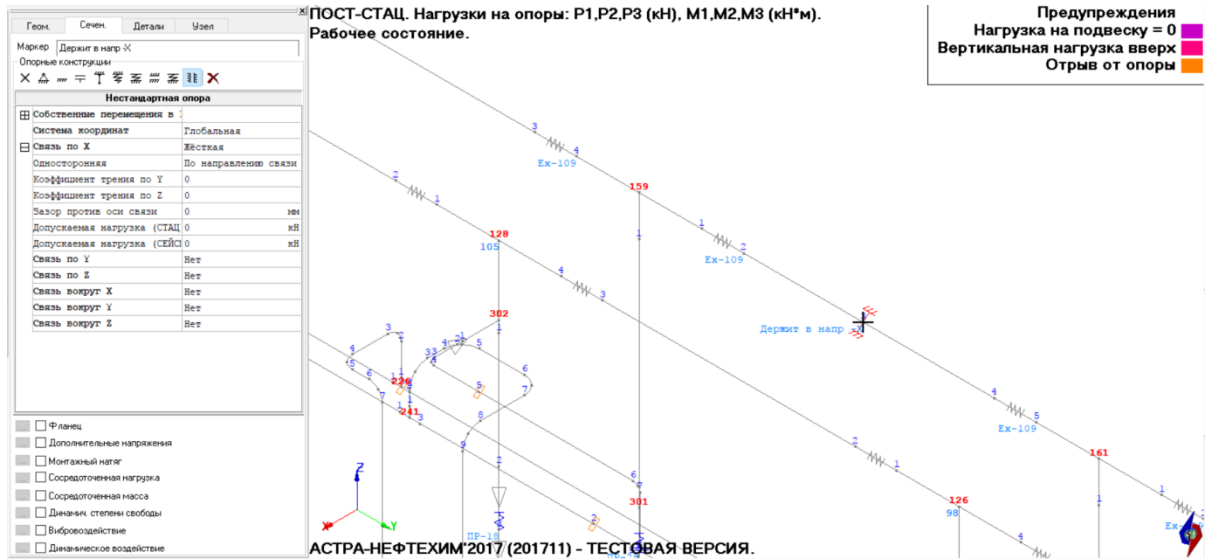


Рис. 47 Задание нестандартной опоры

Рабочая температура

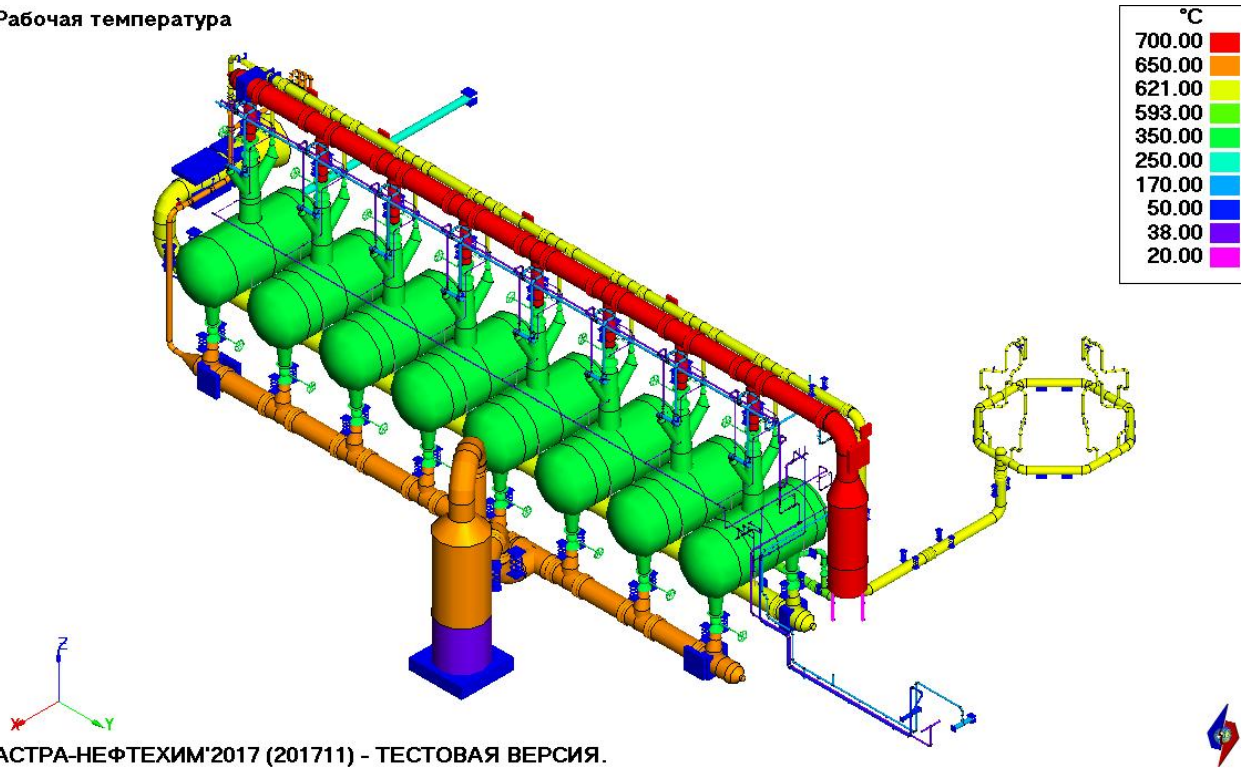


Рис. 48 Рабочая температура

Давление

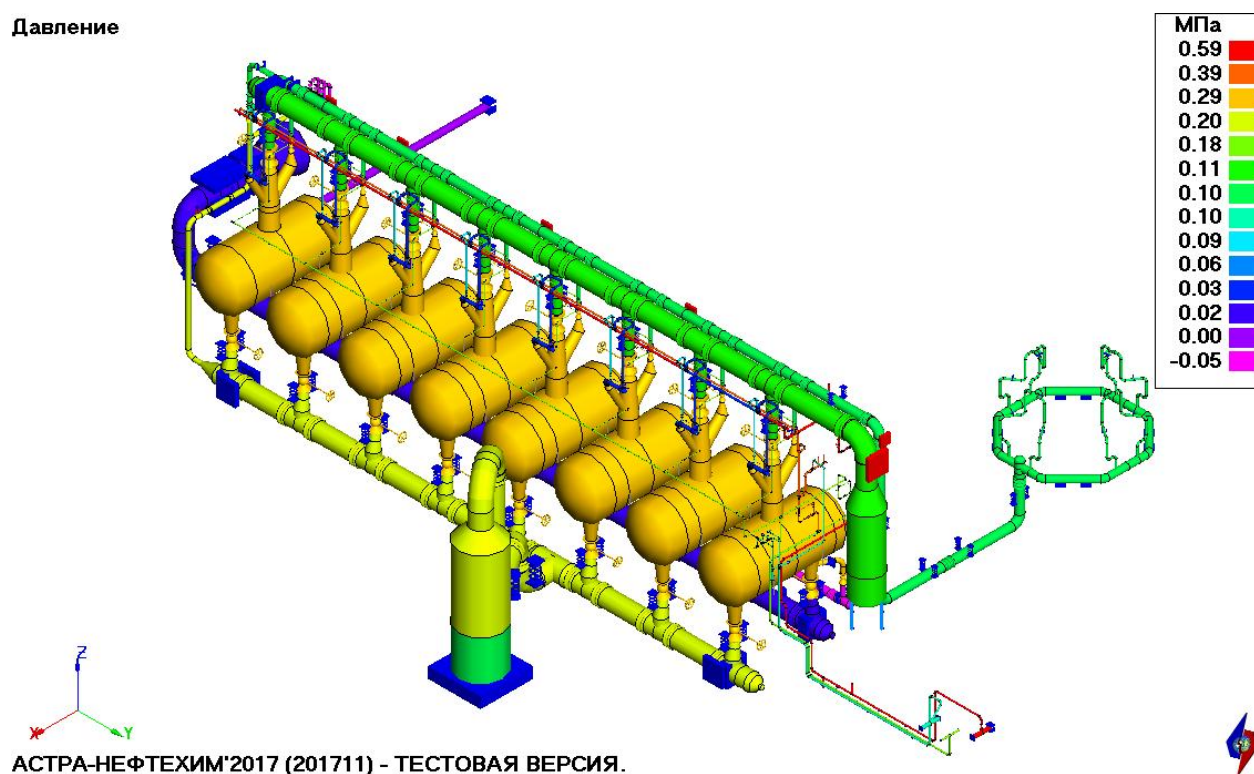


Рис. 49 Рабочее давление, МПа

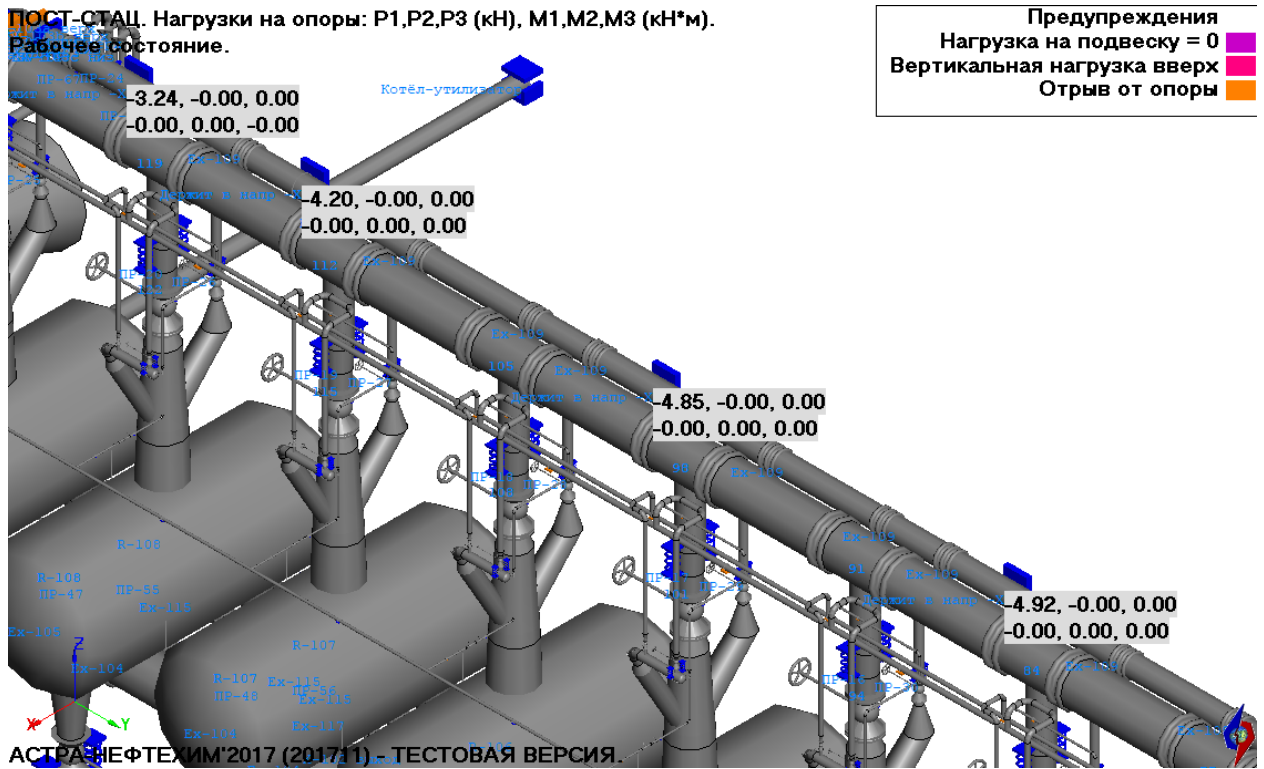


Рис. 50 Нагрузки на опоры в рабочем состоянии, кН

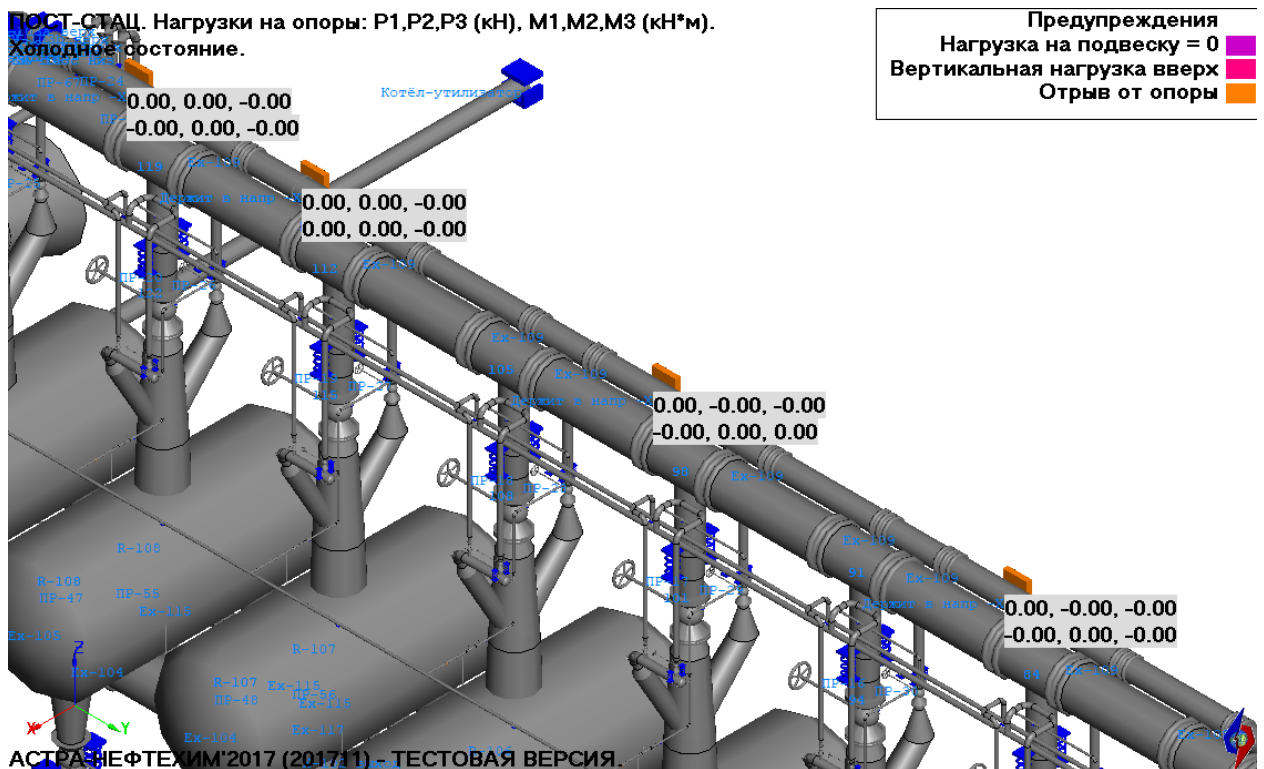
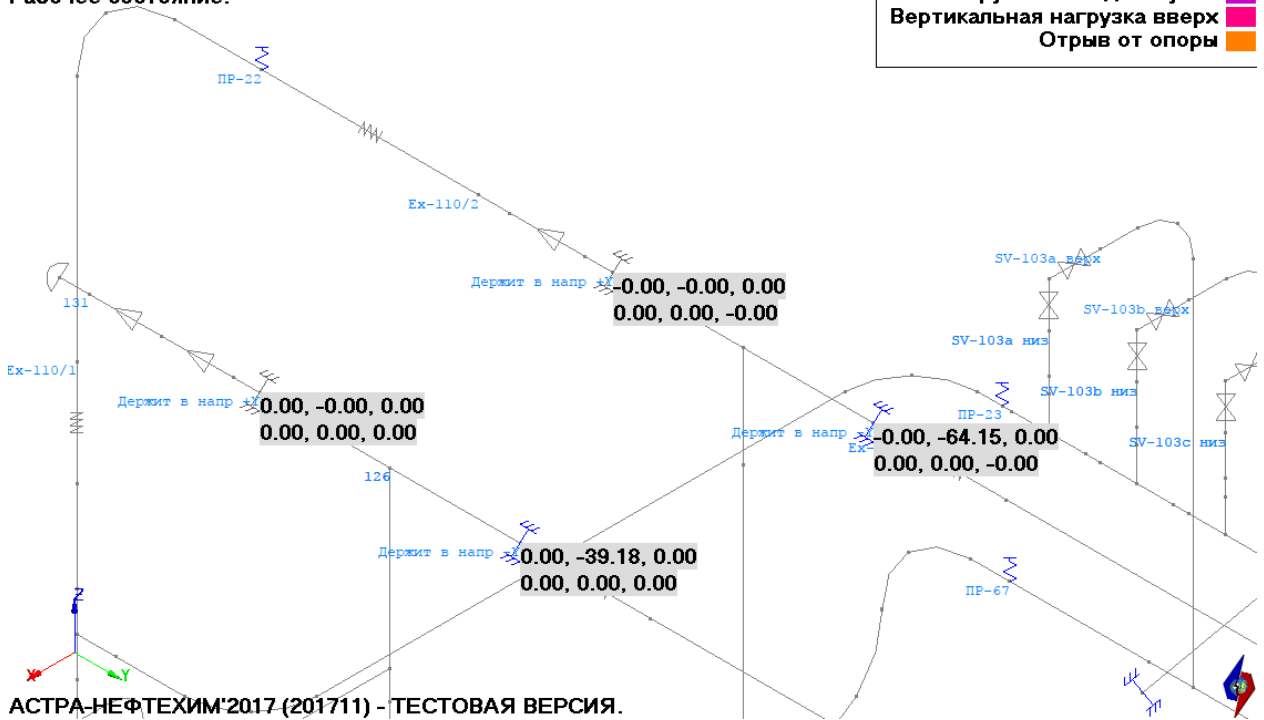


Рис. 51 Нагрузки на опоры в холодном состоянии, кН

ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Рабочее состояние.

Предупреждения
Нагрузка на подвеску = 0
Вертикальная нагрузка вверх
Отрыв от опоры

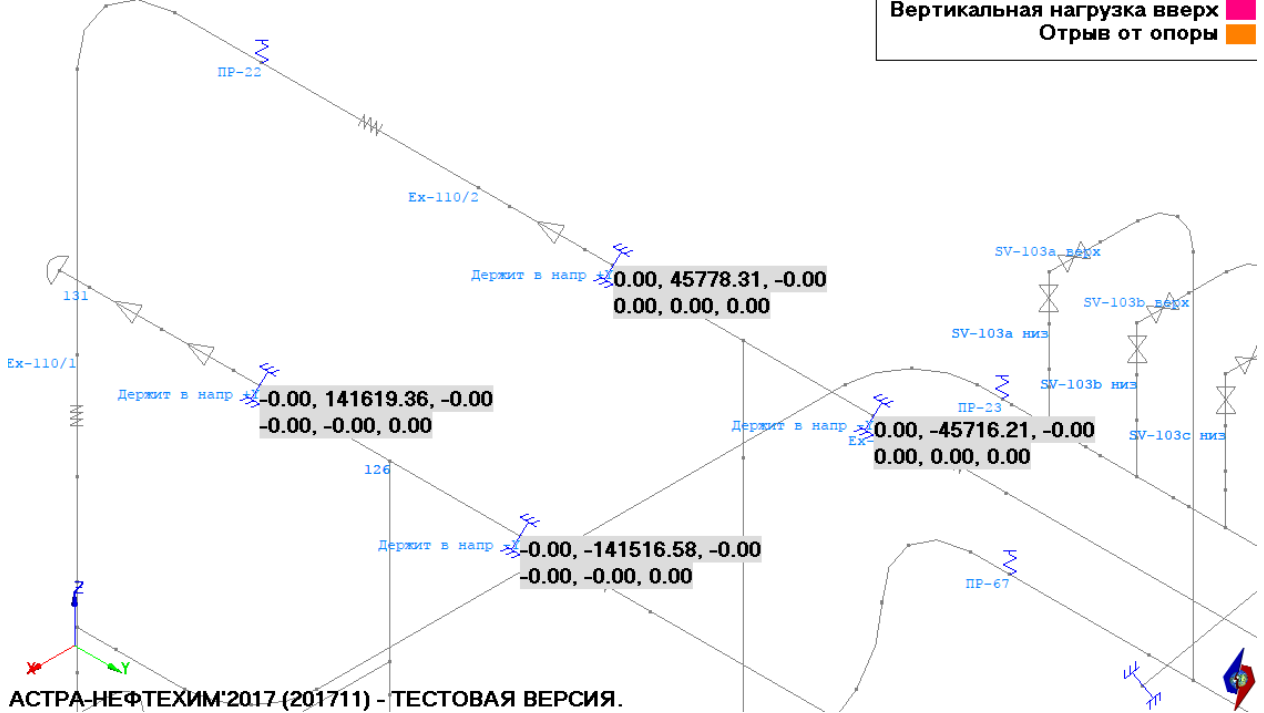


АСТРА-НЕФТЕХИМ'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 52 Нагрузки на опоры в рабочем состоянии, кН

ПОСТ-СТАЦ. Нагрузки на опоры: P1,P2,P3 (кН), M1,M2,M3 (кН*м).
Холодное состояние.

Предупреждения
Нагрузка на подвеску = 0
Вертикальная нагрузка вверх
Отрыв от опоры



АСТРА-НЕФТЕХИМ'2017 (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ.

Рис. 53 Нагрузки на опоры в холодном состоянии, кН

Протокол расчета:

Расчет высокотемпературный, учет трения: Гипрокаучук

Ввод _____

Время счета - 0.85 сек

Этап 1 _____

Начало 21 час 27 мин 35.74 сек

Время счета - 0.21 сек

Этап 3 подбор (1) _____

Начало 21 час 27 мин 35.95 сек

Время счета - 0.20 сек

Этап 2а фикт. T _____

Начало 21 час 27 мин 36.16 сек

Время счета - 11.31 сек

Число итераций 58

Этап 2а полн. T _____

Начало 21 час 27 мин 47.47 сек

Время счета - 24.17 сек

Число итераций 123

Этап 1 _____

Начало 21 час 28 мин 11.65 сек

Время счета - 0.21 сек

Этап 3 _____

Начало 21 час 28 мин 11.87 сек

Время счета - 0.22 сек

Этап 4а _____

Начало 21 час 28 мин 12.10 сек

Время счета - 15.25 сек

Число итераций 79

Этап 4б (исп,отрыв) _____

Начало 21 час 28 мин 27.35 сек

Время счета - 1.87 сек

Расчет завершен _____

Время окончания - 21 час 28 мин 29.31 сек

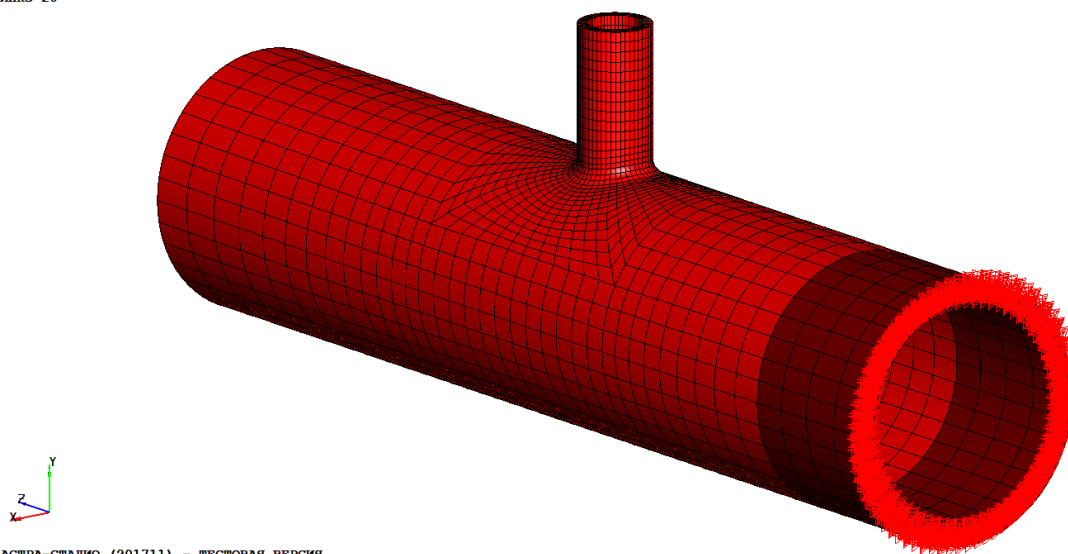
Время счета - 54.42 сек

3. АСТРА-СТАДИО. Упругопластический расчет для полной модели. Учет всех нагрузок

В версии 201711 реализована возможность проведения упруго-пластического расчета деталей трубопроводов (отводы, тройники) по подробным объемным КЭ-моделям в программном модуле АСТРА-СТАДИО на нагрузки, передаваемые из стержневой модели трубопроводной системы в АСТРА-НОВА.

Для полной модели в АСТРА-СТАДИО реализуется консольное закрепление: один торец закрепляется по всем степеням свободы (Рис. 54).

ИПКЭ 20



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. 54 Консольное закрепление полной модели в АСТРА-СТАДИО

3.1. Расчет на внутреннее давление. Сопоставление для полной модели и четверти

Модели: tee_press_full.ast, tee_press_quarter.ast, tee_press.anp

С целью верификации полной модели тройника в АСТРА-СТАДИО проводилось сопоставление результатов упруго-пластических расчетов от действия внутреннего давления для четверти тройника (Рис. 55) и полной модели (Рис. 56) с нагрузкой, импортированной из АСТРА-НОВА (Рис. 57).

Исходные данные

Геометрические характеристики

- параметры основной трубы (магистрала):
 - наружный диаметр $D = 273$ мм;
 - толщина стенки $S = 20$ мм.
- параметры штуцера (ответвления):
 - наружный диаметр $d = 273$ мм;
 - толщина стенки $s = 20$ мм.

Физико-механические характеристики

- модуль упругости $E = 2.1e5$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$;
- предел текучести $\sigma_p = 400$ МПа;
- тангенциальный модуль $E_t = 200$ МПа.

Параметры нагрузки

- внутреннее давление $p = 20$ МПа;
- осевые силы от давления, задаются как растягивающие напряжения на торцы величиной 53.64 МПа.

ИПКЭ 20

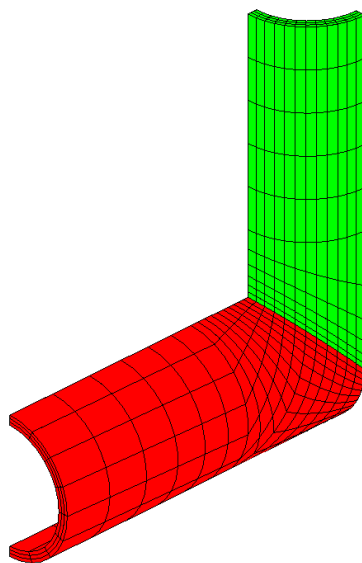


Рис. 55 Четверть. АСТРА-СТАДИО

ИПКЭ 20

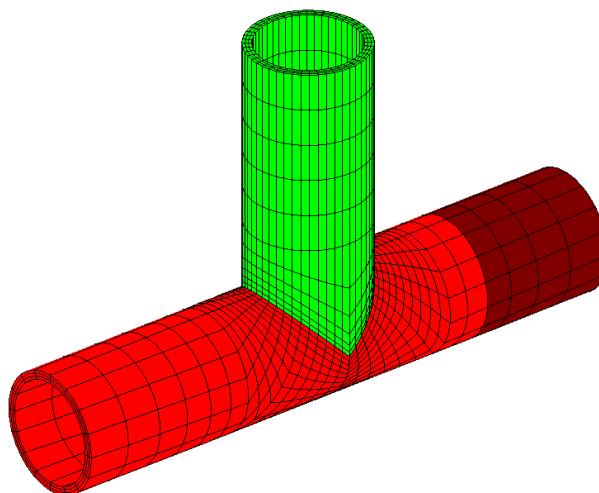


Рис. 56 Полная модель. АСТРА-СТАДИО

Давление

МПа
20.00

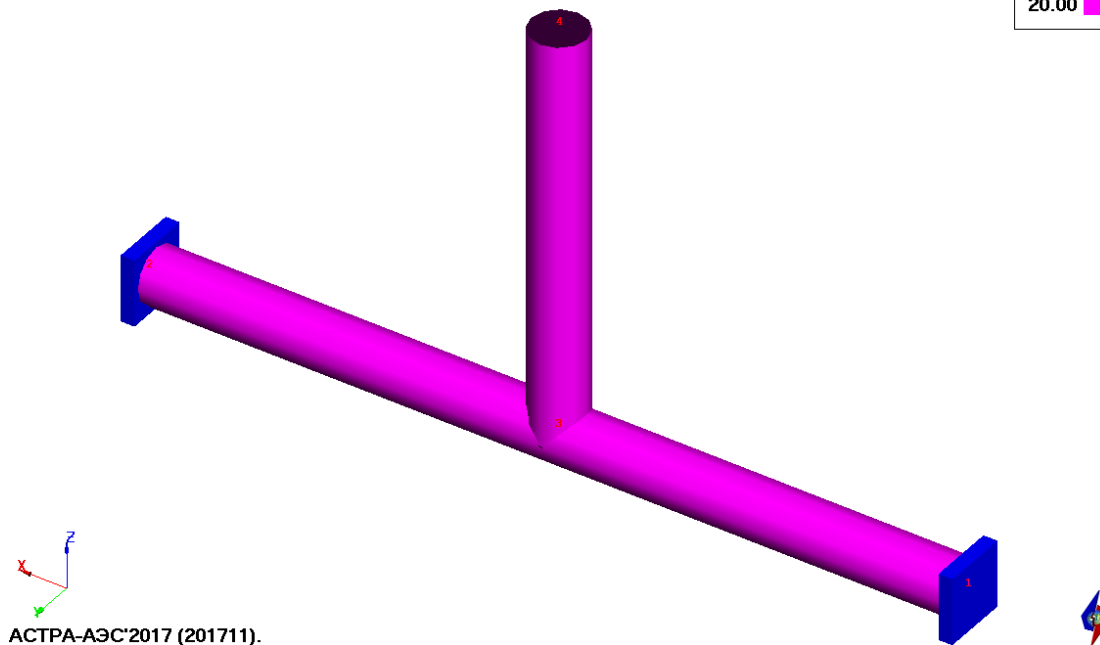


Рис. 57 Расчетная схема АСТРА-НОВА

Нагрузка

Тип нагрузки

Единичная (МН, МН*м, МПа)

Задаваемая

Из АСТРА-НОВА (СТАЦ)

Этап 2

Из АСТРА-НОВА (СЕЙСМ) Номер 1

Внутреннее давление 20 МПа

Перепад температур 0 град

Нагрузки на торцы

	1 - 1 магистраль	2 - 2 магистраль	3 - 3 штуцер	
Осевая сила	0	0	-0	кН
Изгиб. момент в плоскости тройника	0	0	-0	кН*м
Изгиб. момент из плоскости тройника	0	0	0	кН*м
Крутящий момент	0	0	0	кН*м

ПРИМЕЧАНИЕ: Все силы и моменты заданы в системе координат тройника (z' - по магистрали, y' - по штуцеру, x' - из плоскости тройника)

OK Отмена

Рис. 58 Нагрузки, передаваемые в АСТРА-СТАДИО

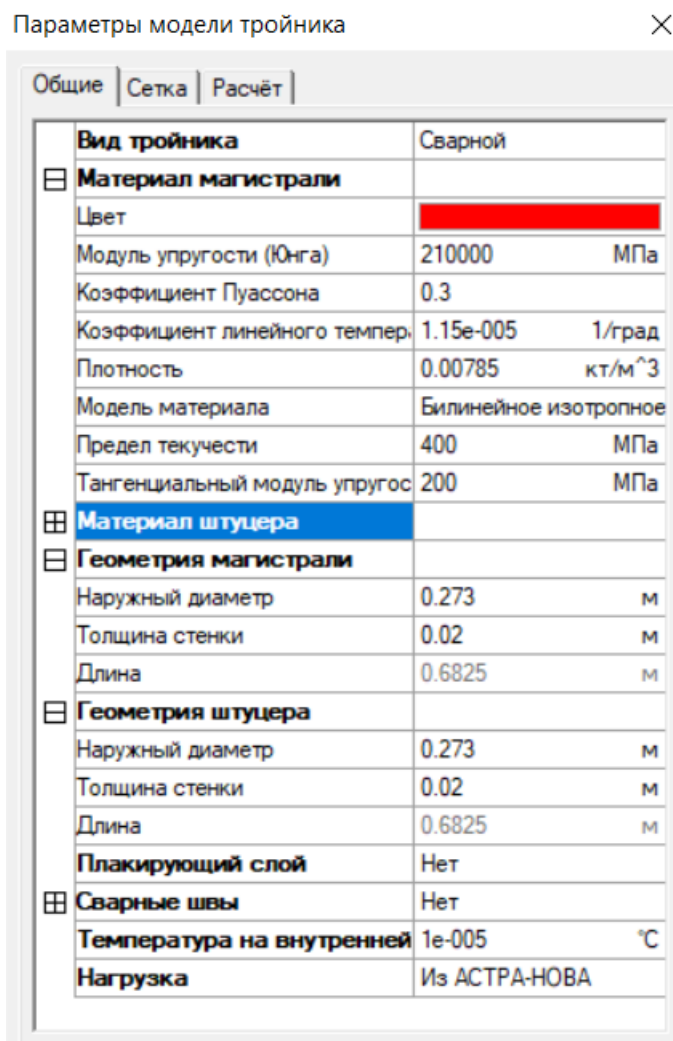


Рис. 59 Параметры модели тройника

Табл. 3 Результаты (максимальные значения)

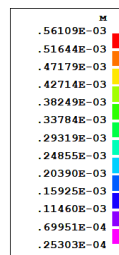
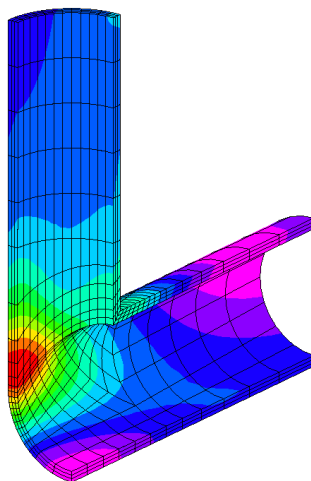
	Суммарные перемещения, м	Эквивалентные полные деформации (Треска)	Эквивалентные пластические деформации (Треска)	Эквивалентные напряжения, МПа (Мизес)
Четверть	0.5611e-3	0.4199e-2	0.1707e-2	400.23
Полная модель	0.5356e-3	0.4203e-2	0.1714e-2	400.23
Δ, %	4.54	0.10	0.41	0.00

Четверть (максимум – $0.561 \cdot 10^{-3} \text{ м}$)

Суммарные перемещения



АСТРА-СТАДИО (201711)

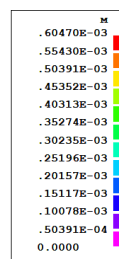
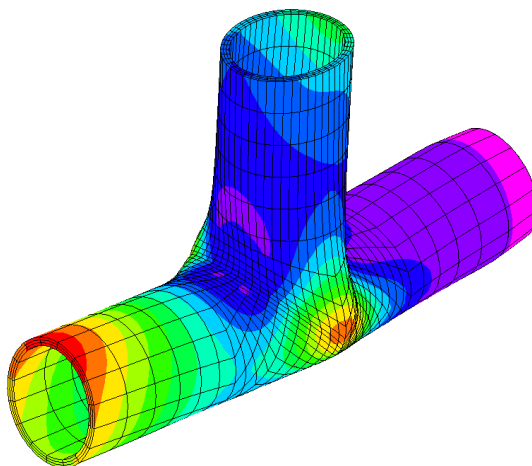


Полная модель (максимум – $0.605 \cdot 10^{-3} \text{ м}$)

Суммарные перемещения



АСТРА-СТАДИО (201711)



Полная модель без торцевых зон (максимум – $0.536 \cdot 10^{-3} \text{ м}$)

Суммарные перемещения



АСТРА-СТАДИО (201711)

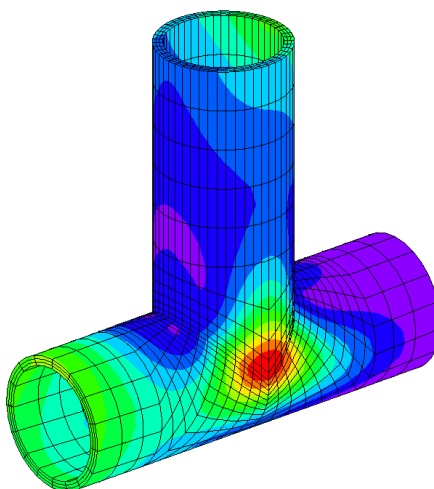


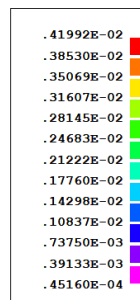
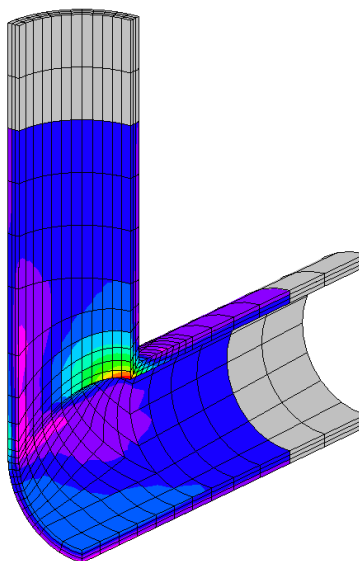
Рис. 60 Суммарные перемещения, м

Четверть

Полная деформация Треска
 Min/Max по точкам интегрирования 4.51595E-005 / 0.00419919



АСТРА-СТАДИО (201711)



Полная модель

Полная деформация Треска
 Min/Max по точкам интегрирования 4.42282E-005 / 0.0042028



АСТРА-СТАДИО (201711)

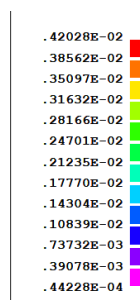
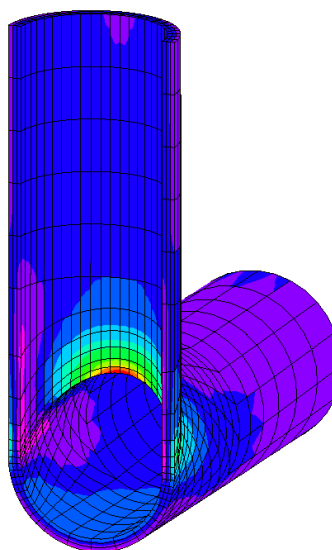
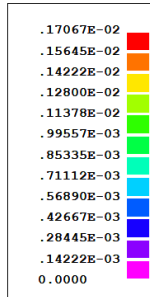
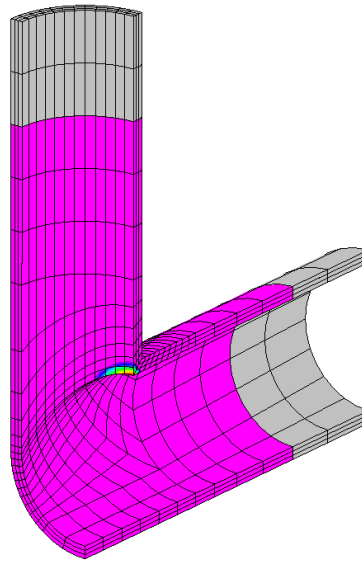


Рис. 61 Эквивалентные полные деформации Треска

Четверть

Пластическая деформация Треска
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.0017067

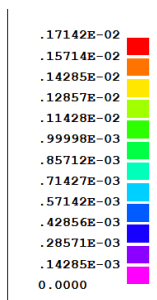
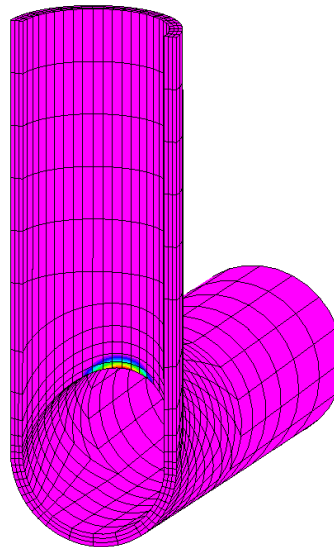


АСТРА-СТАДИО (201711)



Полная модель

Пластическая деформация Треска
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.00171425



АСТРА-СТАДИО (201711)



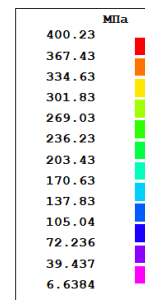
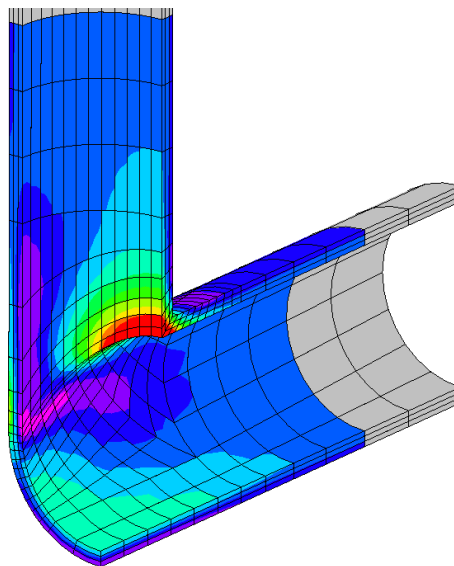
Рис. 62 Эквивалентные пластические деформации Треска

Четверть

Напряжение Мизеса
Мин/Мак по точкам интегрирования 6.63845 / 400.226 МПа



АСТРА-СТАДИО (201711)



Полная модель

Напряжение Мизеса
Мин/Мак по точкам интегрирования 6.37511 / 400.228 МПа



АСТРА-СТАДИО (201711)

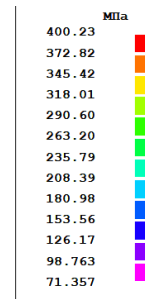
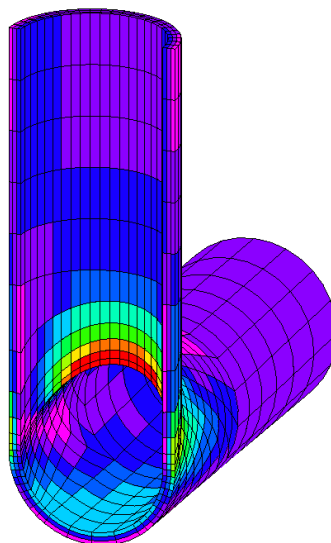


Рис. 63 Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа

3.2. Расчет на сочетание нагрузок. Сопоставление с ANSYS

Для тестовой схемы AES/TEST3 были рассмотрены штампованные тройники в узлах 82,83 (Рис. 64). В АСТРА-СТАДИО проводился упруго-пластический расчет на нагрузки с этапа 2 АСТРА-НОВА (Рис. 65). Для сопоставления расчетная модель (Рис. 66) импортировалась в ПК ANSYS Mechanical, где проводился аналогичный расчет.

Тройник в узле 82

Модель: TEST3_tee_82.ast

Исходные данные

Геометрические характеристики

- параметры основной трубы (магистрала):
 - наружный диаметр $D = 325$ мм;
 - толщина стенки $S = 16$ мм.

- параметры штуцера (ответвления):
 - наружный диаметр $d = 92$ мм;
 - толщина стенки $s = 12$ мм.

Физико-механические характеристики

- модуль упругости $E = 1.82e5$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$;
- предел текучести $\sigma_p = 100$ МПа;
- тангенциальный модуль $E_t = 200$ МПа.

Примечание.

Предел текучести $\sigma_p = 100$ МПа принят условно.

Результаты приведены в Табл. 4 и на Рис. 70 - Рис. 73. Все изополя в АСТРА-СТАДИО построены по ближайшей точке интегрирования без осреднения.

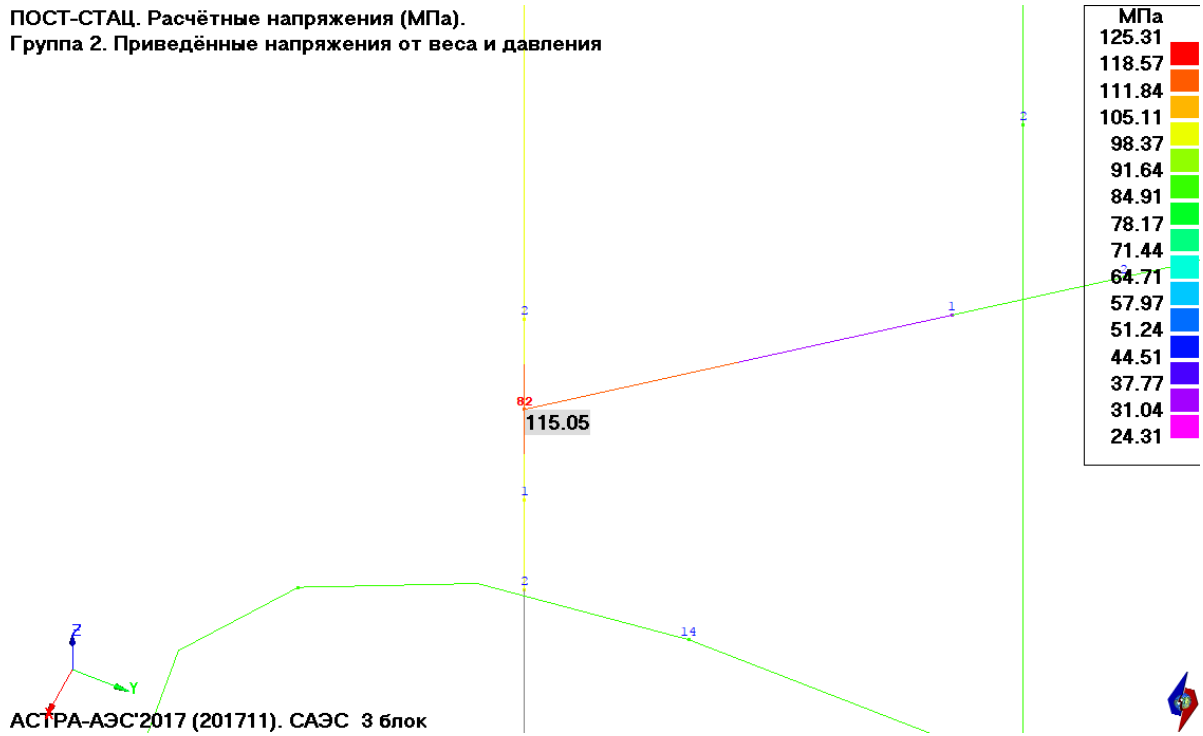


Рис. 64 Тройник в узле 82. Стержневая модель АСТРА-НОВА. Напряжения по группе 2 (от веса и давления)

Нагрузка

Тип нагрузки

Единичная (МН, МН*м, МПа)

Задаваемая

Из АСТРА-НОВА (СТАЦ)

Этап 2

Из АСТРА-НОВА (СЕЙСМ) Номер 1

Внутреннее давление 8.73 МПа

Перепад температур 0 град

	1 - 1 магистраль	2 - 2 магистраль	3 - 3 штуцер	
Осевая сила	-29.148	28.922	0.342	кН
Изгиб. момент в плоскости тройника	-57.035	56.645	0.39	кН*м
Изгиб. момент из плоскости тройника	-62.695	62.483	0.193	кН*м
Крутящий момент	8.735	-8.928	0.213	кН*м

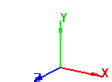
ПРИМЕЧАНИЕ: Все силы и моменты заданы в системе координат тройника [z' - по магистрали, y' - по штуцеру, x' - из плоскости тройника]

OK Отмена

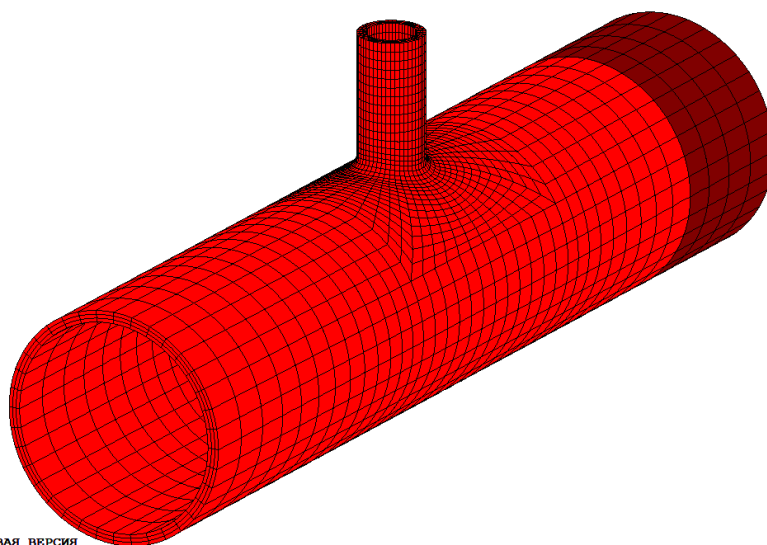
Рис. 65 Нагрузки на тройник передаваемые в АСТРА-СТАДИО

АСТРА-СТАДИО

ИПКЭ 20



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



ANSYS

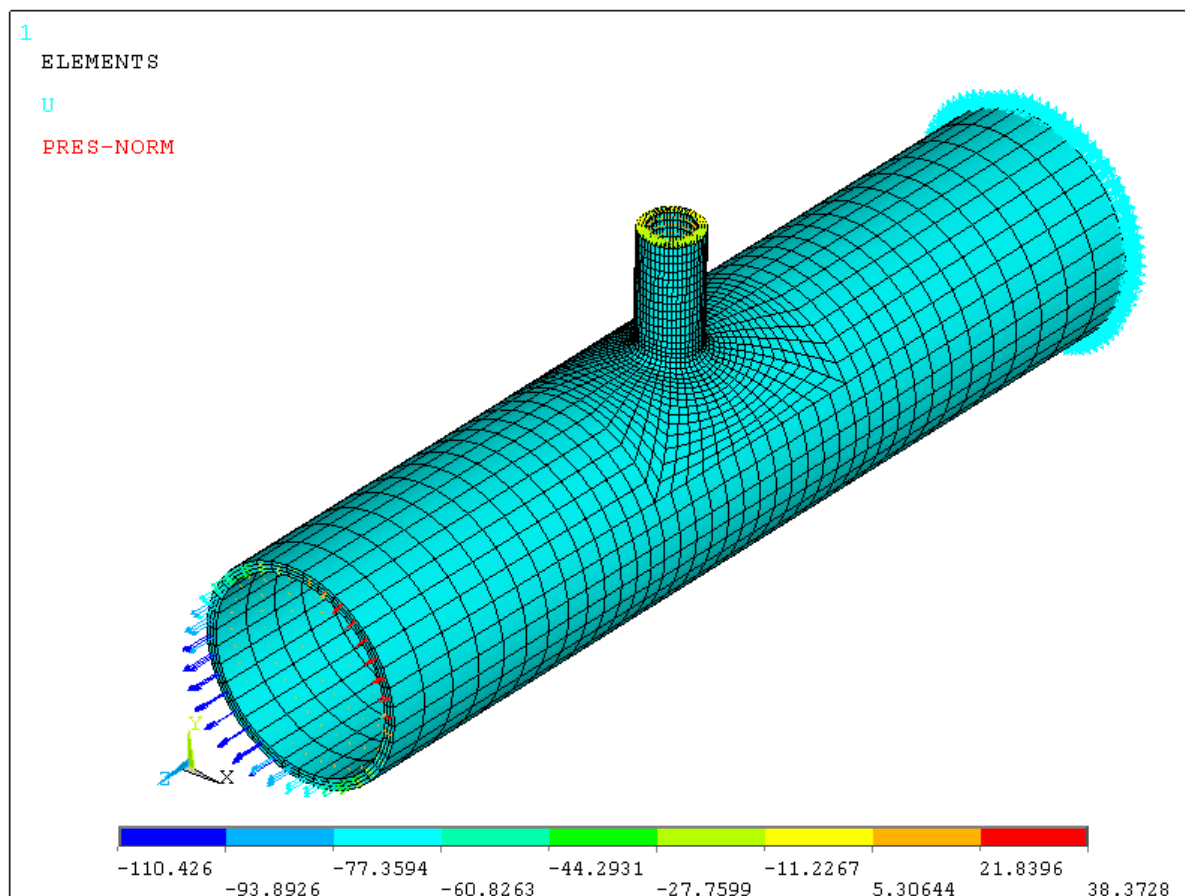


Рис. 66 КЭ-модели

Общие Сетка Расчёт		
Материал тройника		
Цвет		
Модуль упругости (Юнга)	182000	МПа
Коэффициент Пуассона	0.3	
Коэффициент линейного темпер.	1.73e-005	1/град
Плотность	0.00785	кг/м ³
Модель материала	Билинейное изотроп	
Предел текучести	100	МПа
Тангенциальный модуль упругос	200	МПа
Геометрия магистрали		
Наружный диаметр	0.325	м
Толщина стенки	0.016	м
Длина	0.696	м
Геометрия штуцера		
Наружный диаметр	0.092	м
Толщина стенки	0.012	м
Длина	0.3465	м
Геометрия горловины		
Радиус	0.016	м
Высота	0.032	м
Плакирующий слой	Нет	
Температура на внутренней	0.0001	°C
Нагрузка	Из АСТРА-НОВА	

Рис. 67 Параметры задачи

Общие		Сетка	Расчёт
Тип КЭ		Трёхмерные 20-узловые	
Полная модель		Да	
Перенумерация Катхилла-М		Да	
<input type="checkbox"/> Параметры по умолчанию		Да	
Кoeffициент сгущения		1.1	
Кoeffициент при начальном шаге		0.1	
Количество КЭ на четверти штуца		16	
Количество КЭ на горловине		4	
<input type="checkbox"/> Количество слоев по толщине			
В магистрали		3	
<input type="checkbox"/> Закрепление		Консольная схема	
Масштабный коэффициент для μ		1	

Рис. 68 Параметры КЭ-сетки

Общие		Сетка	Расчёт
<input type="checkbox"/>	Статика		
	Тип расчёта	С учётом пластических деформаций	
	Количество шагов по нагрузке	10	
	Относительная точность для дос	0.0001	
	Относительная точность для лок	1e-007	
	Макс. количество итераций до р:	1000	
	Согласованная упруго-пластичес	Да	
	Масштаб для нагрузок	1	
	ГСК для интегрирования ИПКЭ	Да	
	Тип dat-файла	Новый	
	Метод расчёта	Прямой (PARDISO)	
	Предобуславливатель	Последовательная верх	
	Относительная точность	1e-005	
	Предельное число итераций	1000	
<input type="checkbox"/>	Вывод в текстовый файл		
	Исходные данные	Нет	
	Результаты	Нет	

Рис. 69 Параметры расчета

Табл. 4 Результаты (максимальные значения)

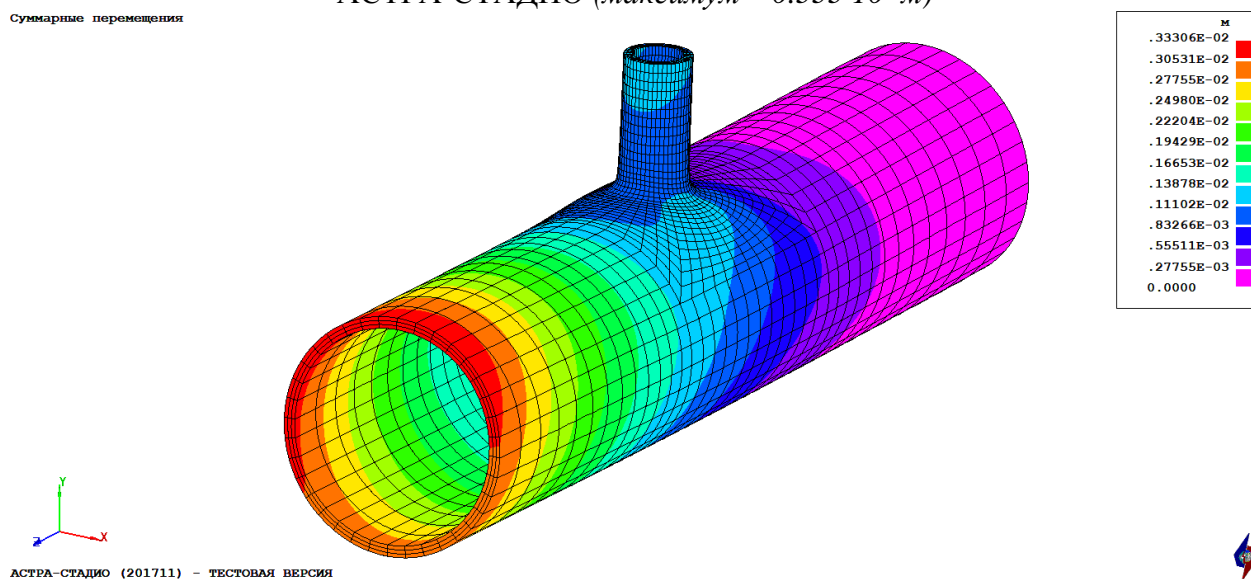
№	Вариант		Суммарные перемещения, м	Эквивалентные полные деформации (Треска)	Эквивалентные пластические деформации (Треска)	Эквивалентные напряжения, МПа (Мизес)
1.1	Линейно-упругий расчет	АСТРА-СТАДИО	0.2574e-2	0.2154e-2		266.18
		ANSYS	0.2558e-2	0.2099e-2		266.18
		Δ,%	0.63	2.62		0.00
1.2	Упруго-пластический расчет	АСТРА-СТАДИО	0.333e-2	0.1879e-1	0.1800e-1	102.26*
		ANSYS	0.320e-2	0.1648e-1	0.1571e-1	101.85*
		Δ,%	4.06	14.02	14.58	0.40

Примечание.

*Результаты для условно принятого предела текучести 100 МПа.

АСТРА-СТАДИО (максимум – $0.333 \cdot 10^{-2}$ м)

Суммарные перемещения



ANSYS (максимум – $0.320 \cdot 10^{-2}$ м)

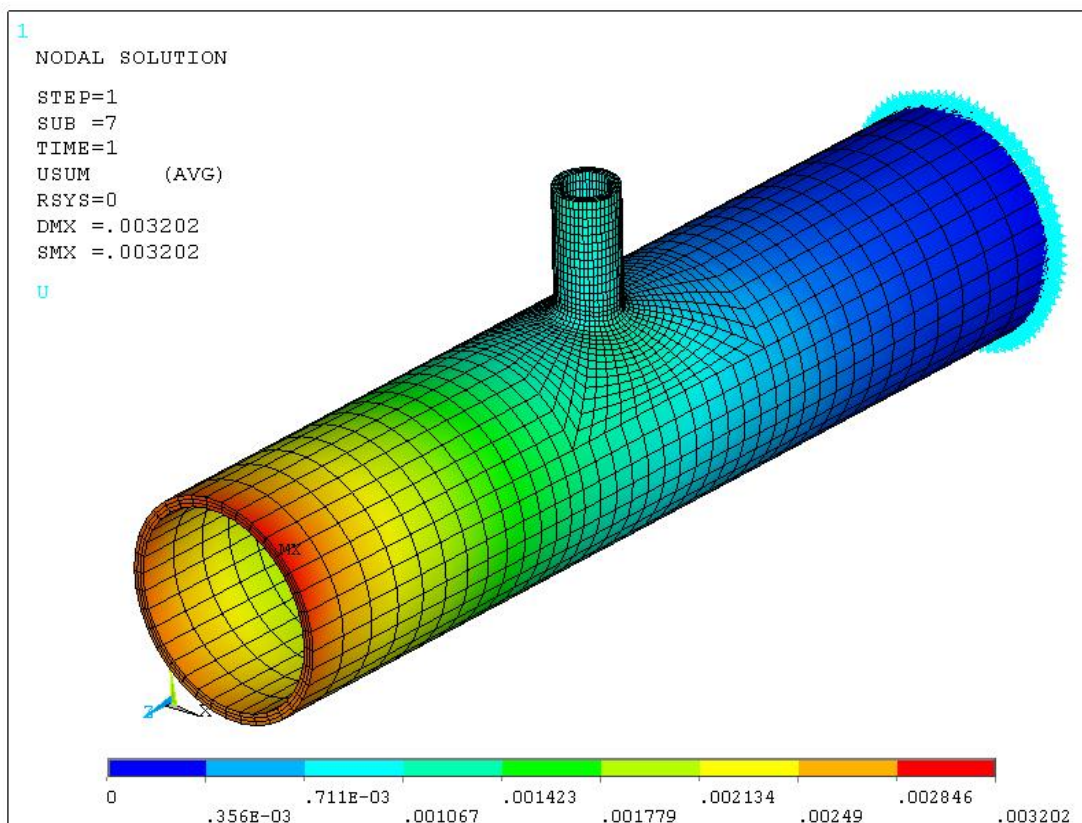
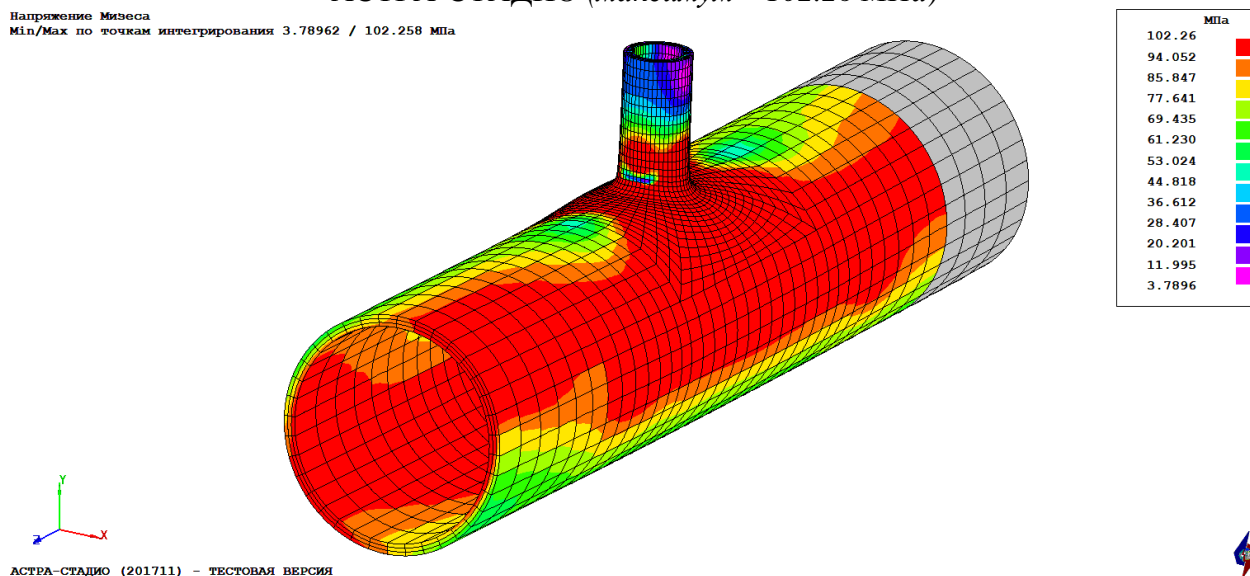


Рис. 70 Суммарные перемещения, м

АСТРА-СТАДИО (максимум – 102.26 МПа)

Напряжение Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 3.78962 / 102.258 МПа



ANSYS (максимум – 101.85 МПа)

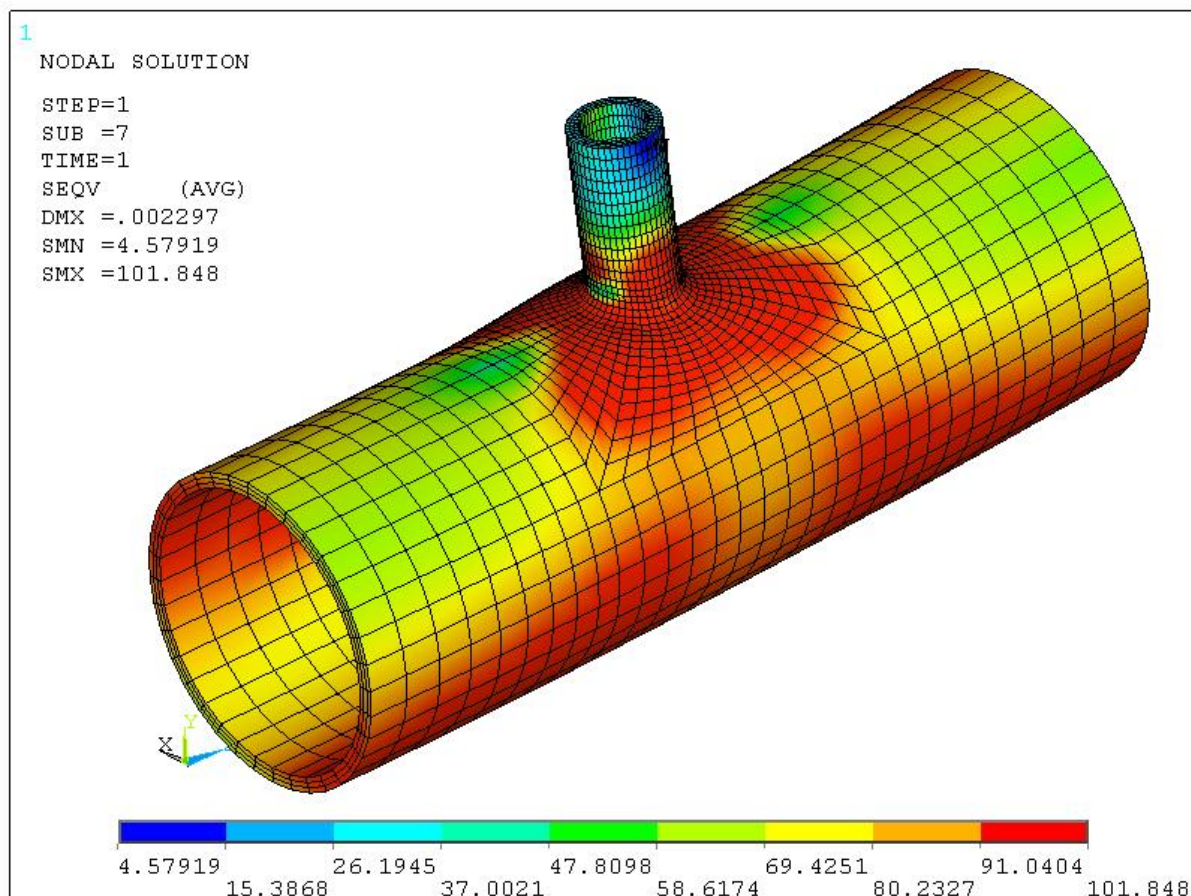


Рис. 71 Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа. Упруго-пластический расчет. Торцевые зоны не показаны

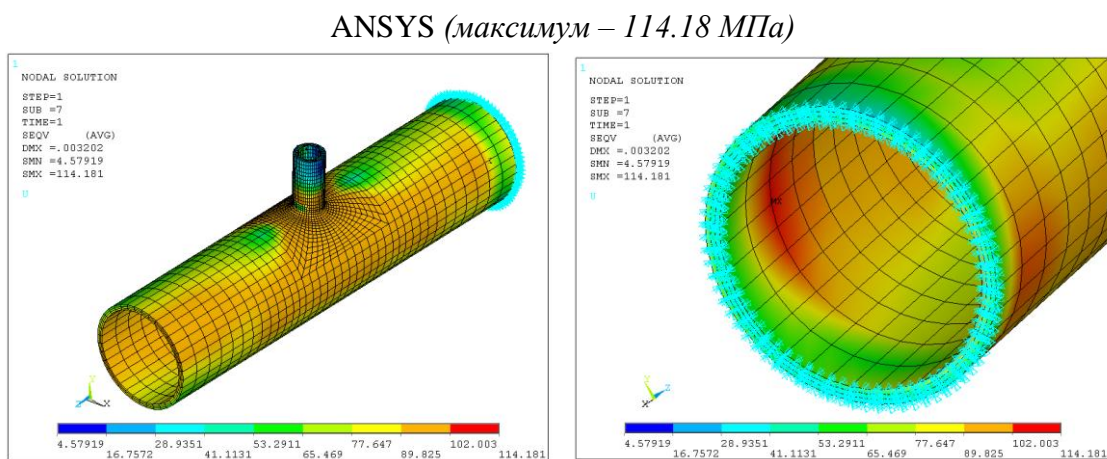
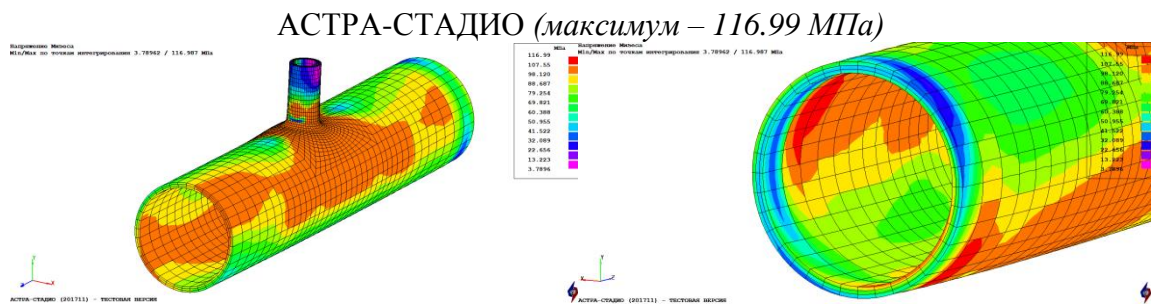
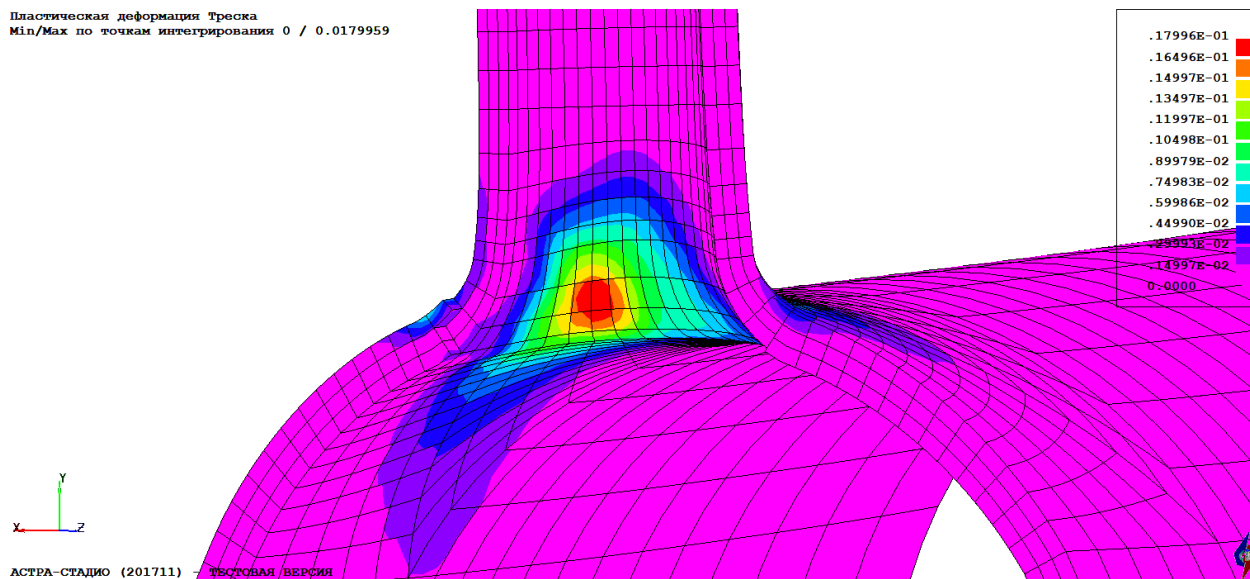


Рис. 72 Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа. Уруго-пластический расчет. С торцевыми зонами

АСТРА-СТАДИО (максимум – 1.80%)

Пластическая деформация Треска
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.0179959



ANSYS (максимум – 1.57%)

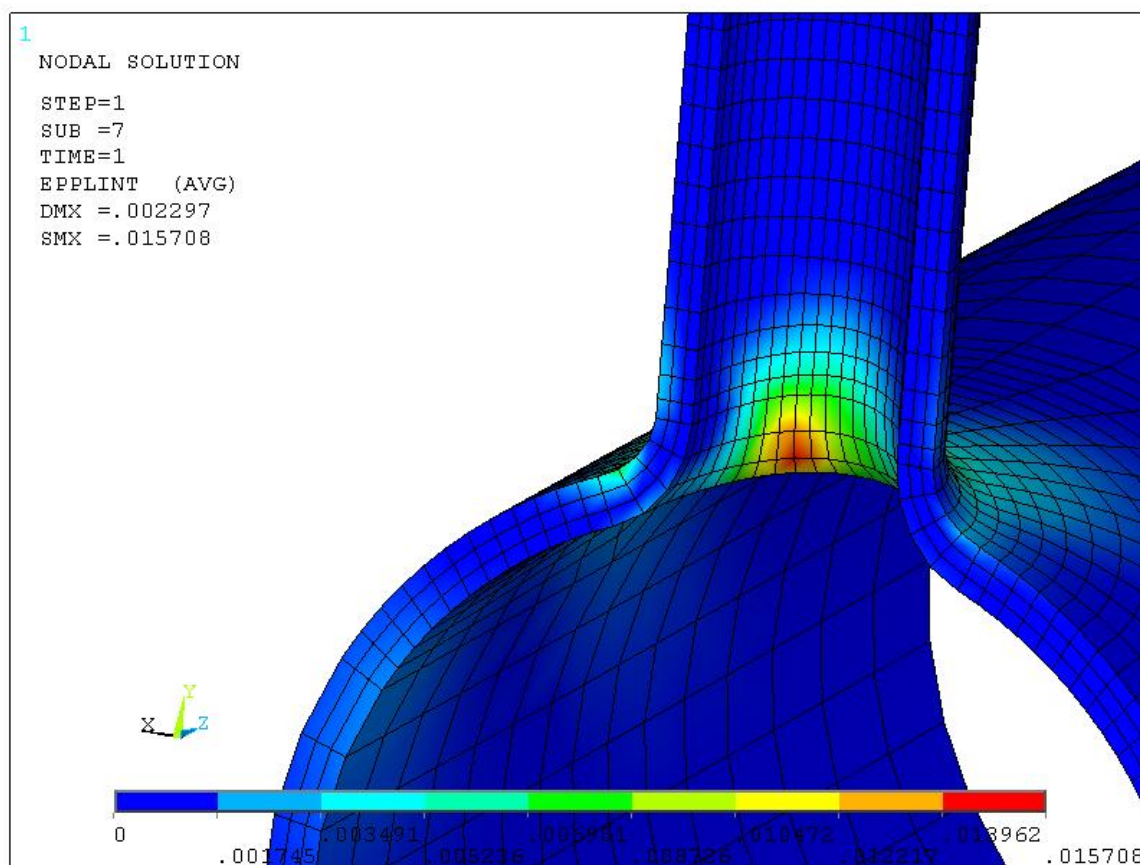


Рис. 73 Эквивалентные пластические деформации Треска. Уруго-пластический расчет

Тройник в узле 83

Модель: TEST3_tee_83.ast

Исходные данные

Геометрические характеристики

- параметры основной трубы (магистральной):
 - наружный диаметр $D = 360$ мм;
 - толщина стенки $S = 33$ мм.
- параметры штуцера (ответвления):
 - наружный диаметр $d = 330$ мм;
 - толщина стенки $s = 22.8$ мм.

Физико-механические характеристики

- модуль упругости $E = 1.82e5$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$;
- предел текучести $\sigma_p = 100$ МПа;
- тангенциальный модуль $E_t = 200$ МПа.

Результаты приведены в Табл. 5 и на Рис. 80 - Рис. 83. Все изополя в АСТРА-СТАДИО построены по ближайшей точке интегрирования без осреднения.

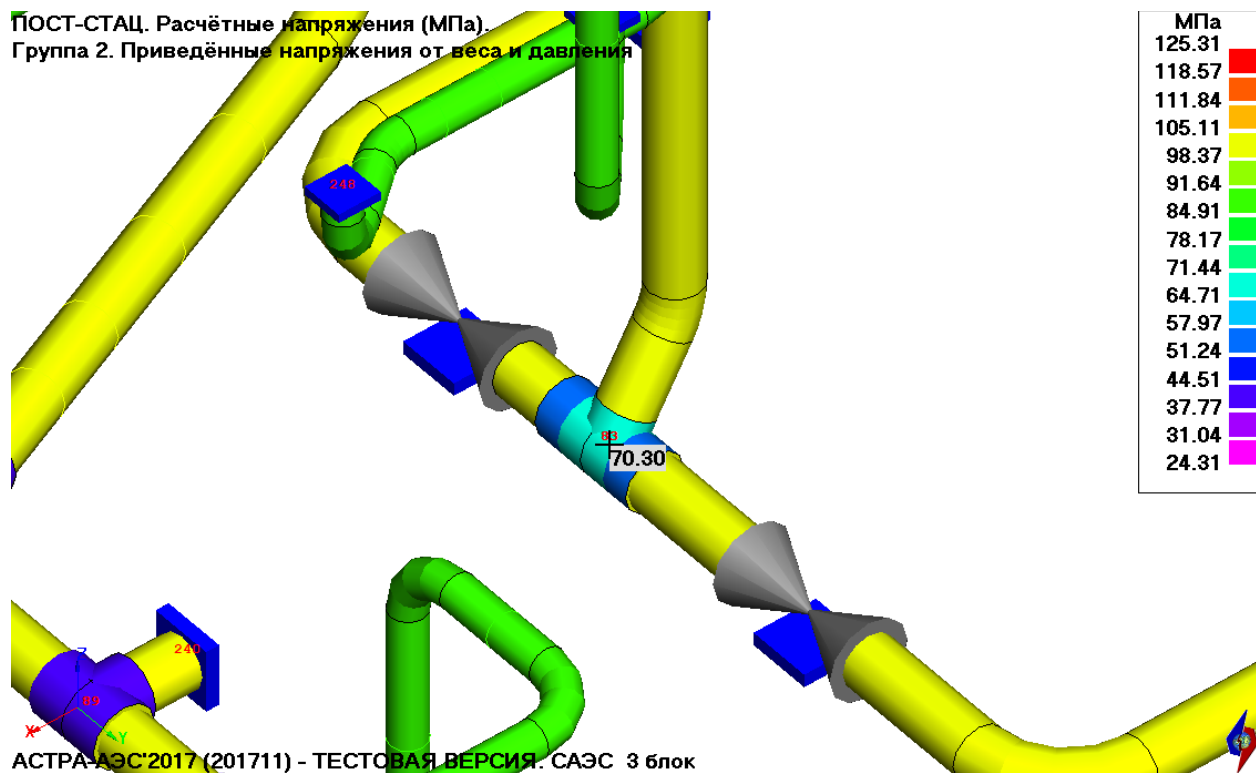


Рис. 74 Тройник в узле 82. Стержневая модель АСТРА-НОВА. Напряжения по группе 2 (от веса и давления)

Нагрузка

Тип нагрузки

Единичная (МН, МН*м, МПа)
 Задаваемая
 Из АСТРА-НОВА (СТАЦ)

Этап 2

Из АСТРА-НОВА (СЕЙСМ)

Номер 1

Внутреннее давление 8.73 МПа

Перепад температур 0 град

Нагрузки на торцы

	1 - 1 магистраль	2 - 2 магистраль	3 - 3 штуцер	
Осевая сила	-4.561	4.502	-32.739	кН
Изгиб. момент в плоскости тройника	-4.028	1.734	2.295	кН*м
Изгиб. момент из плоскости тройника	0.929	-9.942	-45.127	кН*м
Крутящий момент	22.711	22.416	9.013	кН*м

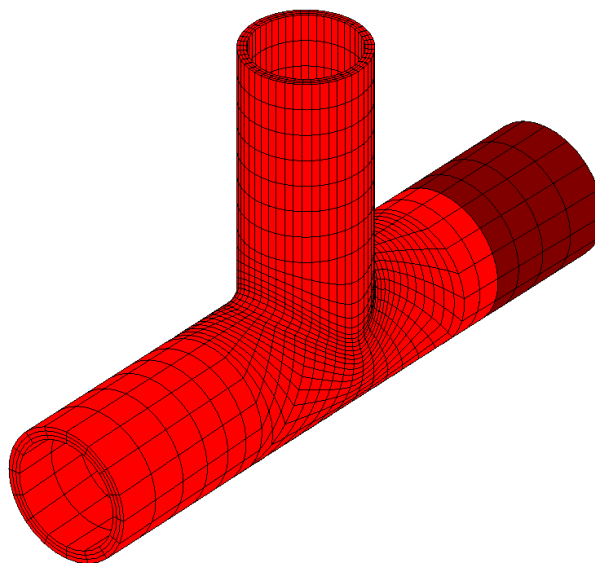
ПРИМЕЧАНИЕ: Все силы и моменты заданы в системе координат тройника (z' - по магистрали, y' - по штуцеру, x' - из плоскости тройника)

OK Отмена

Рис. 75 Нагрузки на тройник передаваемые в АСТРА-СТАДИО

ИПКЭ 20

АСТРА-СТАДИО



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ



ANSYS

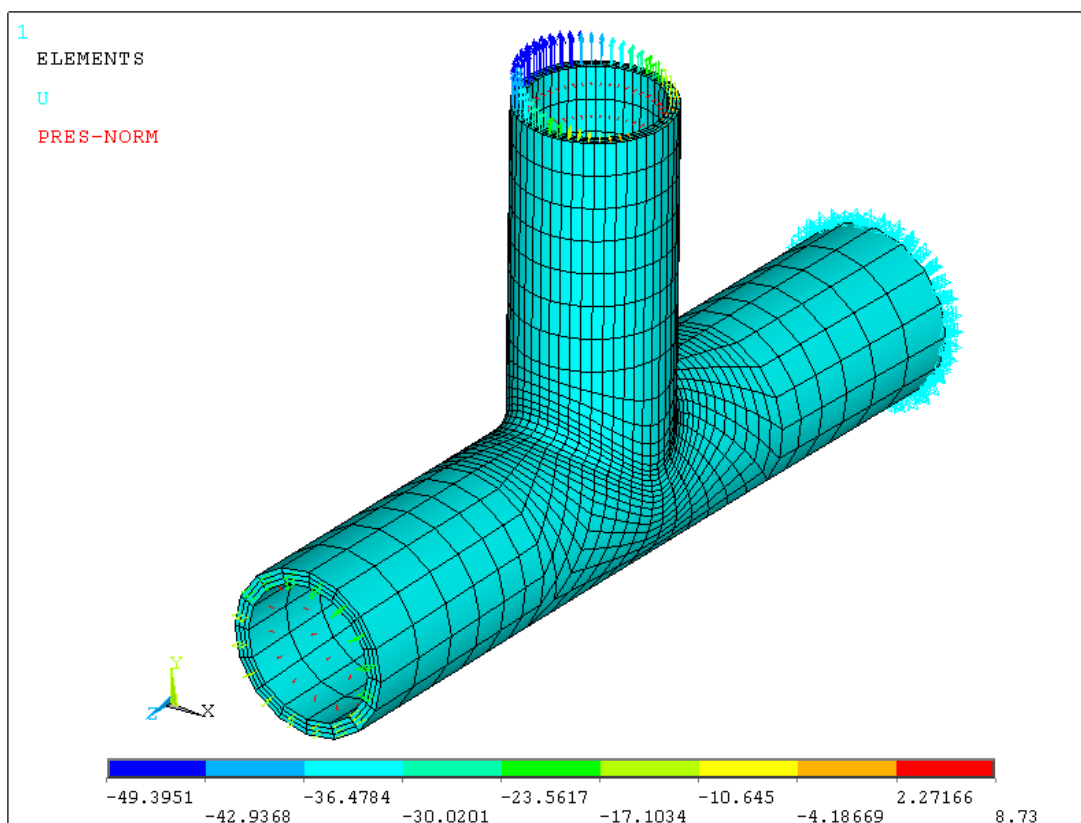


Рис. 76 КЭ-модели

Общие Сетка Расчёт		
Материал тройника		
Цвет		
Модуль упругости (Юнга)	182000	МПа
Коэффициент Пуассона	0.3	
Коэффициент линейного темпер.	1.73e-005	1/град
Плотность	0.00785	кг/м ³
Модель материала	Билинейное изотроп	
Предел текучести	100	МПа
Тангенциальный модуль упругос	200	МПа
Геометрия магистрали		
Наружный диаметр	0.325	м
Толщина стенки	0.016	м
Длина	0.696	м
Геометрия штуцера		
Наружный диаметр	0.092	м
Толщина стенки	0.012	м
Длина	0.3465	м
Геометрия горловины		
Радиус	0.016	м
Высота	0.032	м
Плакирующий слой	Нет	
Температура на внутренней	0.0001	°C
Нагрузка	Из АСТРА-НОВА	

Рис. 77 Параметры задачи

Общие		Сетка	Расчёт
Тип КЭ		Трёхмерные 20-узловые	
Полная модель		Да	
Перенумерация Катхилла-М		Да	
<input type="checkbox"/> Параметры по умолчанию		Да	
Кoeffициент сгущения		1.1	
Кoeffициент при начальном шаге		0.1	
Количество КЭ на четверти штуца		16	
Количество КЭ на горловине		4	
<input type="checkbox"/> Количество слоев по толщине			
В магистрали		3	
<input type="checkbox"/> Закрепление		Консольная схема	
Масштабный коэффициент для κ		1	

Рис. 78 Параметры КЭ-сетки

Общие		Сетка	Расчёт
<input type="checkbox"/>	Статика		
	Тип расчёта	С учётом пластических деформаций	
	Количество шагов по нагрузке	10	
	Относительная точность для дос	0.0001	
	Относительная точность для лок	1e-007	
	Макс. количество итераций до р:	1000	
	Согласованная упруго-пластичес	Да	
	Масштаб для нагрузок	1	
	ГСК для интегрирования ИПКЭ	Да	
	Тип dat-файла	Новый	
	Метод расчёта	Прямой (PARDISO)	
	Предобуславливатель	Последовательная верх	
	Относительная точность	1e-005	
	Предельное число итераций	1000	
<input type="checkbox"/>	Вывод в текстовый файл		
	Исходные данные	Нет	
	Результаты	Нет	

Рис. 79 Параметры расчета

Табл. 5 Результаты (максимальные значения)

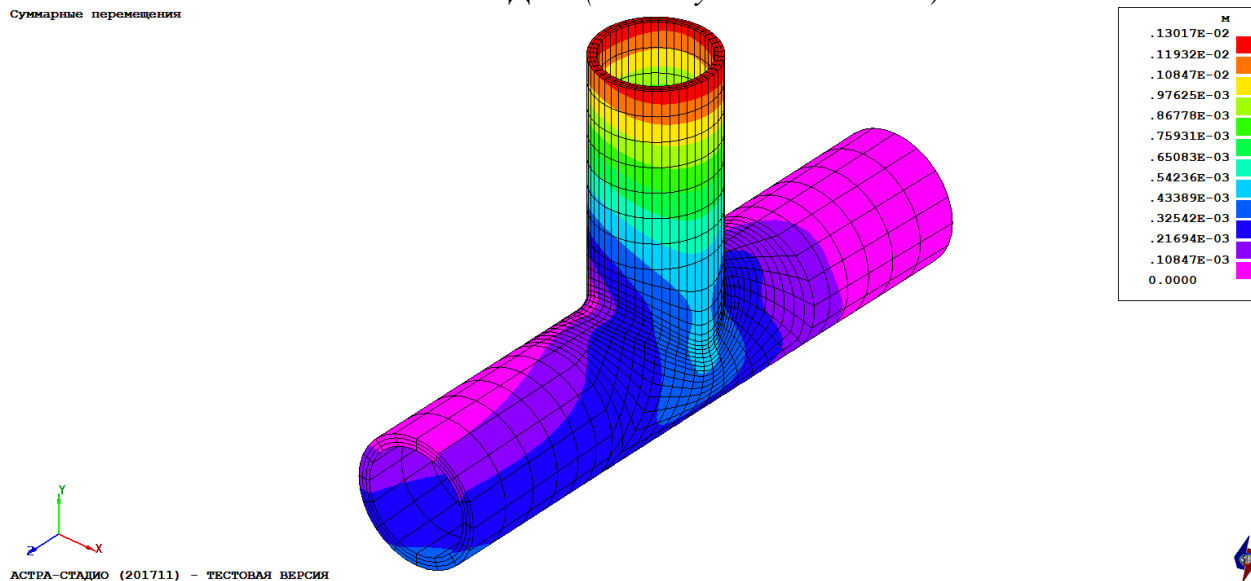
№	Вариант		Суммарные перемещения, м	Эквивалентные полные деформации		Эквивалентные пластические деформации		Эквивалентные напряжения, МПа	
				Треска	Мизес	Треска	Мизес	Треска	Мизес
1.1	Упруго-пластический расчет	АСТРА-СТАДИО	0.1302e-2	0.5566e-2	0.3236e-2	0.4742e-2	0.2758e-2	115.67	100.55
		ANSYS	0.1319e-2	0.5188e-2	0.3101e-2	0.4367e-2	0.2549e-2	115.51	100.33
		Δ,%	1.29	7.29	4.35	8.59	8.20	0.14	0.22

Табл. 6 Суммарные реакции, МН

	RX	RY	RZ
ANSYS	0.95216E-13	0.32739E-01	-0.58809

Суммарные перемещения

АСТРА-СТАДИО (максимум – $0.1302 \cdot 10^{-2} \text{ м}$)



ANSYS (максимум – $0.1319 \cdot 10^{-2} \text{ м}$)

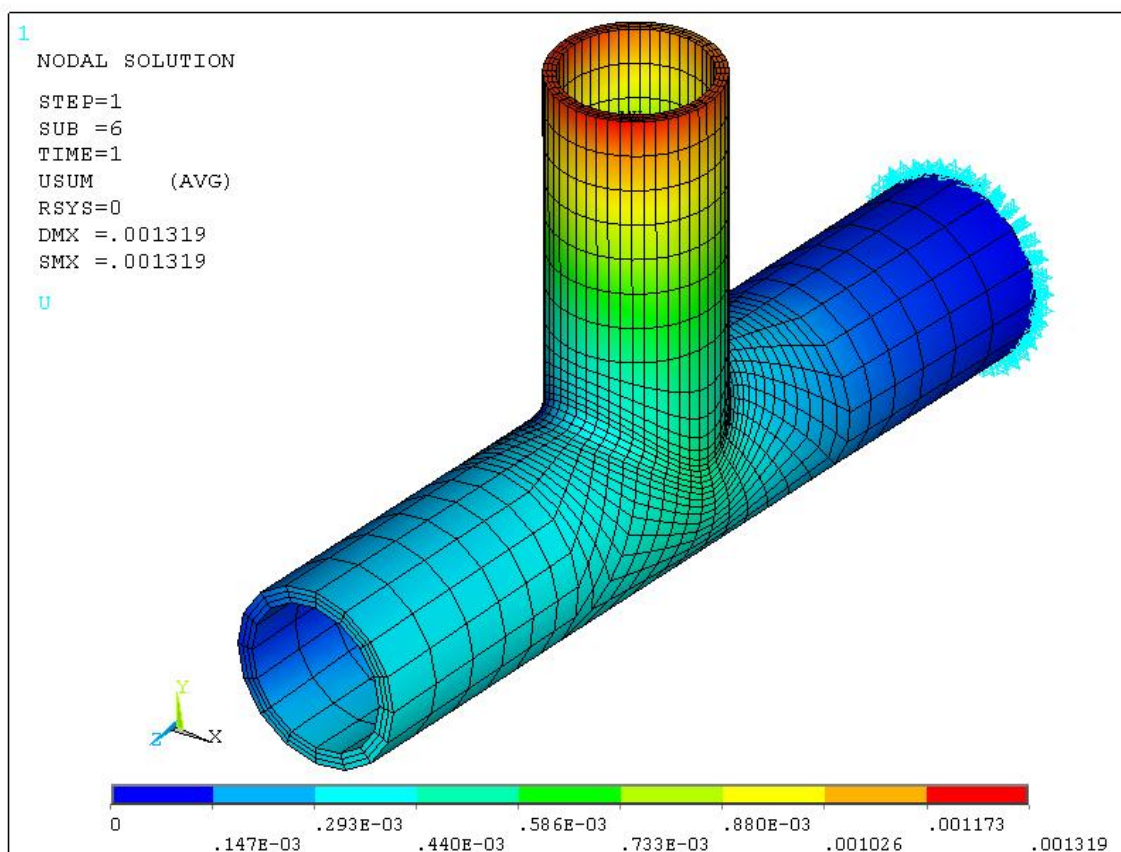
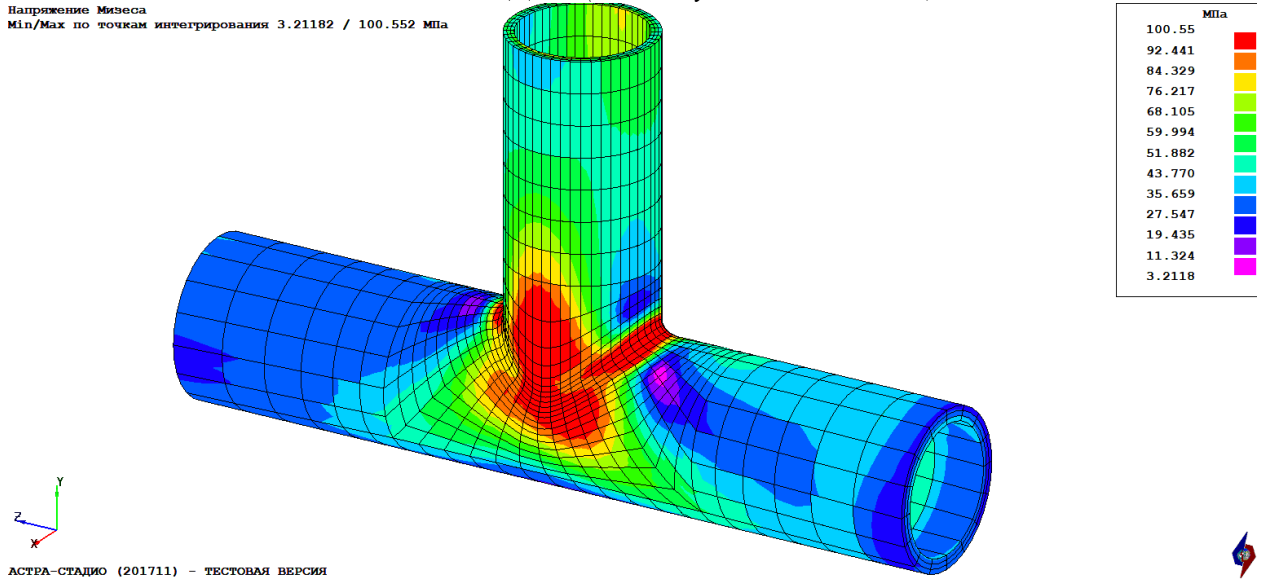


Рис. 80 Суммарные перемещения, м. Упруго-пластический расчет

АСТРА-СТАДИО (максимум – 100.55 МПа)

Напряжение Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 3.21182 / 100.552 МПа



АСТРА-СТАДИО (201711) – ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

ANSYS (максимум – 100.33 МПа)

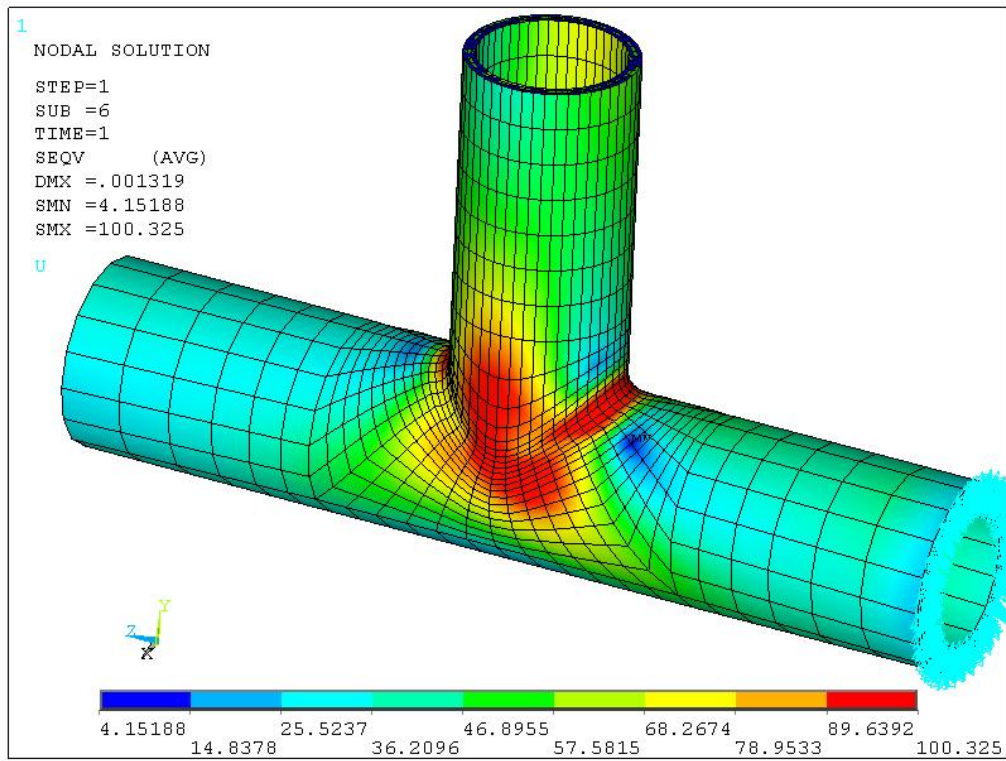


Рис. 81 Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа. Упруго-пластический расчет. Вид X+

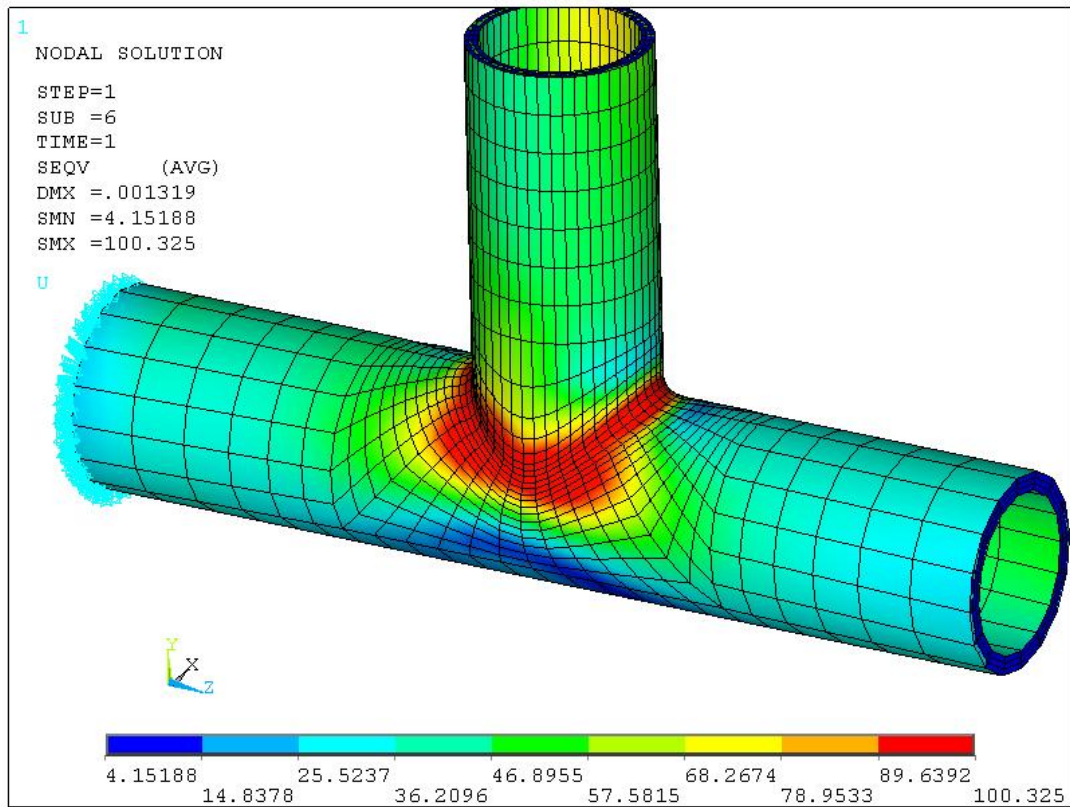
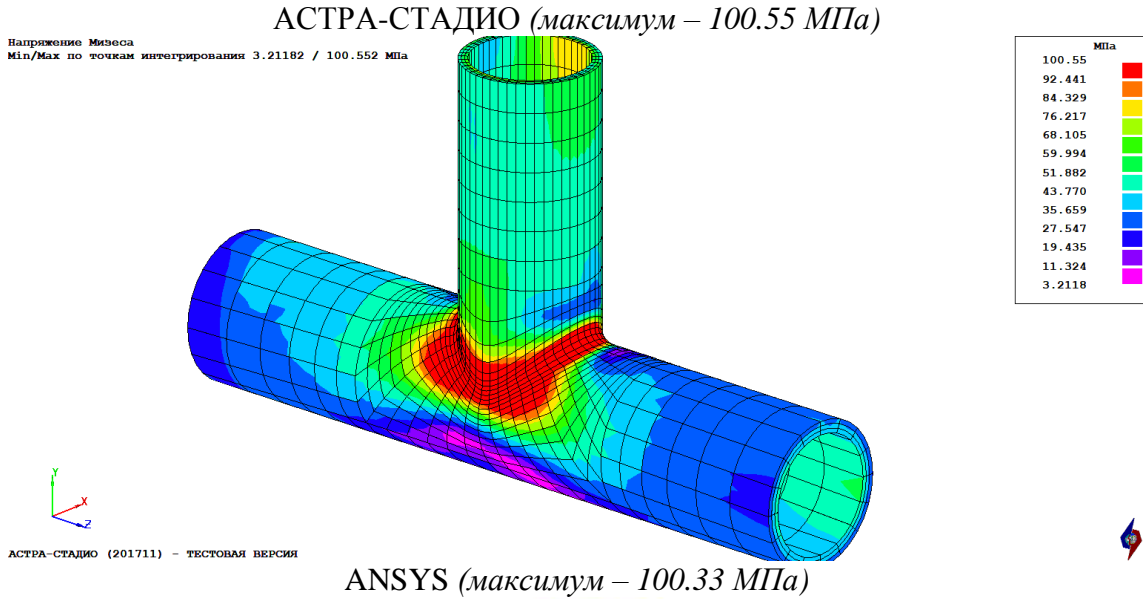
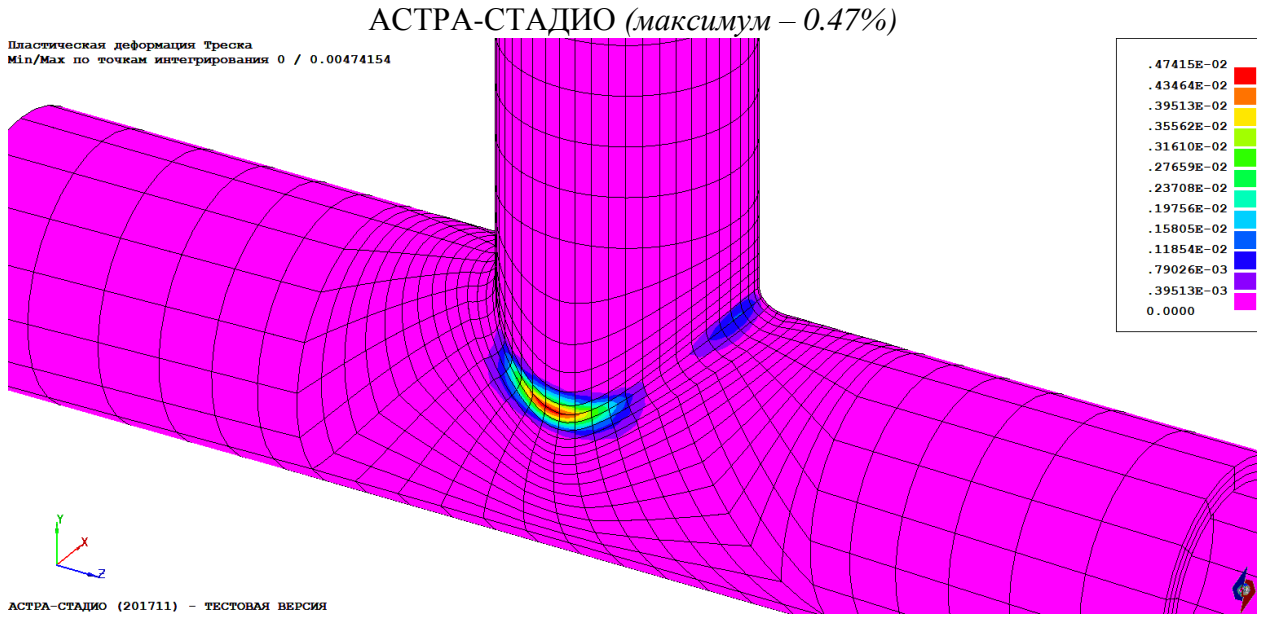


Рис. 82 Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа. Упруго-пластический расчет. Вид X-



ANSYS (максимум – 0.44%)

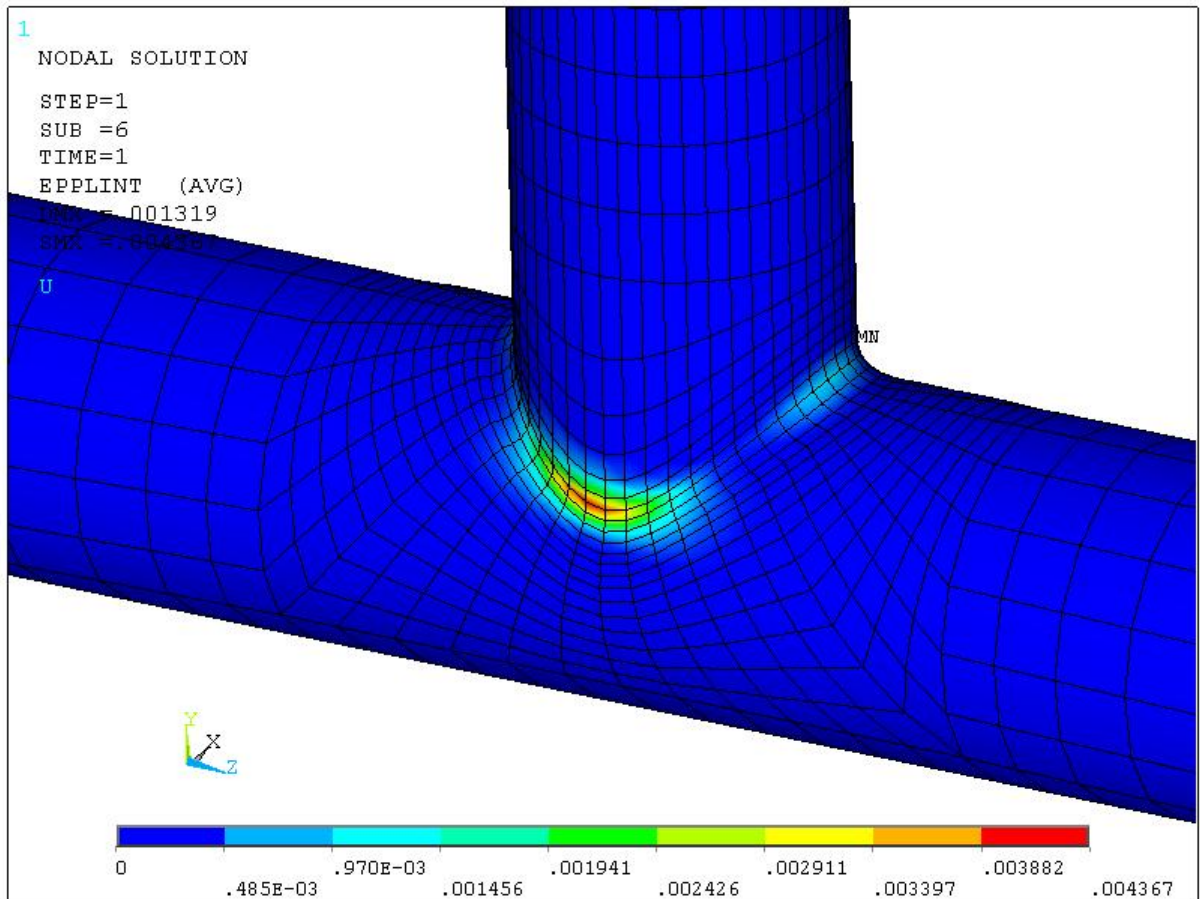


Рис. 83 Эквивалентные пластические деформации Треска. Уруго-пластический расчет

4. АСТРА-СТАДИО. Определение предельных нагрузок на основе трехмерных упруго-пластических расчетов по двум критериям. Вариантные расчеты

4.1. Прямая труба

Модель: pipe.ast

Рассматривалась тестовая задача расчета прямой трубы с отношением диаметра к толщине 25 на предельную пластическую нагрузку.

Ожидалось, что для данной задачи различные критерии определения предельной нагрузки (метод двойного упругого наклона, критерий максимума скорости изменения относительной пластической работы) дадут близкий результат, что подтверждается результатами. Оценка предельного давления по Нормам ПНАЭ Г-7-002-86 дает меньшее значение нагрузки, поскольку не учитывает упрочнение материала.

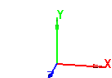
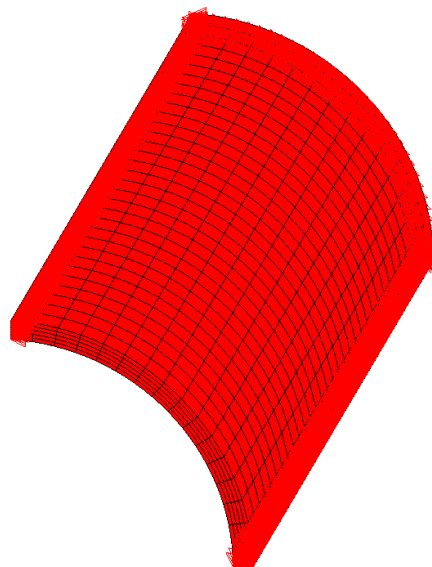
Максимальное допустимое давление по ПНАЭ Г-7-002-86:

$$p = \frac{2[\sigma]t}{D-t} = \frac{2 \cdot 100 \cdot 0.013}{0.325 - 0.013} = 8.333 \text{ МПа}$$

Исходные данные

Диаметр трубы, мм	325
Толщина стенки трубы, мм	13
Модуль упругости, МПа	$2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0.3
Предел текучести, МПа	100
Тангенциальный модуль, МПа	200
Максимальное рассматриваемое давление, МПа	15

ИПКЭ 20



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. 84 КЭ-модель трубы

<input type="checkbox"/>	Геометрия прямой трубы		
	Наружный диаметр	0.325	м
	Толщина стенки	0.013	м
<input type="checkbox"/>	Материал трубы		
	Цвет		
	Модуль упругости (Юнга)	200000	МПа
	Коэффициент Пуассона	0.3	
	Коэффициент линейного темпера	1e-005	1/град
	Плотность	0.00785	кг/м ³
	Модель материала	Билинейное изотропное	
	Предел текучести	100	МПа
	Тангенциальный модуль упругос	200	МПа
	Плакирующий слой	Нет	
	Температура на внутренней	1e-005	°C
	Задача теплопроводности	Нет	
	Рабочее давление	15	МПа

Рис. 85 Параметры задачи

	Тип КЭ	Трехмерные 20-узловые
	Перенумерация Катхилла-М	Да
	Параметры по умолчанию	Да
<input type="checkbox"/>	Количество КЭ	
	На четверти трубы	16
	По толщине в трубе	5

Рис. 86 Параметры сетки

<input type="checkbox"/>	Статика	
	Тип расчёта	
	Количество шагов по нагрузке	50
	Относительная точность для дос	0.0001
	Относительная точность для лок	1e-007
	Макс. количество итераций до р	10000
	Согласованная упруго-пластичес	Да
	Масштаб для нагрузок	1
	ГСК для интегрирования ИПКЭ	Нет
	Тип dat-файла	Новый
	Метод расчёта	Прямой (PARDISO)
	Предобуславливатель	Последовательная верх
	Относительная точность	1e-005
	Предельное число итераций	1000
<input type="checkbox"/>	Вывод в текстовый файл	
	Исходные данные	Нет
	Результаты	Нет

Рис. 87 Параметры расчета

Результаты расчёта предельной нагрузки

Критерий	Предельная нагрузка	
	коэффициент*	предельное давление, МПа
Двойной упругий наклон (TES) (Рис. 88)	0.6397	9.5955
Максимум скорости изменения относительной пластической работы (Рис. 89)	0.6423	9.6345
ПНАЭ Г-7-002-86		8.3333

*Предельное значение параметра нагрузки q

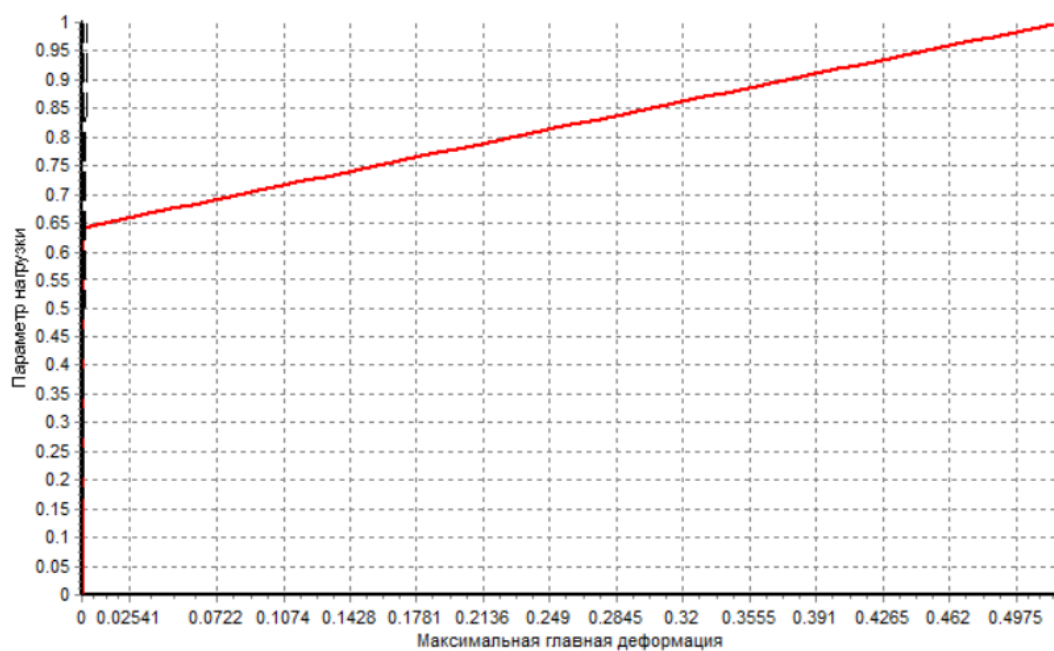


Рис. 88 Метод двойного упругого наклона

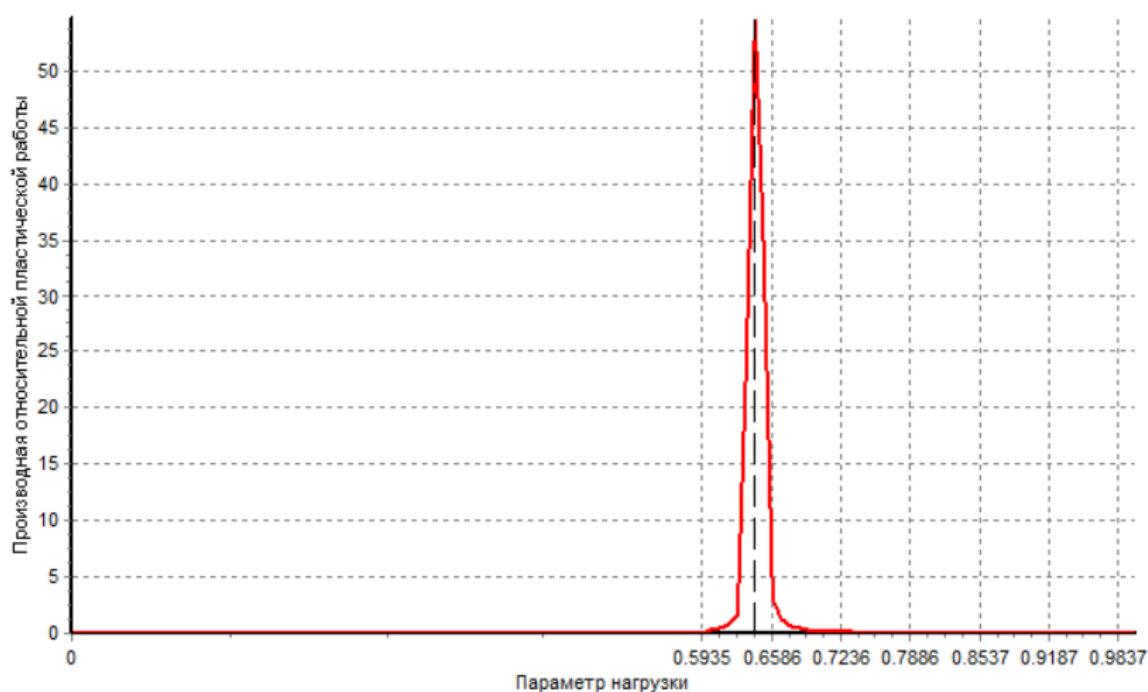


Рис. 89 Критерий максимума скорости возрастания относительной пластической работы

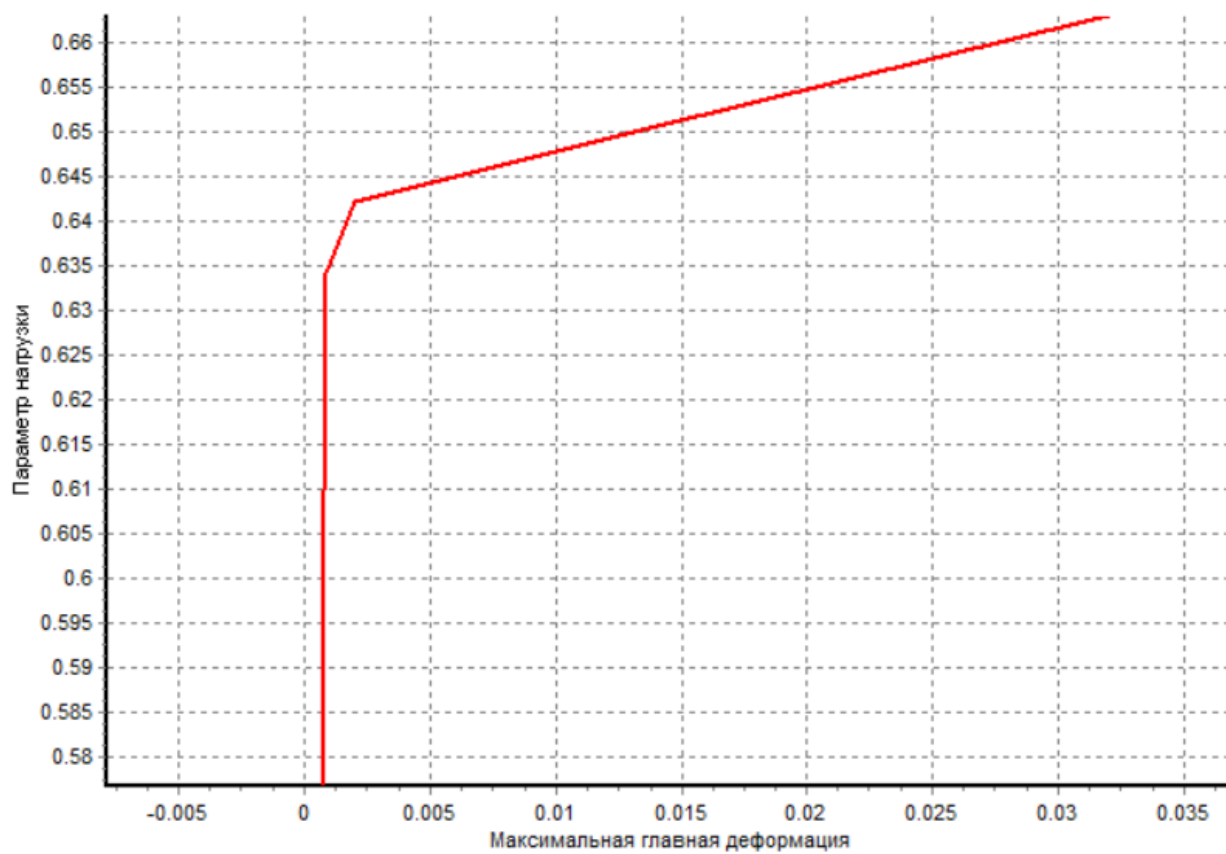
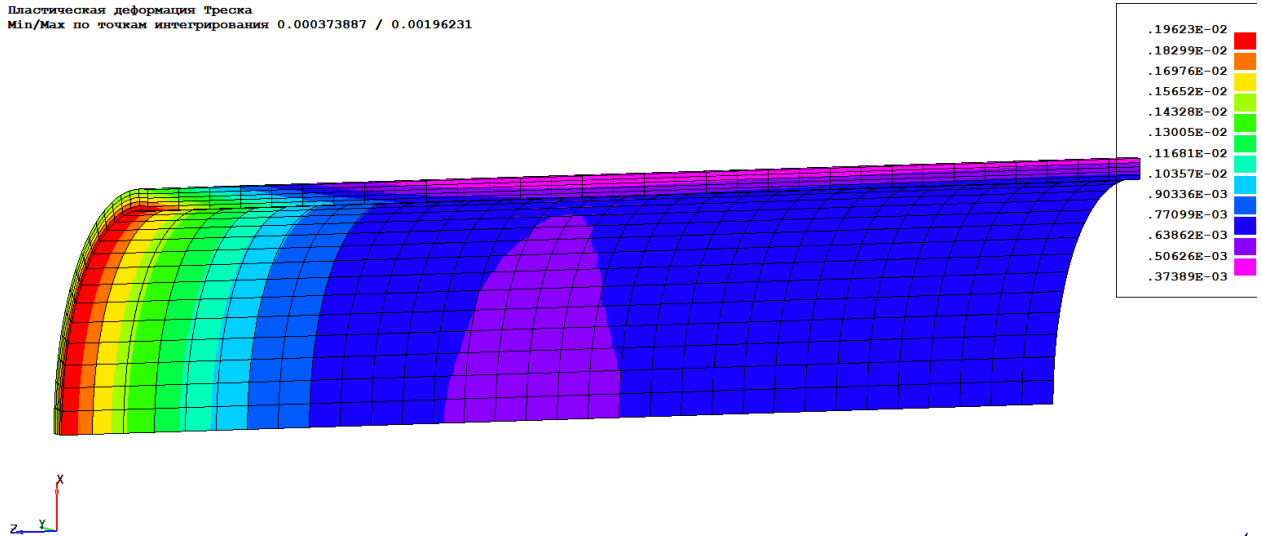


Рис. 90 График «Параметр нагрузки – максимальная главная деформация»

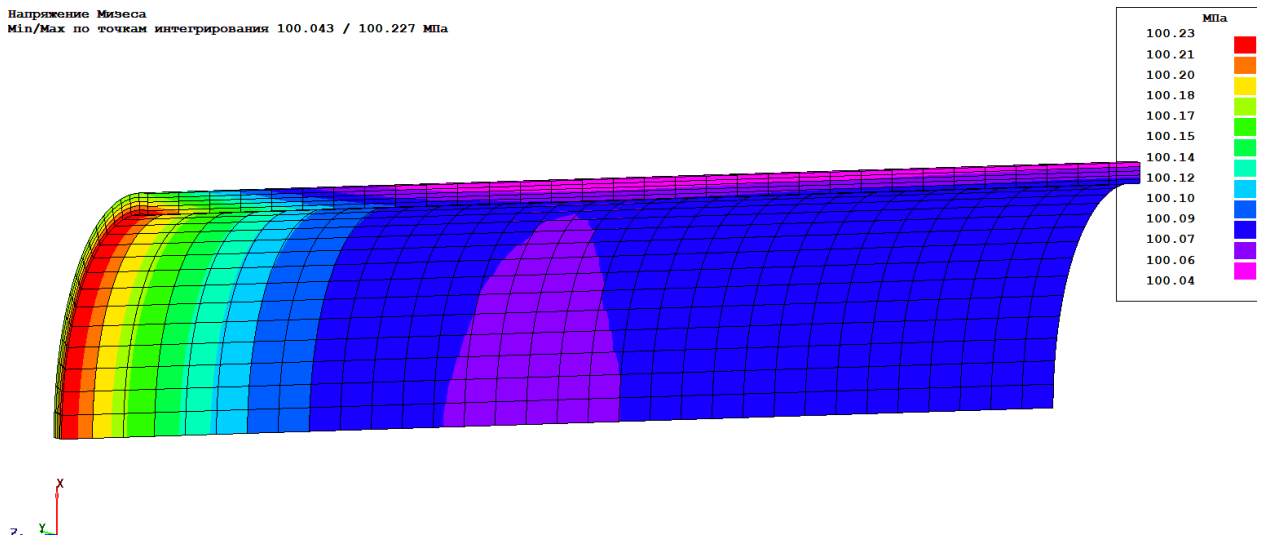
Пластическая деформация Треска
Min/Max по точкам интегрирования 0.000373887 / 0.00196231



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. 91 Эквивалентные пластические деформации Треска при предельной нагрузке $p^* = 9.6345$ МПа. Максимум – 0.20%

Напряжение Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 100.043 / 100.227 МПа



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. 92 Эквивалентные напряжения по Мизесу при предельной нагрузке $p^* = 9.6345$ МПа. Максимум – 100.23 МПа

Заключение

Для рассмотренного случая прямой трубы с отношением наружного диаметра к толщине 25 критерии двойного упругого наклона (локальный критерий) и максимума скорости изменения относительной пластической работы (интегральный критерий) дают близкие значения предельного давления, отличающиеся на 0.4%. Нормативная оценка допускаемого давления по ПНАЭ Г-7-002-86 дает меньшее на 14% значение, что можно объяснить неучетом упрочнения в данной методике.

4.2. Тройники тонко- и толстостенные, равно- и неравнопроходные

Для тестирования трехмерного упругопластического расчета по определению предельной нагрузки от действия внутреннего давления рассматривался набор тройников с различным соотношением диаметров и толщин. Результаты сведены в Табл. 7.

Равнопроходные тройники

$$D/t = 100$$

Модель: tee_D500_t5_eq.ast

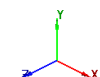
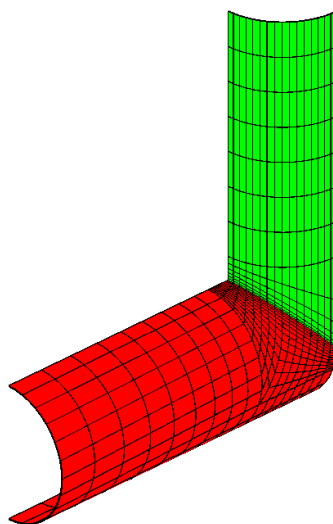
Исходные данные

Диаметр магистрали, мм	500
Толщина стенки магистрали, мм	5
Диаметр штуцера, мм	500
Толщина стенки штуцера, мм	5
Модуль упругости, МПа	$2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0.3
Предел текучести, МПа	100
Тангенциальный модуль, МПа	200
Максимальное рассматриваемое давление, МПа	0.75

Параметры КЭ-сетки

Количество узлов в элементах	20
Количество слоев по толщине	3
Количество КЭ на четверти штуцера	16
Коэффициент сгущения	1.1
Коэффициент при начальном шаге	0.1

ишкэ 20



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. 93 КЭ-модель тройника

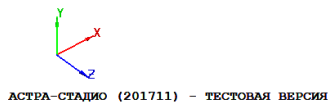
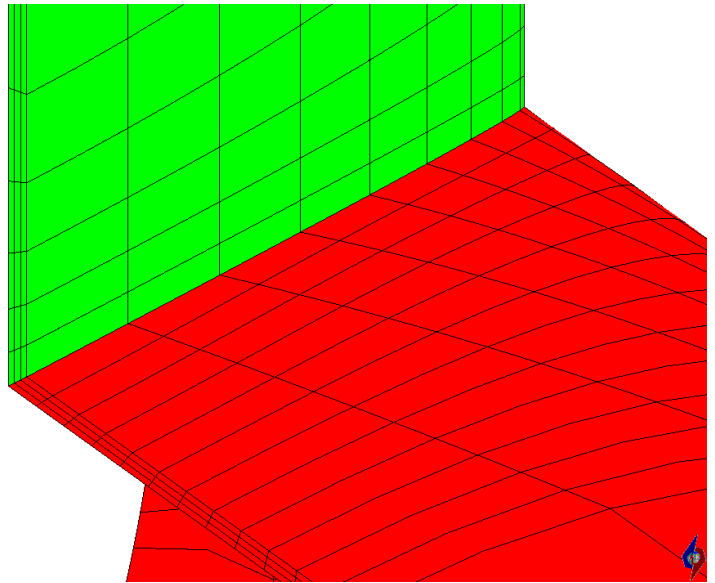


Рис. 94 КЭ-модель тройника. Зона соединения штуцера и магистрали

Результаты расчёта предельной нагрузки

Критерий	Предельная нагрузка	
	коэффициент*	значение, МПа
Двойной упругий наклон (TES) (Рис. 95)	0.5743	0.431
Максимум скорости изменения относительной пластической работы (Рис. 96)	0.6983	0.524

*Предельное значение параметра нагрузки q

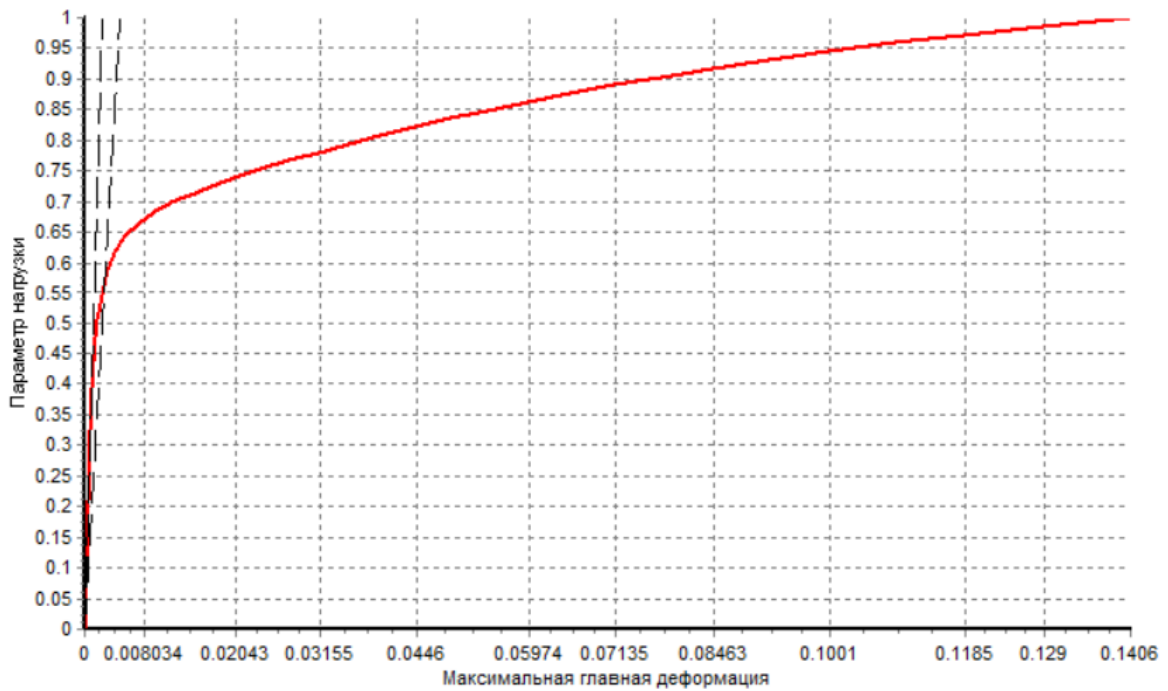


Рис. 95 Критерий двойного упругого наклона

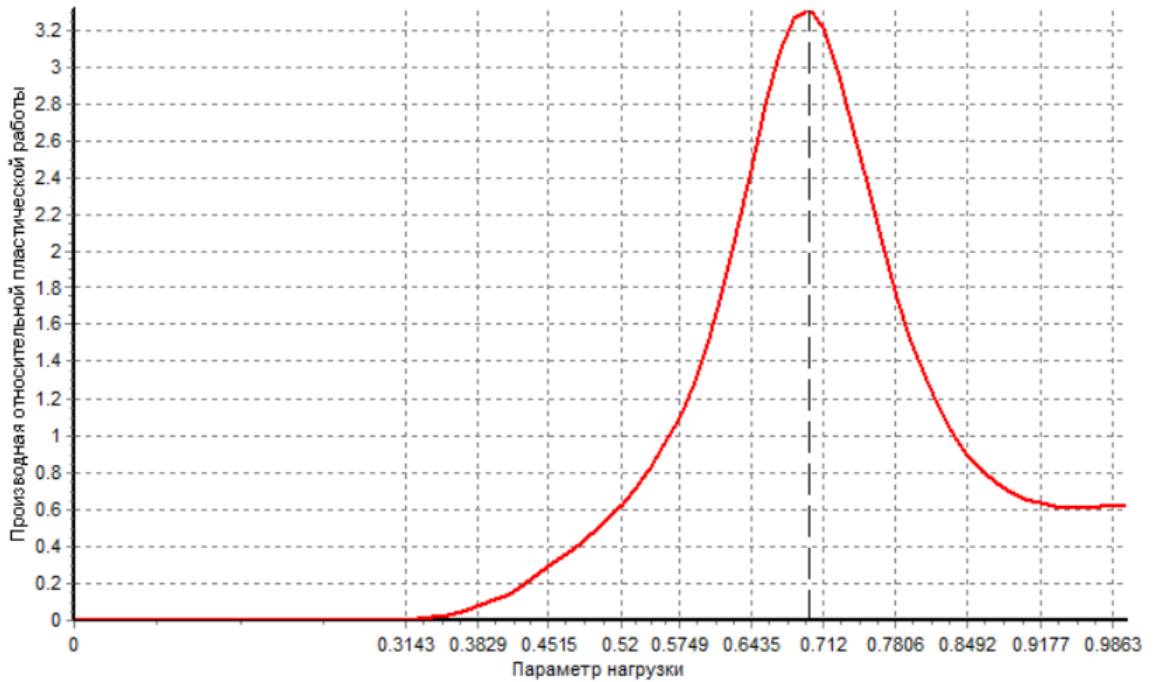


Рис. 96 Критерий максимума скорости возрастания относительной пластической работы

Пластическая деформация Треска
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.0207075

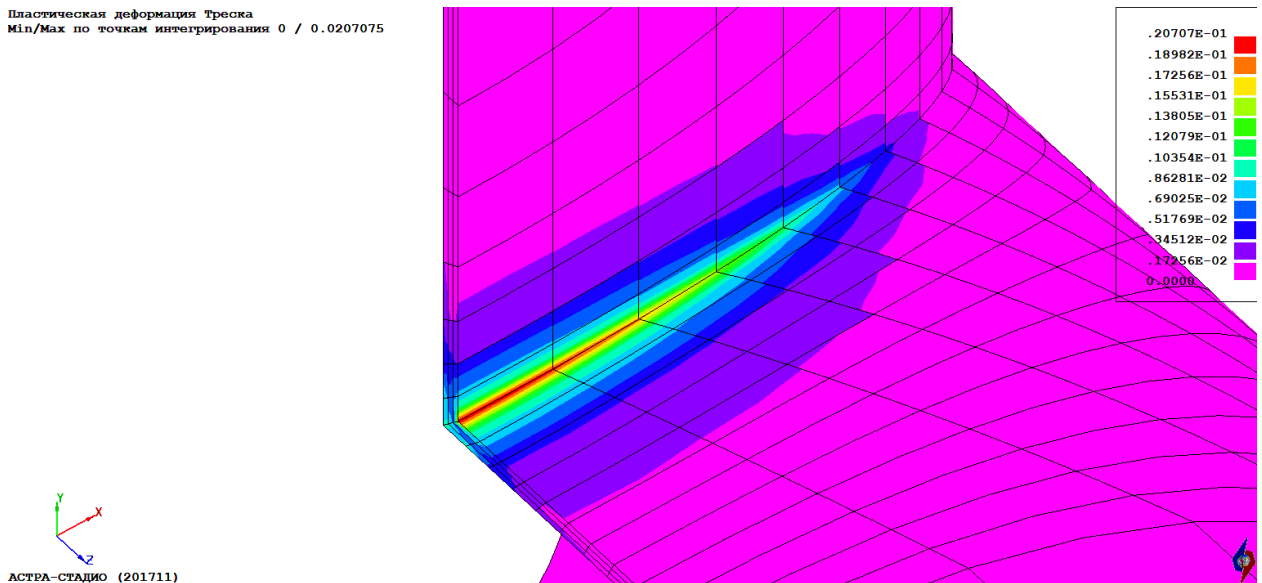


Рис. 97 Эквивалентные пластические деформации Треска при предельном давлении по критерию максимума скорости изменения относительной пластической работы

$$p^* = 0.524 \text{ МПа. Максимум} - 2.07\%$$

Визуализация результатов – по ближайшей точке интегрирования без осреднения

Расчет допустимого давления по ПНАЭ Г-7-002-86

средний диаметр:

$$D_m = D - t = 500 - 5 = 495 \text{ мм}$$

коэффициент снижения прочности:

$$\varphi = \frac{2}{\frac{d}{\sqrt{D_m \cdot t}} + 1.75} = \frac{2}{\frac{500}{\sqrt{495 \cdot 5}} + 1.75} = 0.1695$$

допустимое давление:

$$p = \frac{2\varphi[\sigma]t}{D-t} = \frac{2 \cdot 0.1695 \cdot 100 \cdot 0.005}{0.500 - 0.005} = 0.3424 \text{ МПа}$$

$$D/t = 50$$

Модель: tee_D500_t10_eq.ast

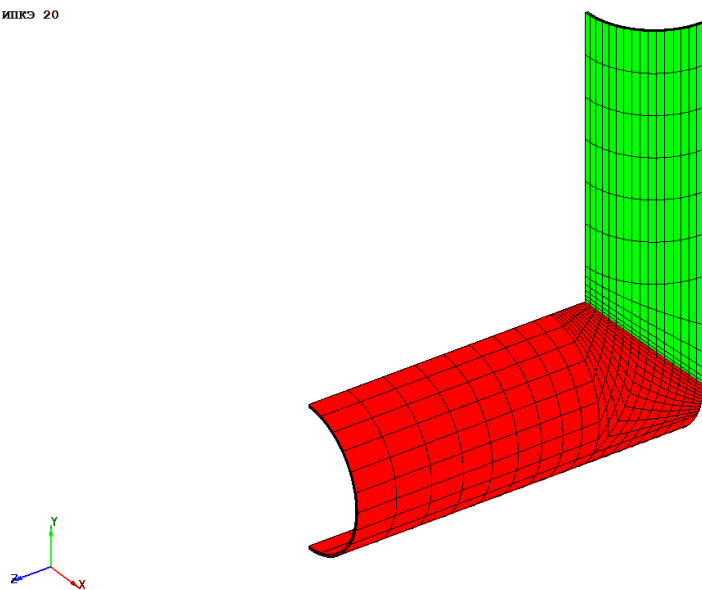
Исходные данные

Диаметр магистрали, мм	500
Толщина стенки магистрали, мм	10
Диаметр штуцера, мм	500
Толщина стенки штуцера, мм	10
Модуль упругости, МПа	$2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0.3
Предел текучести, МПа	100
Тангенциальный модуль, МПа	200
Максимальное рассматриваемое давление, МПа	2

Параметры КЭ-сетки

Количество узлов в элементах	20
Количество слоев по толщине	3
Количество КЭ на четверти штуцера	16
Коэффициент сгущения	1.1
Коэффициент при начальном шаге	0.1

ишкэ 20



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. 98 КЭ-модель тройника

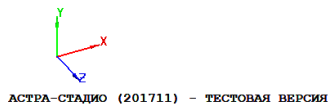
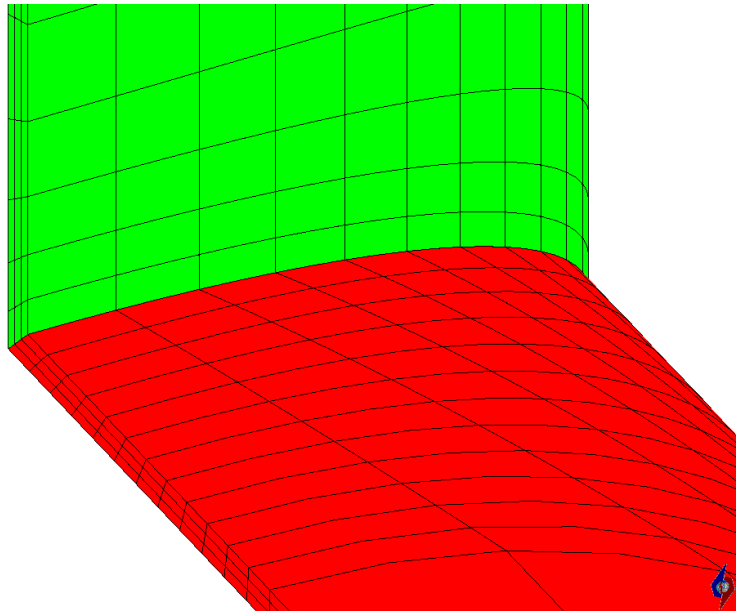


Рис. 99 КЭ-модель тройника. Зона соединения штуцера и магистрали

Результаты расчёта предельной нагрузки

Критерий	Предельная нагрузка	
	коэффициент*	значение, МПа
Двойной упругий наклон (TES) (Рис. 100)	0.5965	1.1930
Максимум скорости изменения относительной пластической работы (Рис. 101)	0.7136	1.4272

*Предельное значение параметра нагрузки q

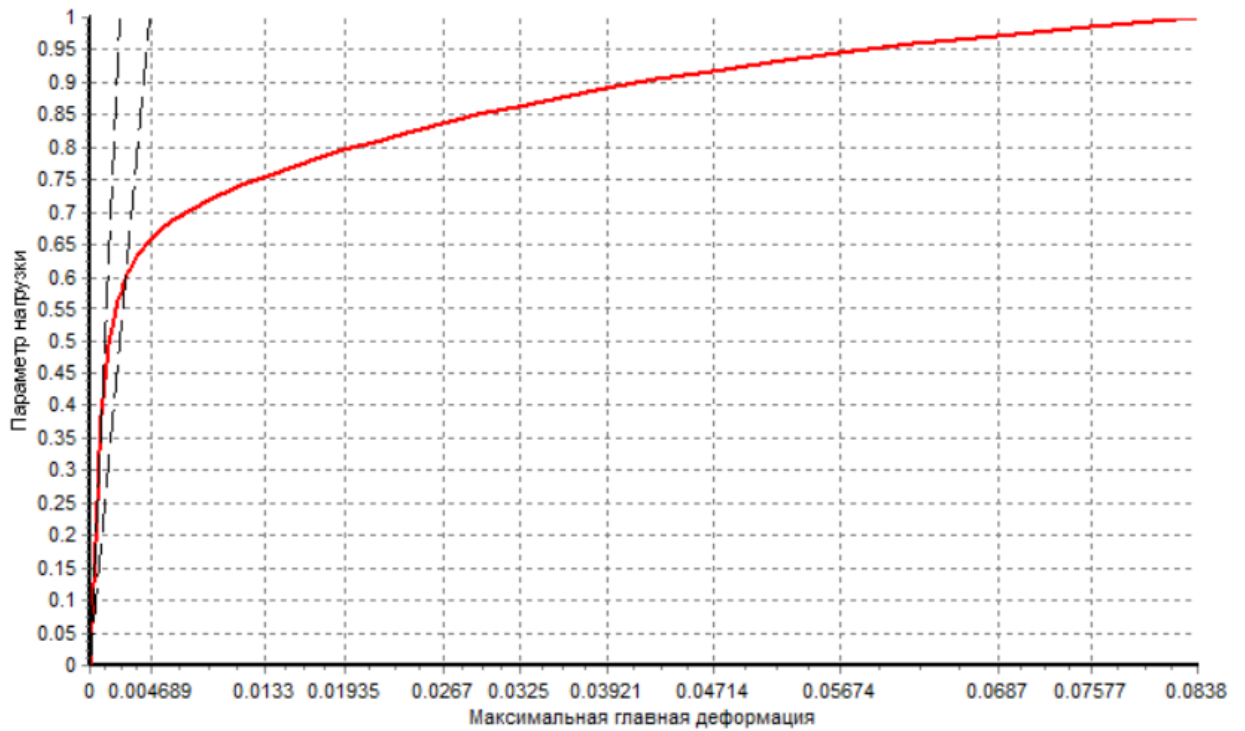


Рис. 100 Критерий двойного упругого наклона

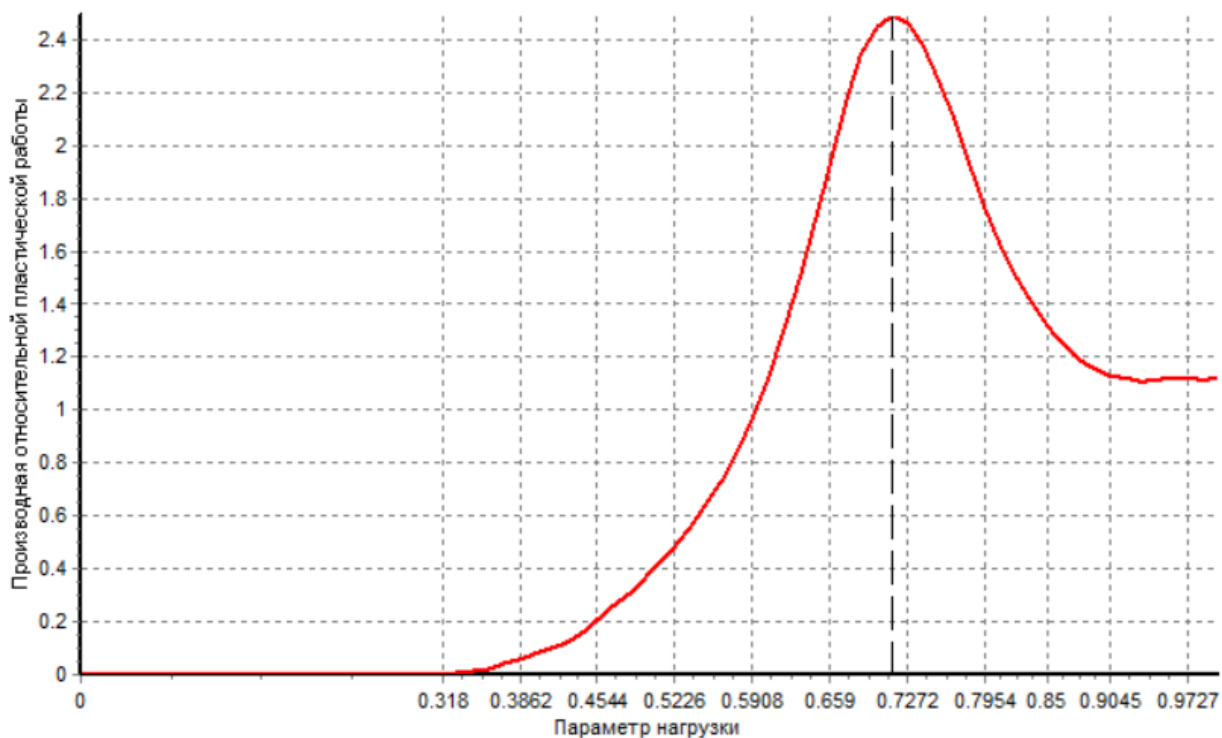


Рис. 101 Критерий максимума скорости изменения относительной пластической работы

Пластическая деформация Треска
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.0154971

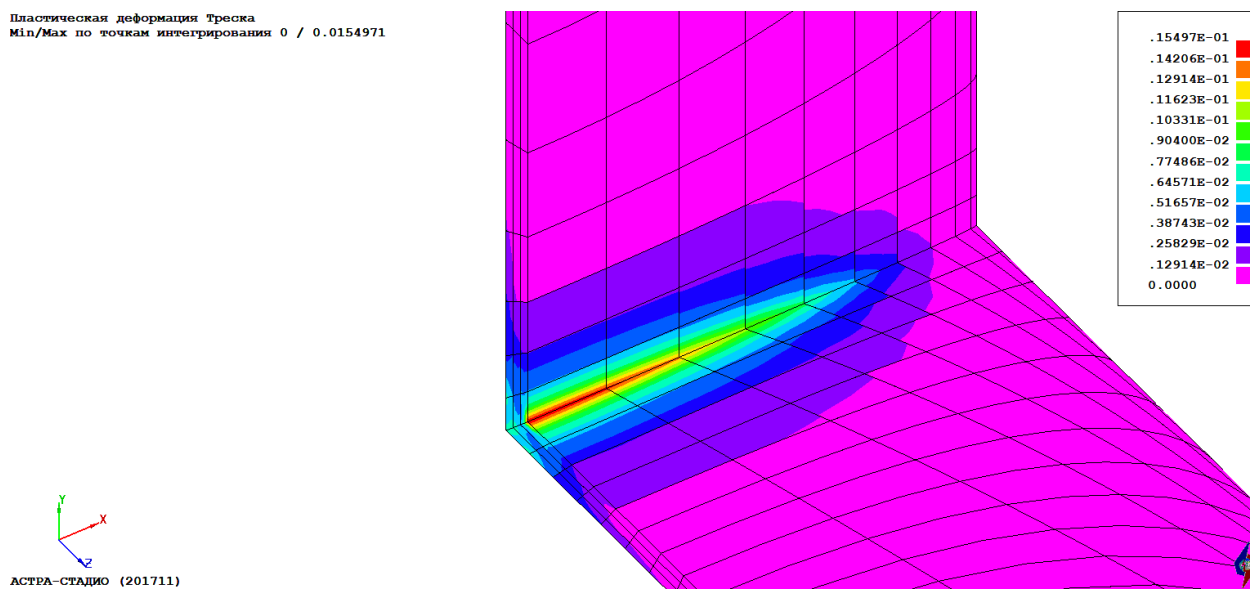


Рис. 102 Эквивалентные пластические деформации (Треска) при предельной нагрузке по критерию скорости изменения относительной пластической работы

$p^* = 1.4272$ МПа. Максимум – 1.55%

Визуализация результатов – по ближайшей точке интегрирования без осреднения

$$D/t = 25$$

Модель: tee_D500_t20_eq.ast

Исходные данные

Диаметр магистрали, мм	500
Толщина стенки магистрали, мм	20
Диаметр штуцера, мм	500
Толщина стенки штуцера, мм	20
Модуль упругости, МПа	$2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0.3
Предел текучести, МПа	100
Тангенциальный модуль, МПа	200
Максимальное рассматриваемое давление, МПа	6

Параметры КЭ-сетки

Количество узлов в элементах	20
Количество слоев по толщине	5
Количество КЭ на четверти штуцера	16
Коэффициент сгущения	1.1
Коэффициент при начальном шаге	0.1

ишкэ 20



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

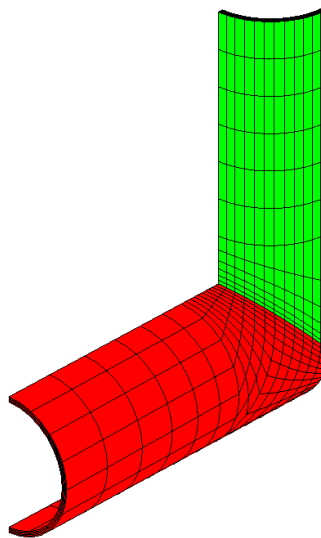


Рис. 103 КЭ-модель тройника

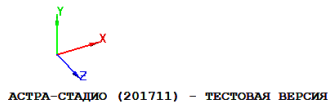
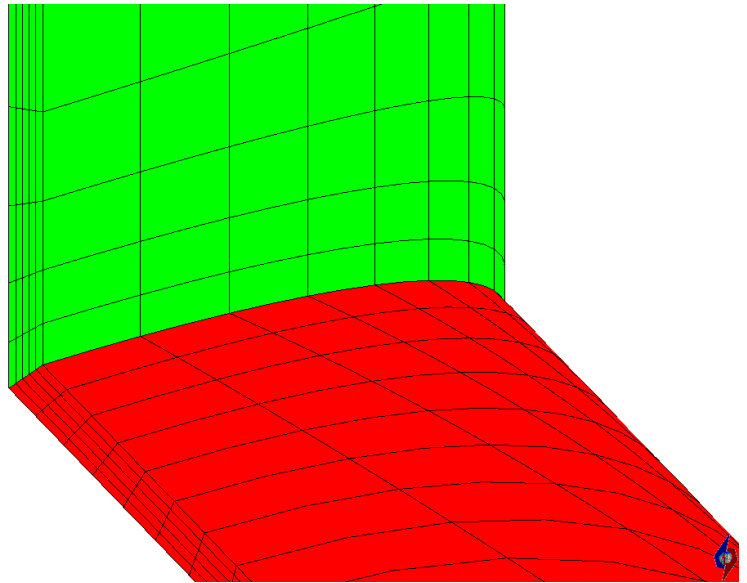


Рис. 104 КЭ-модель тройника. Зона соединения штуцера и магистрали

Результаты расчёта предельной нагрузки

Критерий	Предельная нагрузка	
	коэффициент*	значение, МПа
Двойной упругий наклон (TES) (Рис. 105)	0.5619	3.3714
Максимум скорости изменения относительной пластической работы (Рис. 106)	0.6645/0.8831	5.2986

*Предельное значение параметра нагрузки q

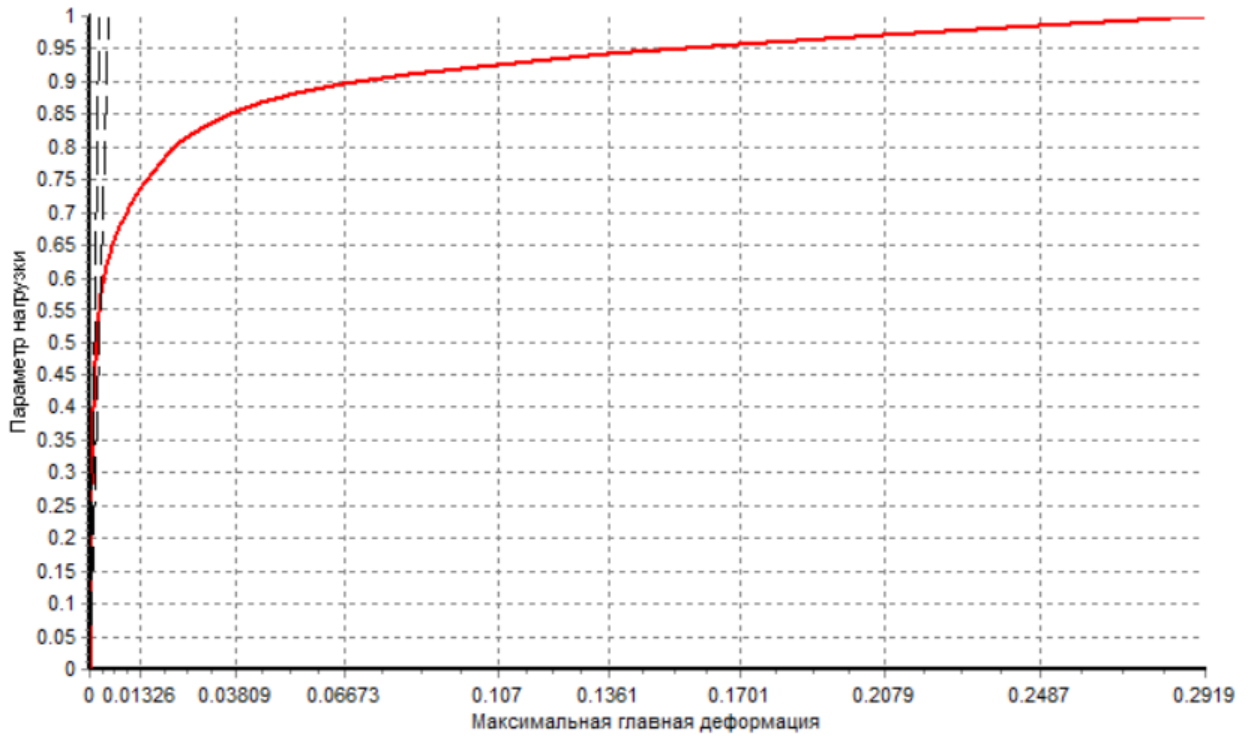


Рис. 105 Критерий двойного упругого наклона

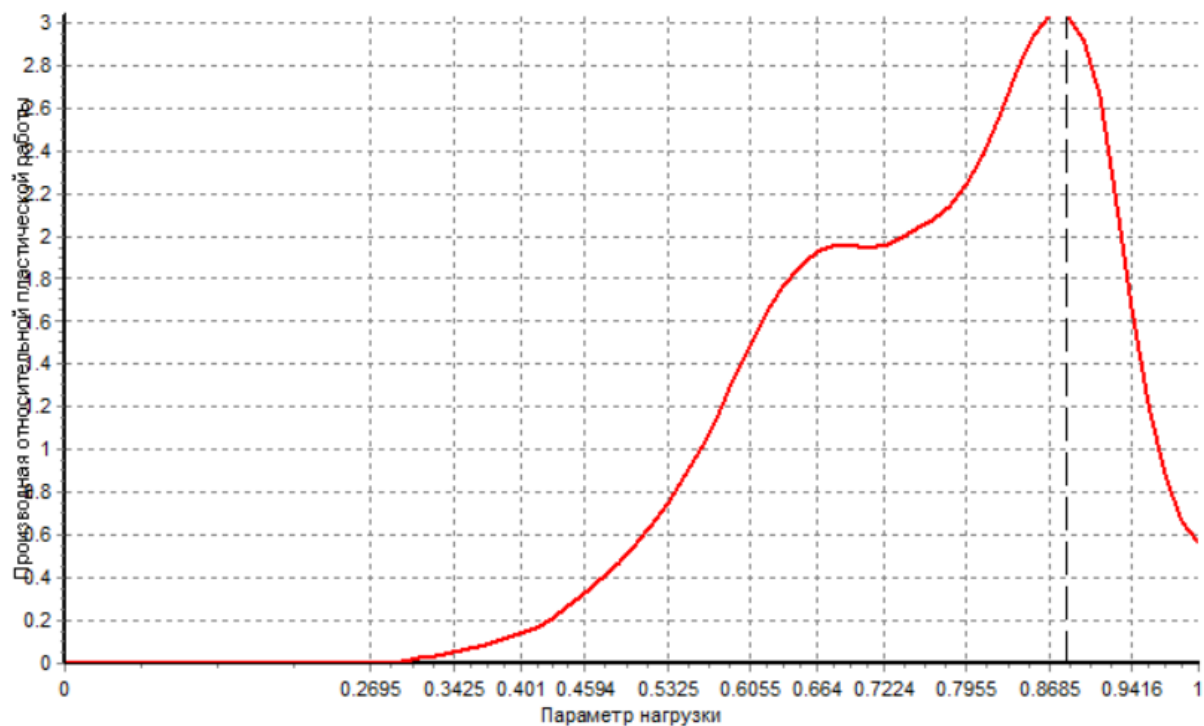


Рис. 106 Критерий максимума скорости изменения относительной пластической работы

Пластическая деформация Треска
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.109911

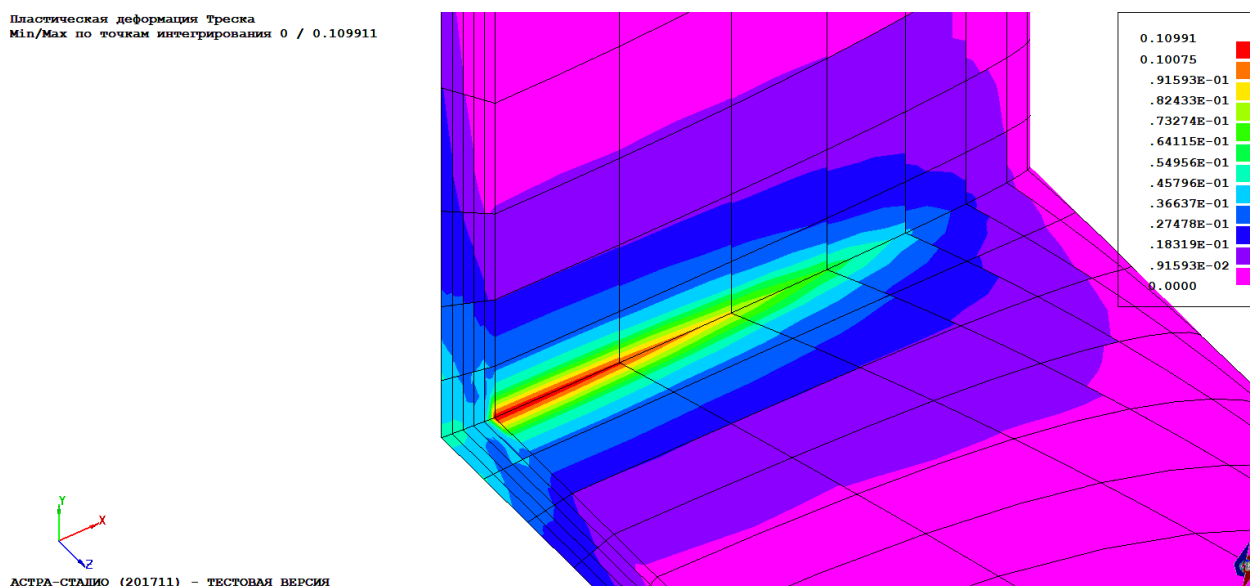


Рис. 107 Эквивалентные пластические деформации (Треска) при предельной нагрузке по критерию максимума скорости изменения относительной пластической работы

$p_* = 5.2986$ МПа. Максимум – 10.99%

Визуализация результатов – по ближайшей точке интегрирования без осреднения

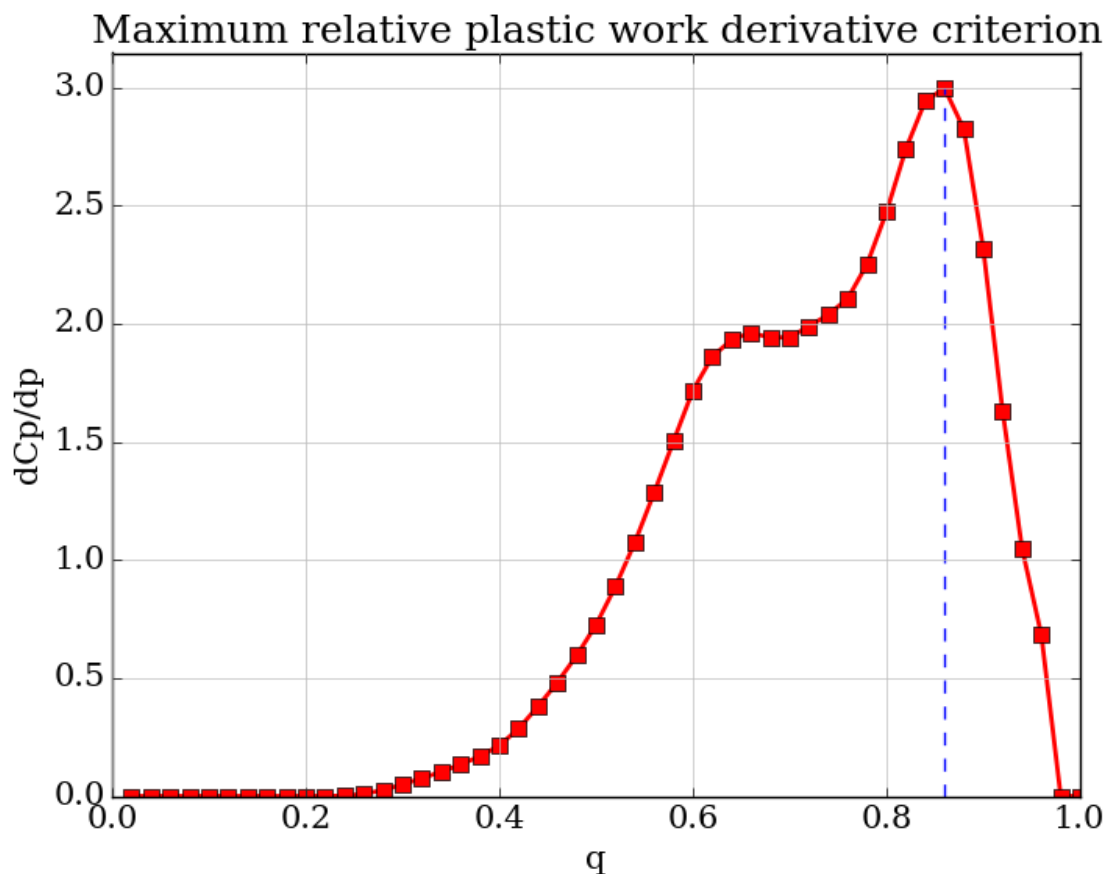


Рис. 108 Критерий максимума скорости возрастания относительной пластической работы. По результатам расчета в ANSYS. Предельное пластическое давление $p^* = 0.860$

$$D/t = 10$$

Модель: tee_D500_t50_eq.ast

Исходные данные

Диаметр магистрали, мм	500
Толщина стенки магистрали, мм	50
Диаметр штуцера, мм	500
Толщина стенки штуцера, мм	50
Модуль упругости, МПа	$2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0.3
Предел текучести, МПа	100
Тангенциальный модуль, МПа	200
Максимальное рассматриваемое давление, МПа	20

Параметры КЭ-сетки

Количество узлов в элементах	20
Количество слоев по толщине	7
Количество КЭ на четверти штуцера	16
Коэффициент сгущения	1.1
Коэффициент при начальном шаге	0.1

ИПКЭ 20



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

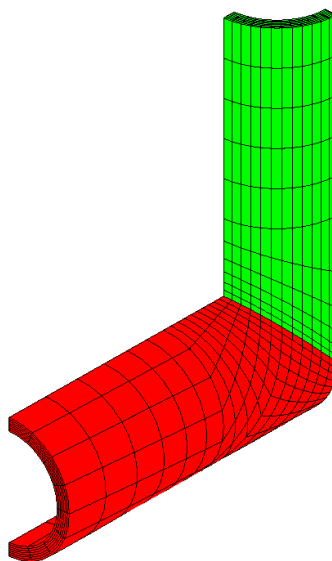


Рис. 109 КЭ-модель тройника

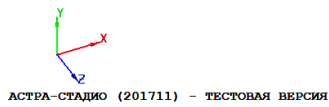
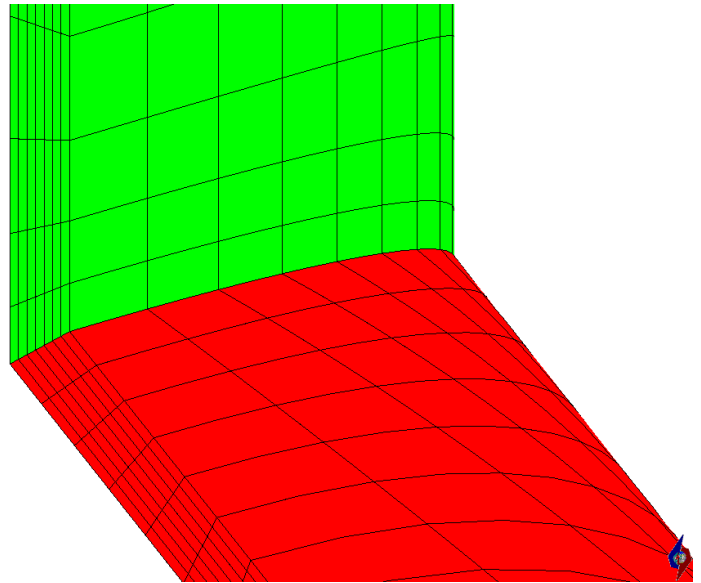


Рис. 110 КЭ-модель тройника. Зона соединения штуцера и магистрали

Результаты расчёта предельной нагрузки

Критерий	Предельная нагрузка	
	коэффициент*	значение, МПа
Двойной упругий наклон (TES) (Рис. 111)	0.6221	12.442
Максимум скорости изменения относительной пластической работы (Рис. 112)	0.8711	17.422

*Предельное значение параметра нагрузки q

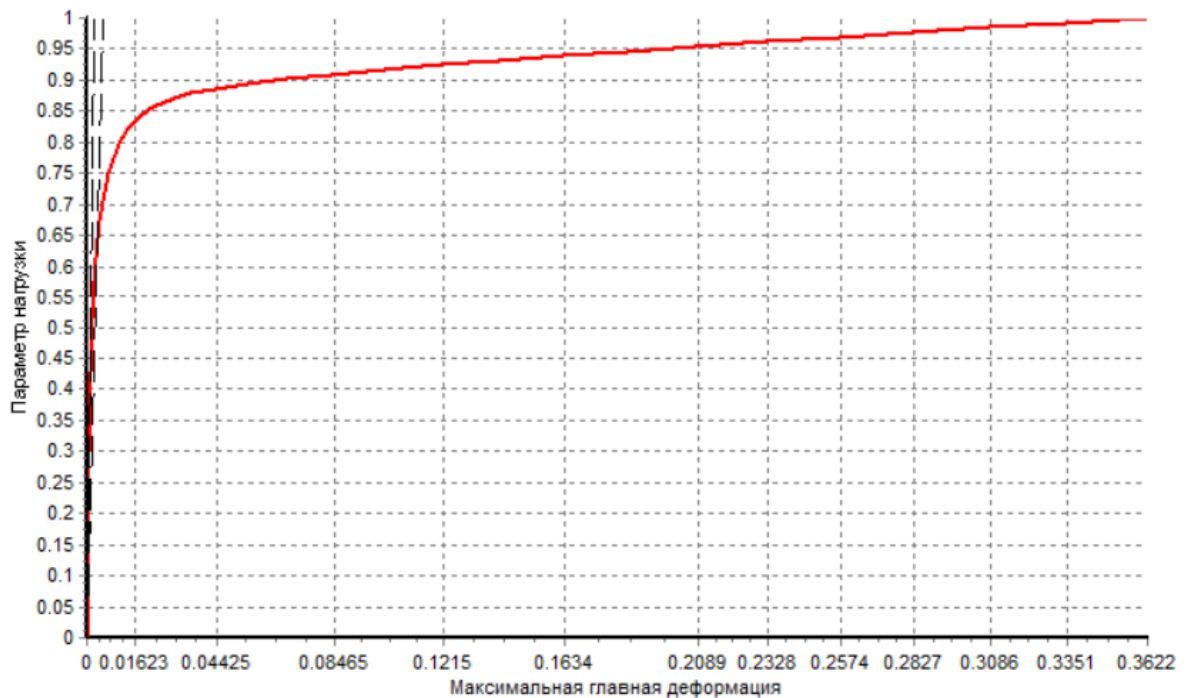


Рис. 111 Критерий двойного упругого наклона

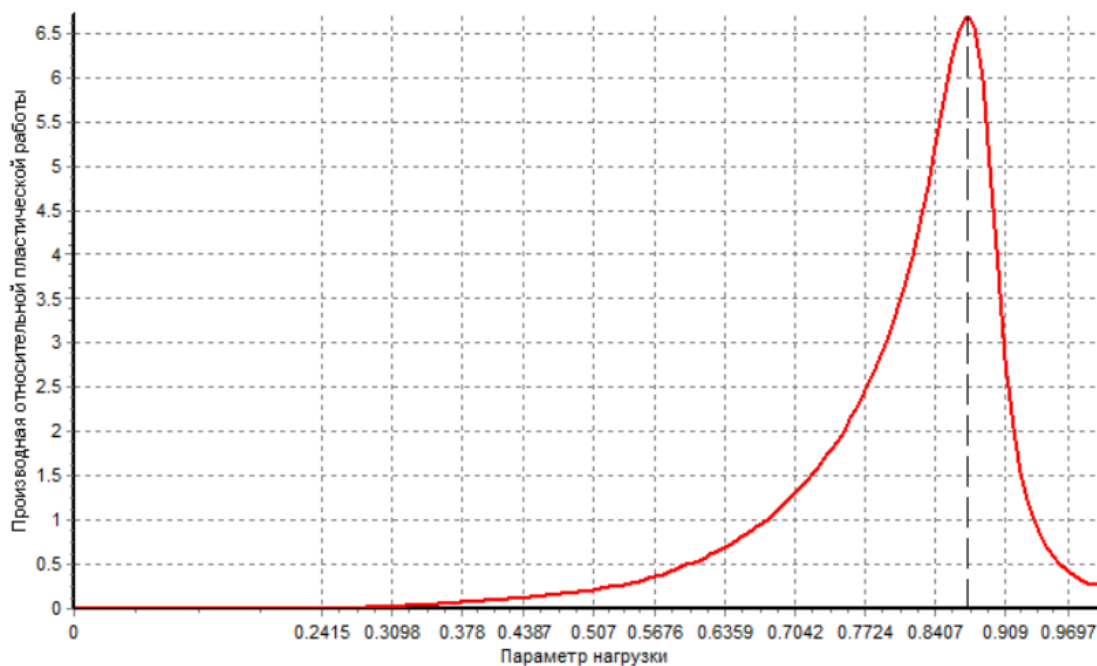
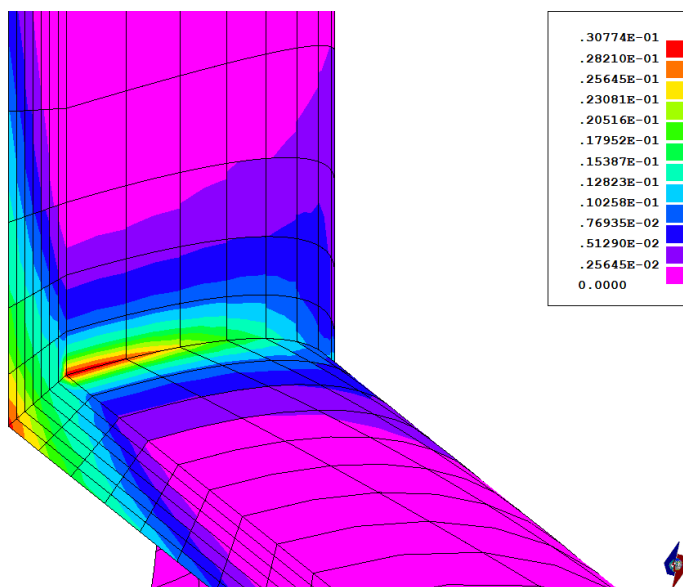


Рис. 112 Критерий максимума скорости возрастания относительной пластической работы

Пластическая деформация Треска
 Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.0307741



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. 113 Эквивалентные пластические деформации (Треска) при предельной нагрузке по критерию максимума скорости изменения относительной пластической работы

$p^* = 17.422$ МПа. Максимум – 3.08%

Визуализация результатов – по ближайшей точке интегрирования без осреднения

Неравнопроходные тройники

$D/t = 100$

Модель: tee_D500_t5_d250_t2.5.ast

Исходные данные

Диаметр магистрали, мм	500
Толщина стенки магистрали, мм	5
Диаметр штуцера, мм	250
Толщина стенки штуцера, мм	2.5
Модуль упругости, МПа	$2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0.3
Предел текучести, МПа	100
Тангенциальный модуль, МПа	200
Максимальное рассматриваемое давление, МПа	0.78

Параметры КЭ-сетки

Количество узлов в элементах	20
Количество слоев по толщине	3
Количество КЭ на четверти штуцера	16
Коэффициент сгущения	1.1
Коэффициент при начальном шаге	0.1

ИПКЭ 20



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

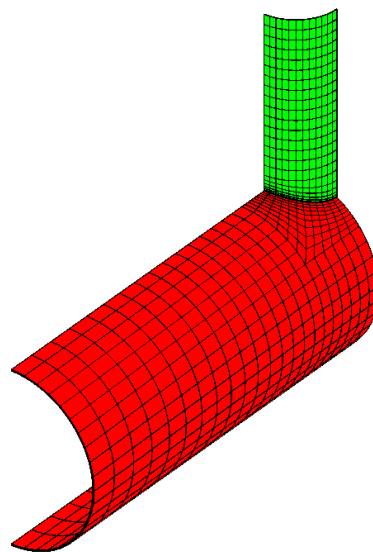
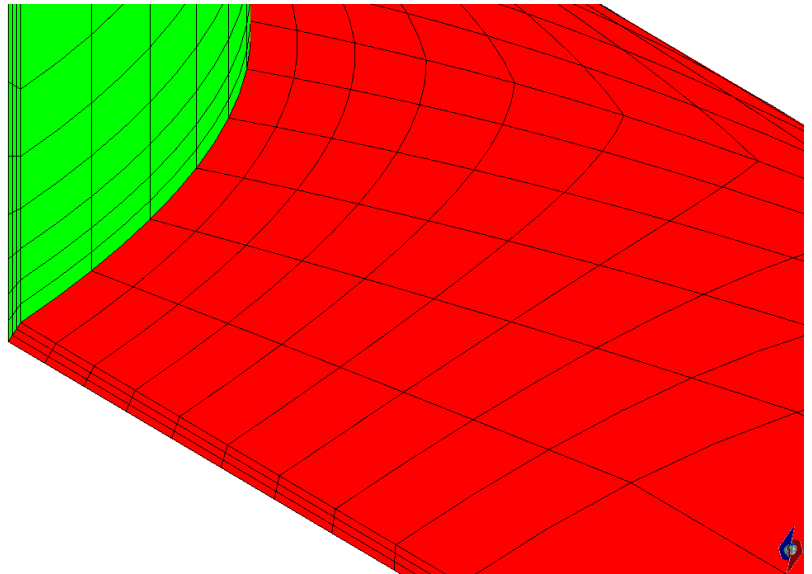


Рис. 114 КЭ-модель тройника





АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. 115 КЭ-модель тройника. Зона соединения штуцера и магистрали

Результаты расчёта предельной нагрузки

Критерий	Предельная нагрузка	
	коэффициент*	значение, МПа
Двойной упругий наклон (TES) (Рис. 116)	0.6216	0.4848
Максимум скорости изменения относительной пластической работы (Рис. 117)	0.8408	0.6558

*Предельное значение параметра нагрузки q

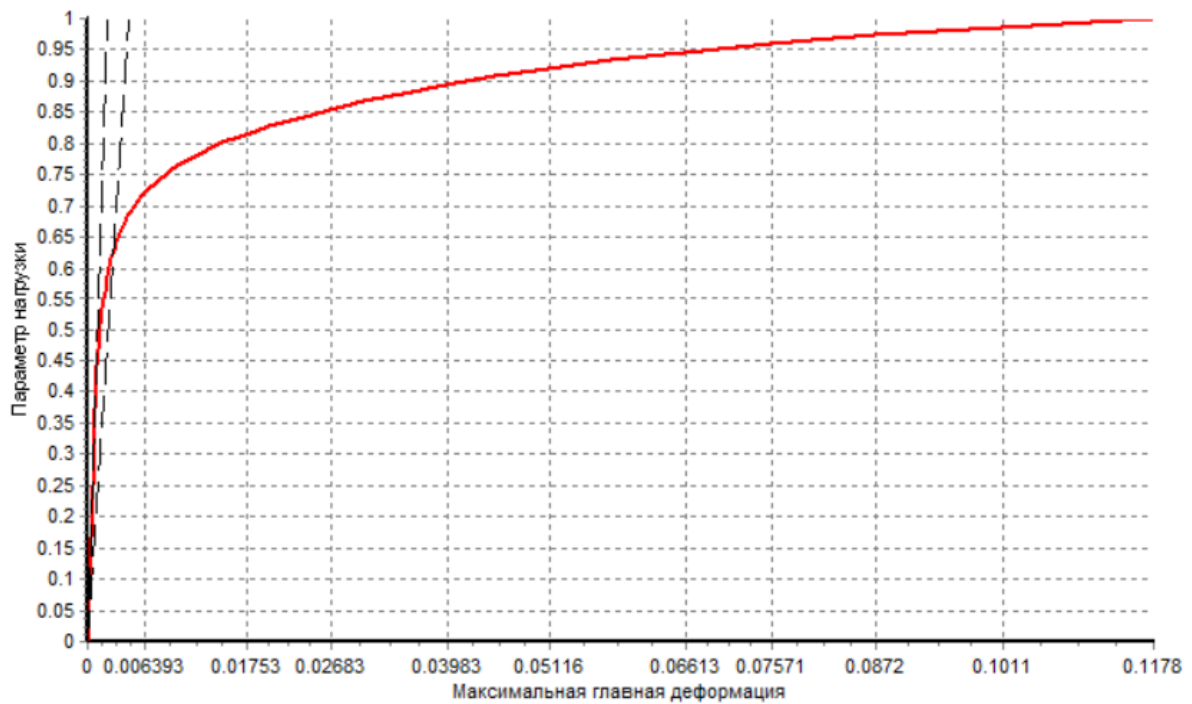


Рис. 116 Критерий двойного упругого наклона

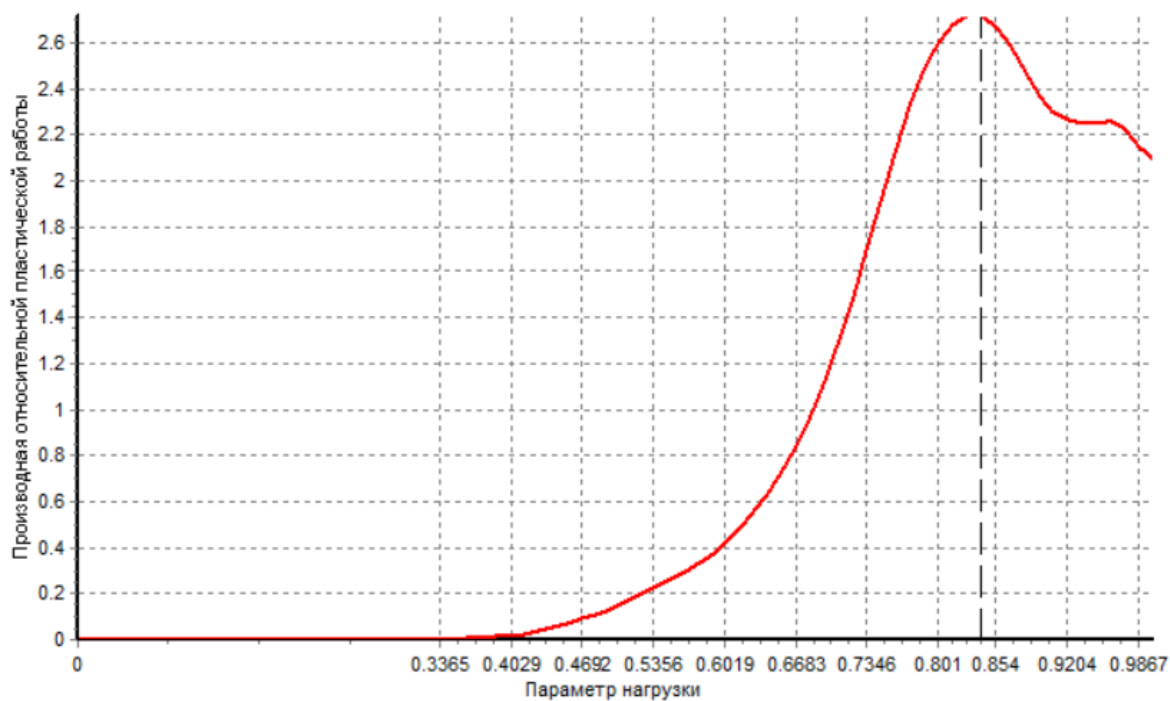
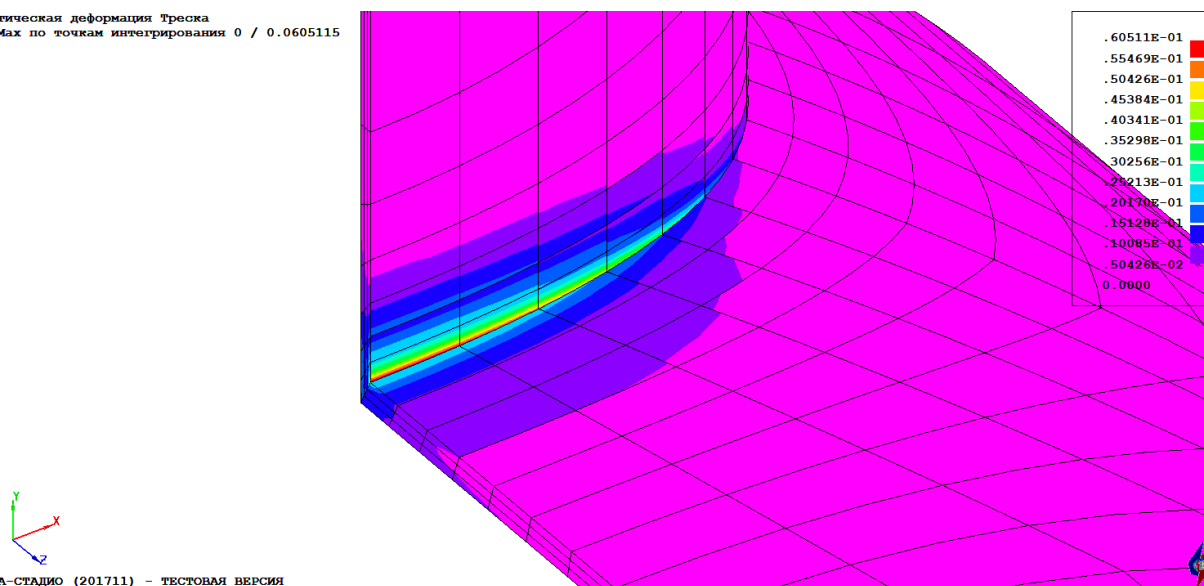


Рис. 117 Критерий максимума скорости возрастания относительной пластической работы

Пластическая деформация Треска
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.0605115



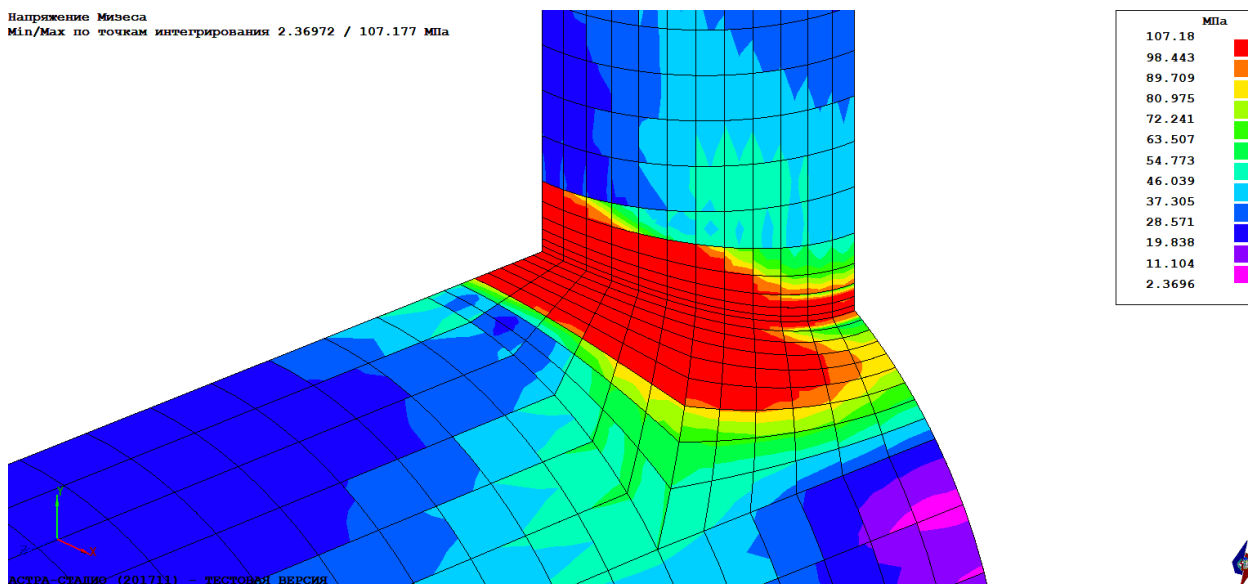
АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. 118 Эквивалентные пластические деформации (Треска) при предельной нагрузке по критерию максимума скорости изменения относительной пластической работы

$p^* = 0.6558$ МПа. Максимум – 6.05%

Визуализация результатов – по ближайшей точке интегрирования без осреднения

Напряжение Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 2.36972 / 107.177 МПа



Напряжение Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 2.36972 / 107.177 МПа

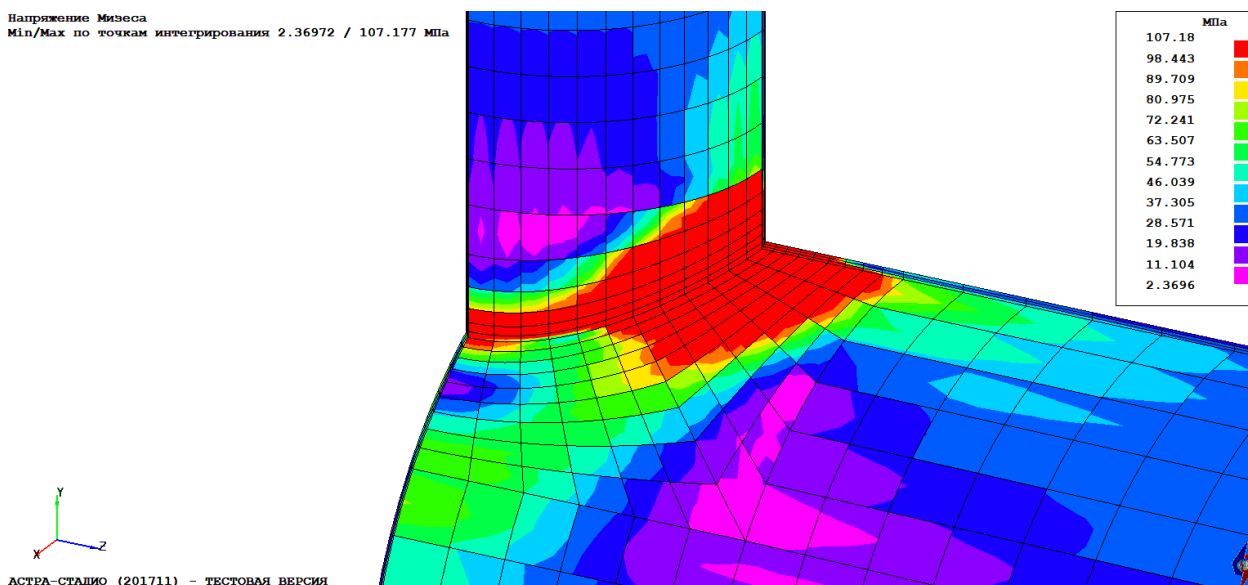


Рис. 119 Эквивалентные напряжения (Мизес) при предельной нагрузке по критерию максимума скорости изменения относительной пластической работы $p^* = 0.6558$ МПа. Максимум – 107.18 МПа
Визуализация результатов – по ближайшей точке интегрирования без осреднения

$$D/t = 50$$

Модель: tee_D500_t10_d250_t5.ast

Исходные данные

Диаметр магистрали, мм	500
Толщина стенки магистрали, мм	10
Диаметр штуцера, мм	250
Толщина стенки штуцера, мм	5
Модуль упругости, МПа	$2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0.3
Предел текучести, МПа	100
Тангенциальный модуль, МПа	200
Максимальное рассматриваемое давление, МПа	2.5

Параметры КЭ-сетки

Количество узлов в элементах	20
Количество слоев по толщине	3
Количество КЭ на четверти штуцера	16
Коэффициент сгущения	1.1
Коэффициент при начальном шаге	0.1

ишкэ 20



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

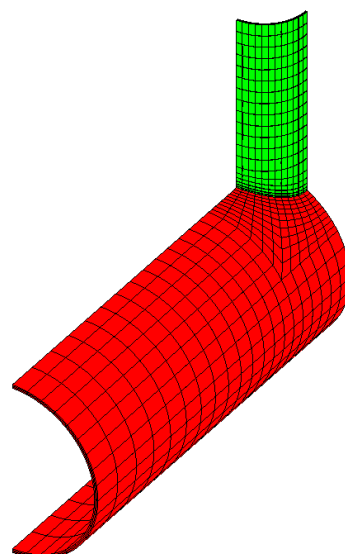


Рис. 120 КЭ-модель тройника

ИПКЭ 20

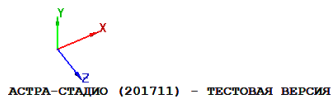
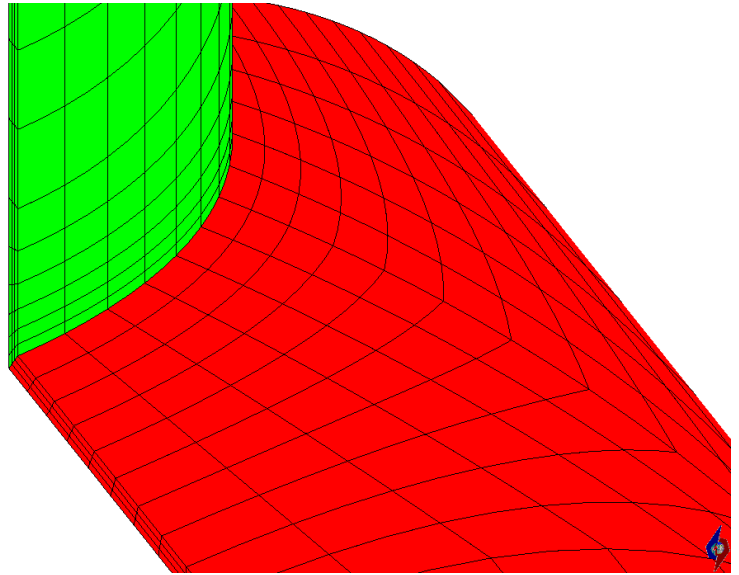


Рис. 121 КЭ-модель тройника. Зона соединения штуцера и магистрали

Результаты расчёта предельной нагрузки

Критерий	Предельная нагрузка	
	коэффициент*	значение, МПа
Двойной упругий наклон (ТЭС) (Рис. 122)	0.5222	1.3055
Максимум скорости изменения относительной пластической работы (Рис. 123)	0.7995	1.9987

*Предельное значение параметра нагрузки q

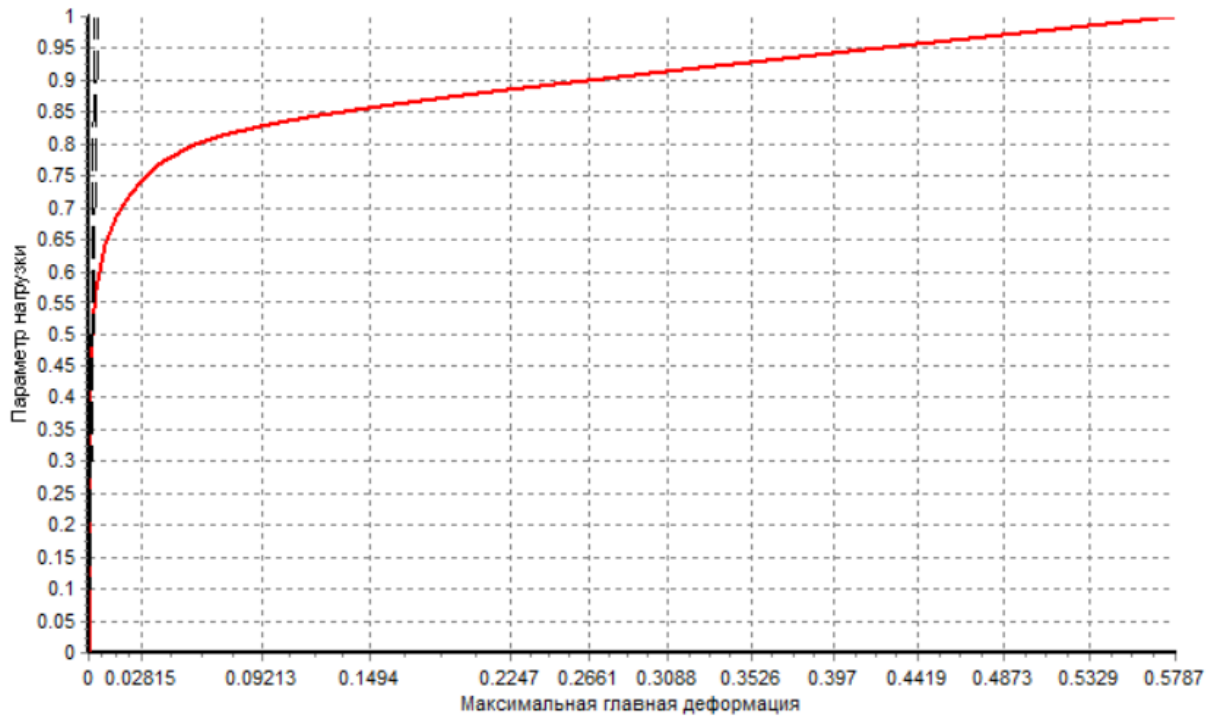


Рис. 122 Критерий двойного упругого наклона

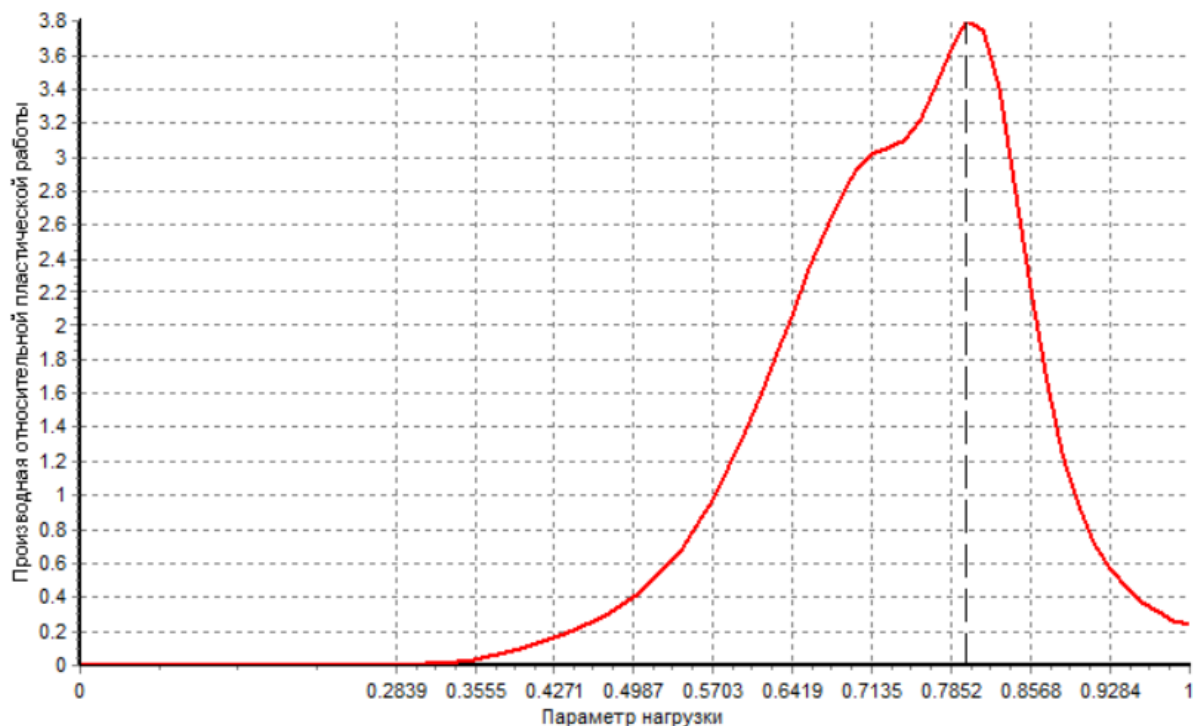


Рис. 123 Критерий максимума скорости возрастания относительной пластической работы

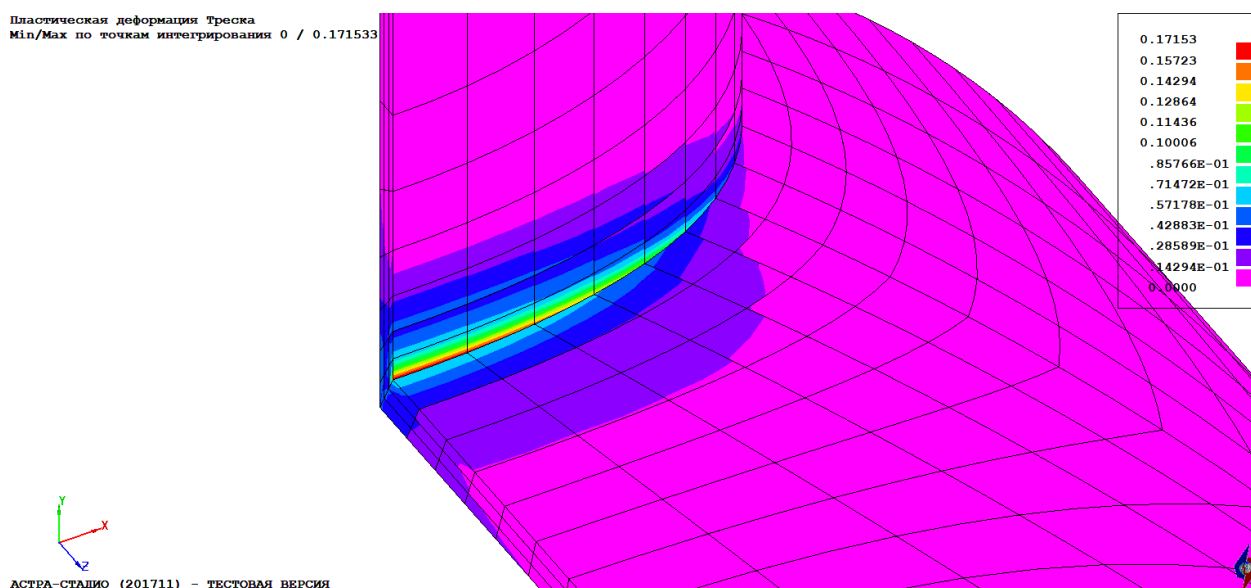
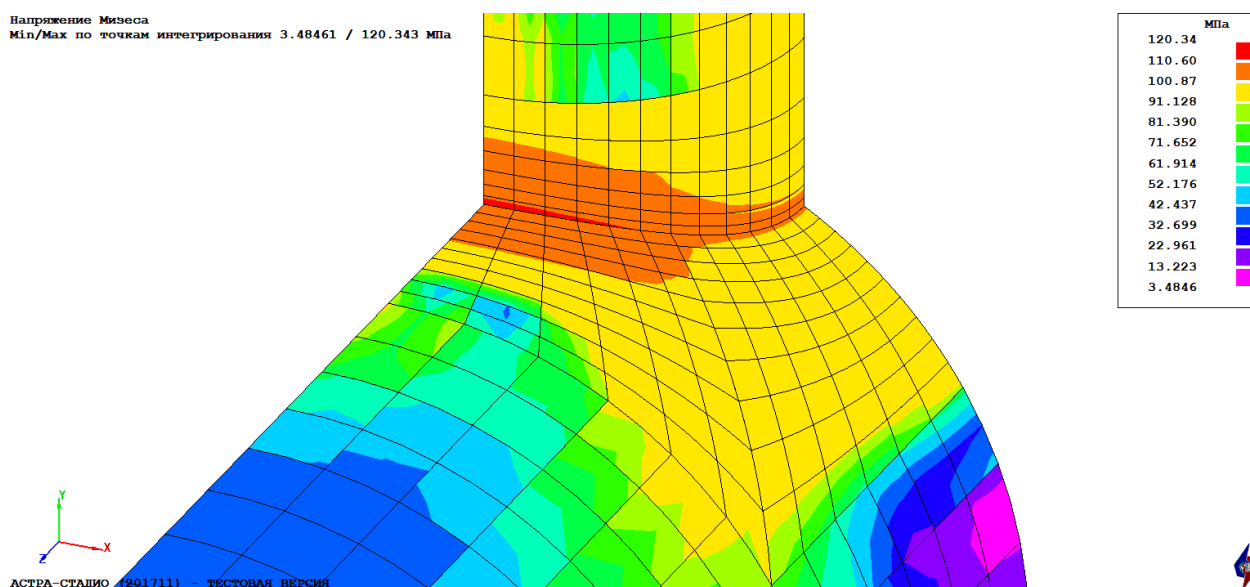


Рис. 124 Эквивалентные пластические деформации (Треска) при предельной нагрузке по критерию максимума скорости изменения относительной пластической работы

$$p_* = 1.9987 \text{ МПа. Максимум} - 17.15\%$$

Визуализация результатов – по ближайшей точке интегрирования без осреднения

Напряжение Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 3.48461 / 120.343 МПа



Напряжение Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 3.48461 / 120.343 МПа

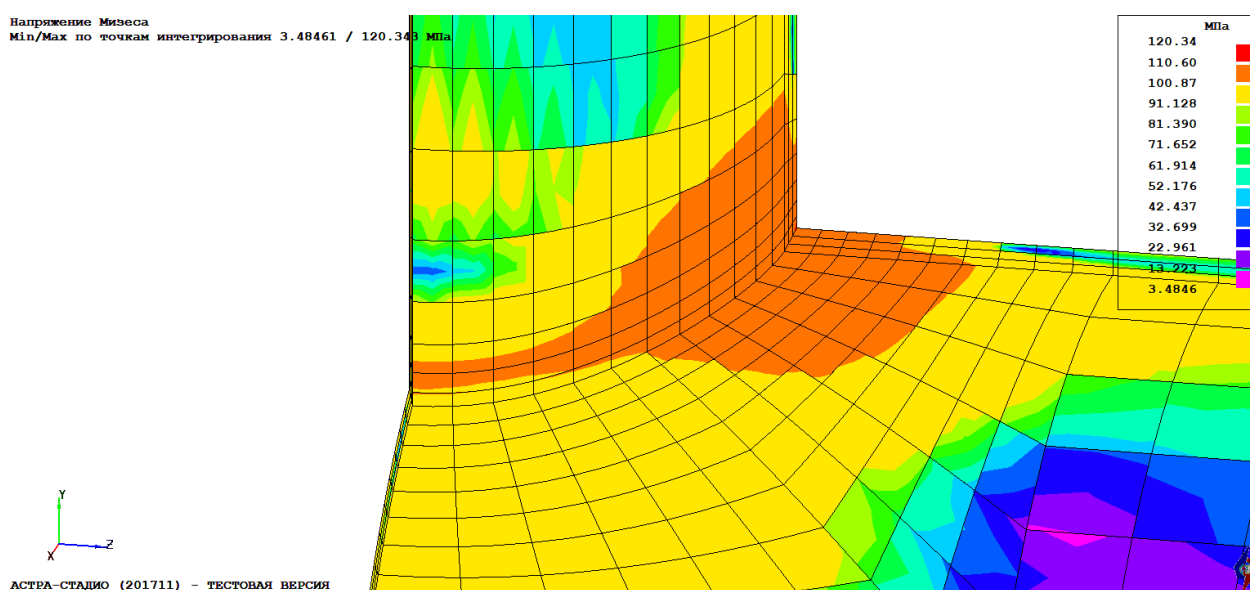


Рис. 125 Эквивалентные напряжения (Мизес) при предельной нагрузке по критерию максимума скорости изменения относительной пластической работы $p^* = 1.9987$ МПа. Максимум – 120.34 МПа
Визуализация результатов – по ближайшей точке интегрирования без осреднения

$$D/t = 25$$

Модель: tee_D500_t20_d250_t10.ast

Исходные данные

Диаметр магистрали, мм	500
Толщина стенки магистрали, мм	20
Диаметр штуцера, мм	250
Толщина стенки штуцера, мм	10
Модуль упругости, МПа	$2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0.3
Предел текучести, МПа	100
Тангенциальный модуль, МПа	200
Максимальное рассматриваемое давление, МПа	6

Параметры КЭ-сетки

Количество узлов в элементах	20
Количество слоев по толщине	5
Количество КЭ на четверти штуцера	16
Коэффициент сгущения	1.1
Коэффициент при начальном шаге	0.1

ишкэ 20



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

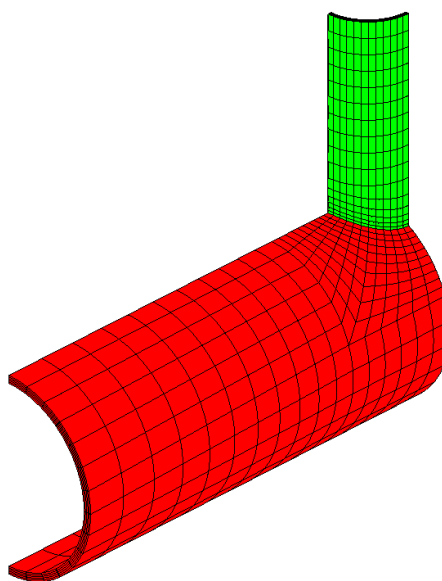


Рис. 126 КЭ-модель тройника

ИПКЭ 20

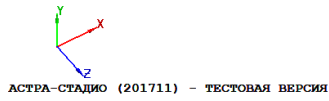
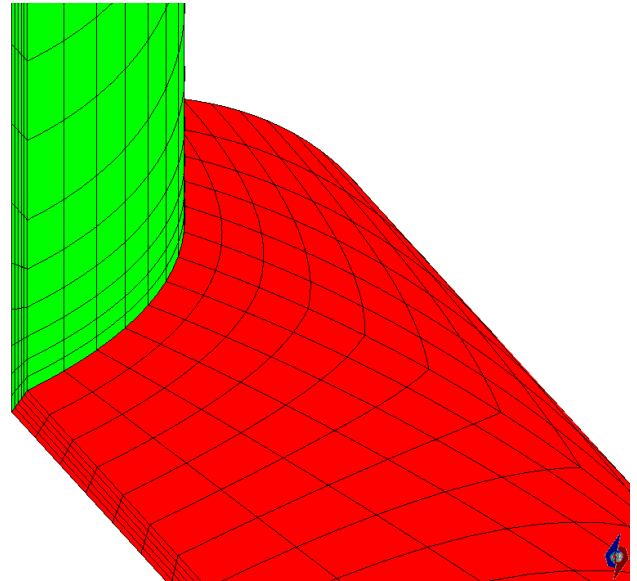


Рис. 127 КЭ-модель тройника. Зона соединения штуцера и магистрали

Результаты расчёта предельной нагрузки

Критерий	Предельная нагрузка	
	коэффициент*	значение, МПа
Двойной упругий наклон (TES) (Рис. 128)	0.5851	3.5106
Максимум скорости изменения относительной пластической работы (Рис. 129)	0.8729	5.2374

*Предельное значение параметра нагрузки q

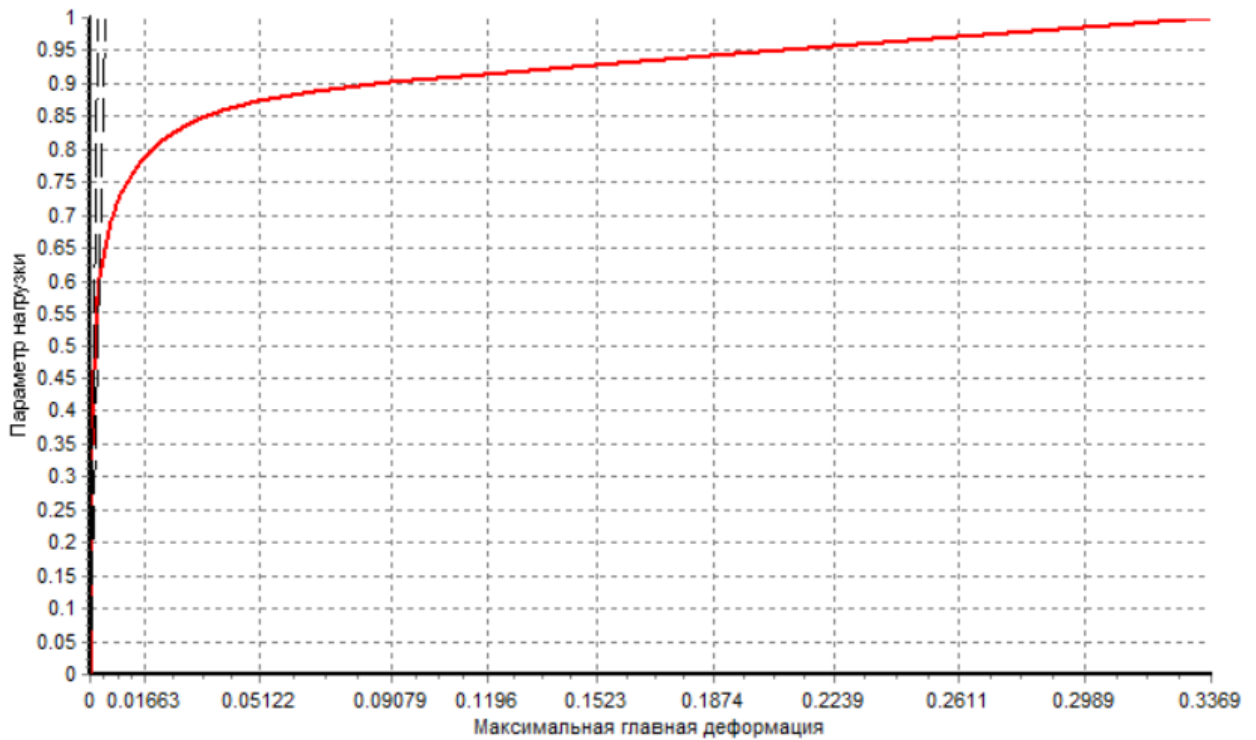


Рис. 128 Критерий двойного упругого наклона

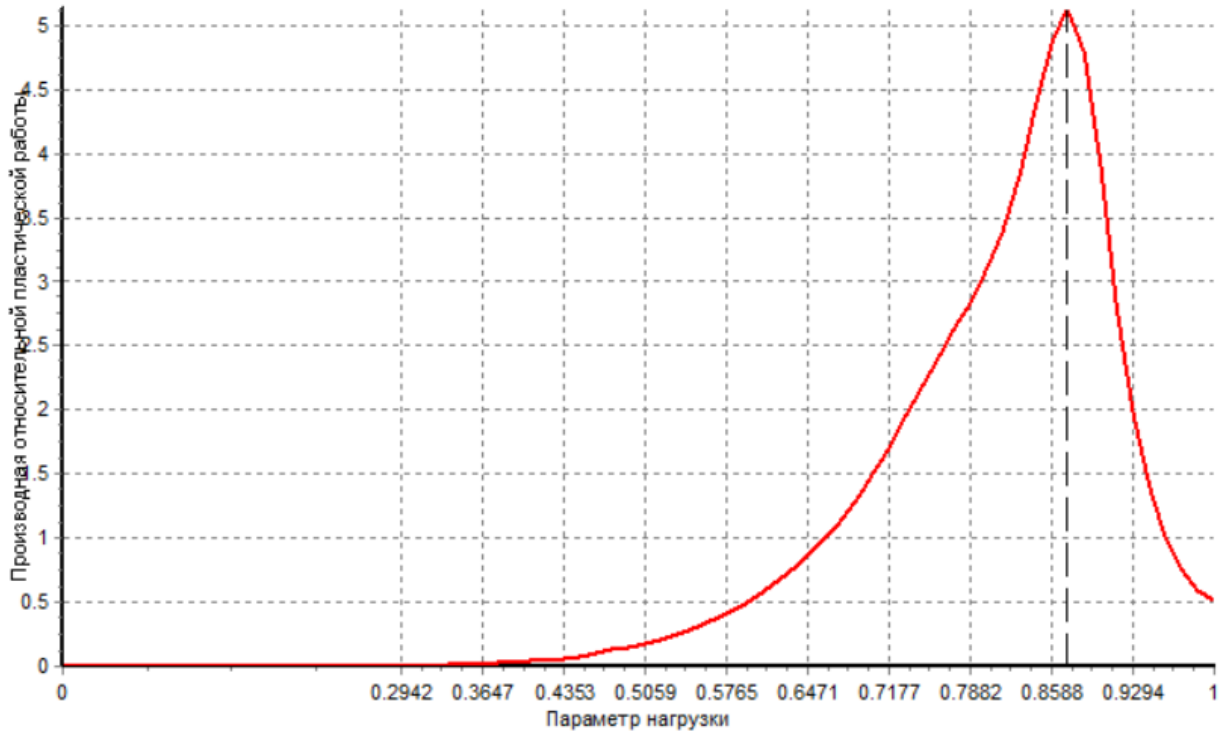
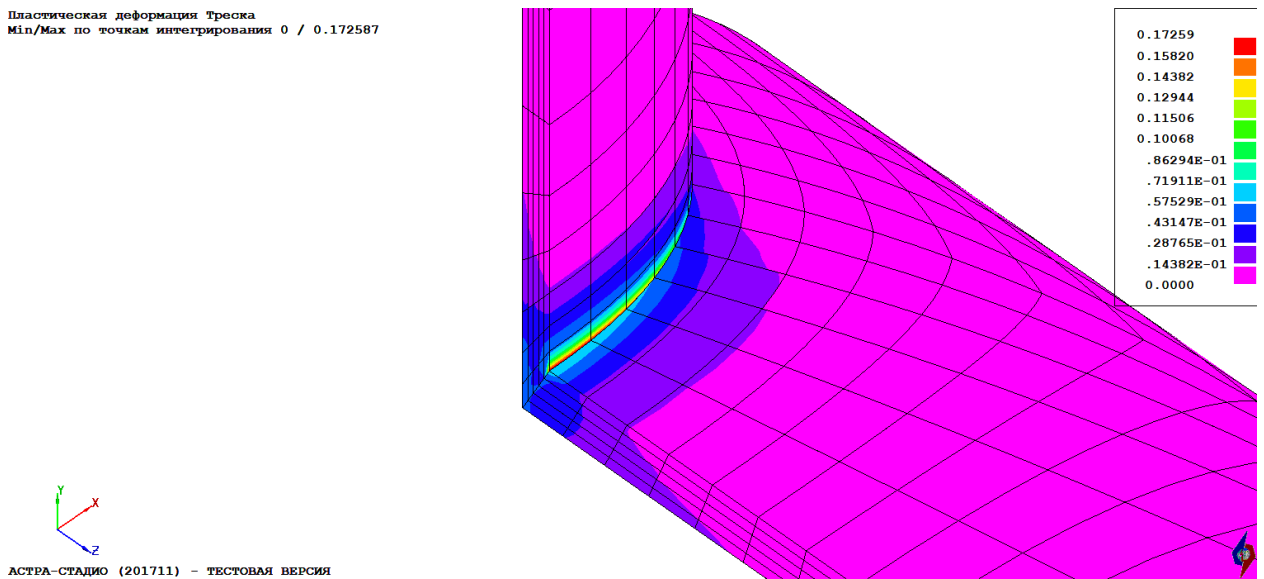


Рис. 129 Критерий максимума скорости возрастания относительной пластической работы

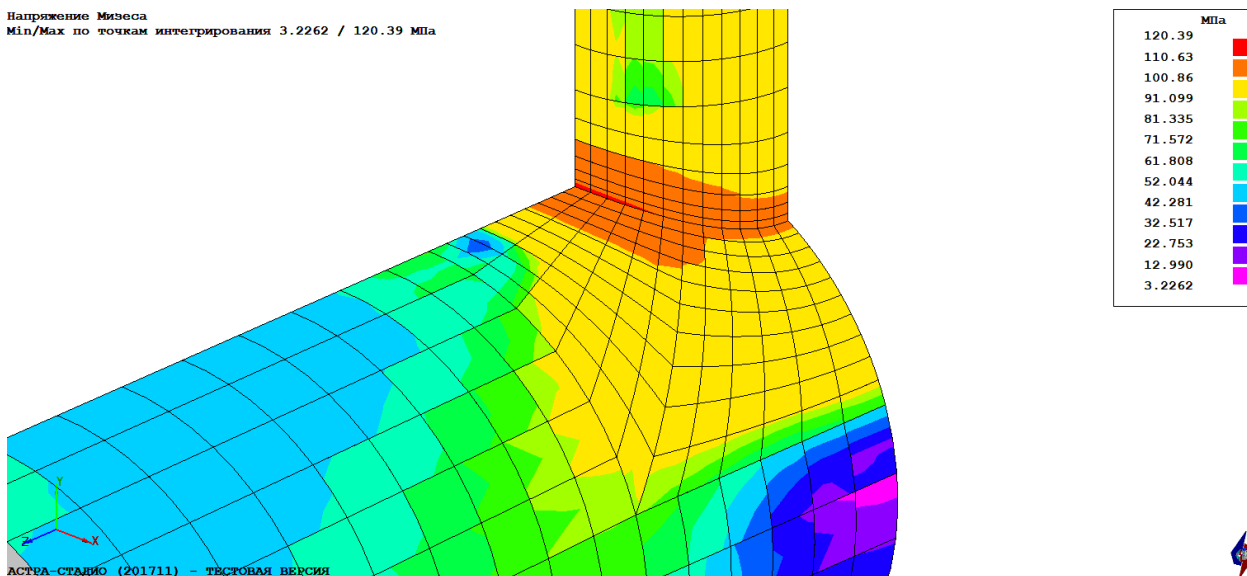
Пластическая деформация Треска
 Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.172587



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. 130 Эквивалентные пластические деформации (Треска) при предельной нагрузке по критерию Скопинского $p^* = 5.2374$ МПа. Максимум – 17.26%
 Визуализация результатов – по ближайшей точке интегрирования без осреднения

Напряжение Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 3.2262 / 120.39 МПа



Напряжение Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 3.2262 / 120.39 МПа

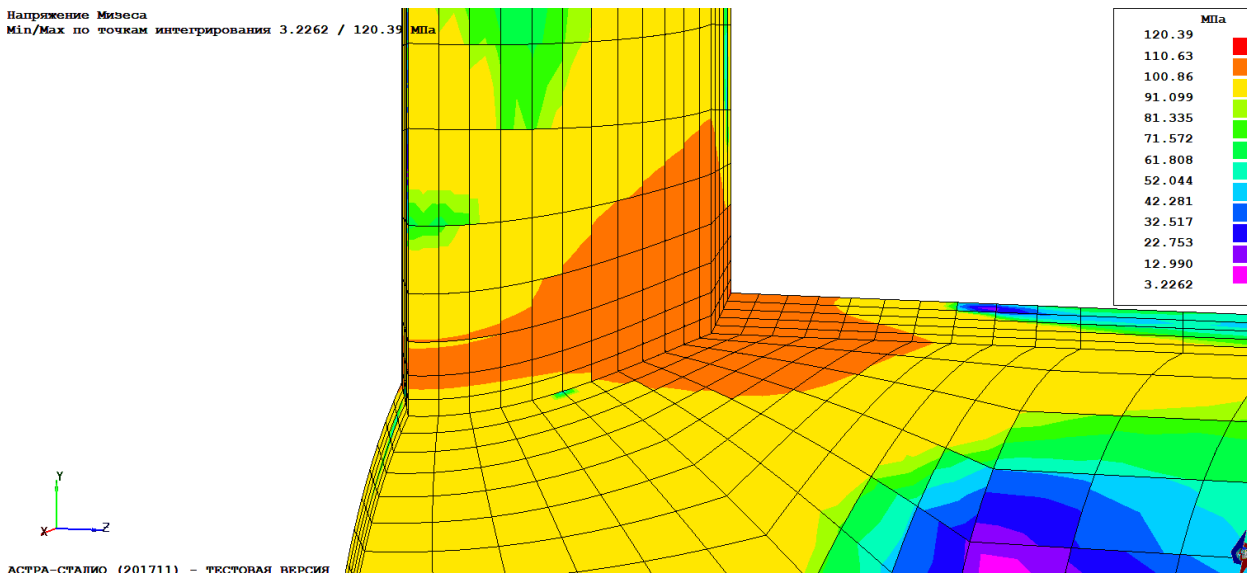


Рис. 131 Эквивалентные напряжения (Мизес) при предельной нагрузке по критерию максимума скорости изменения относительной пластической работы $p_* = 5.2374$ МПа. Максимум – 120.34 МПа
Визуализация результатов – по ближайшей точке интегрирования без осреднения

Пластическая деформация Треска
 Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.00538318

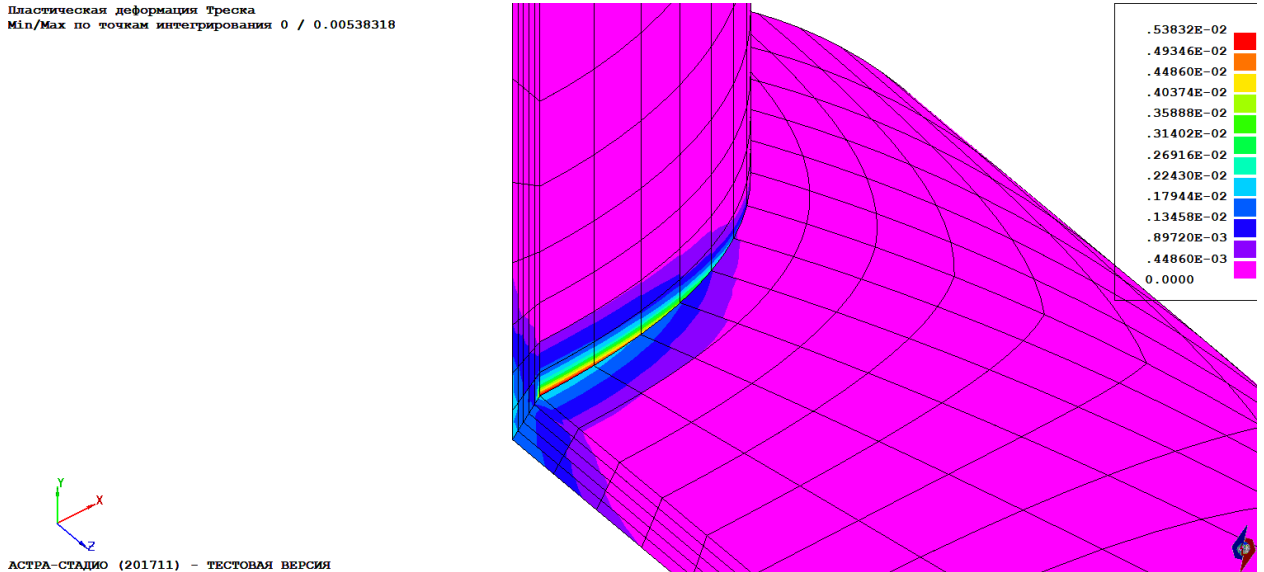
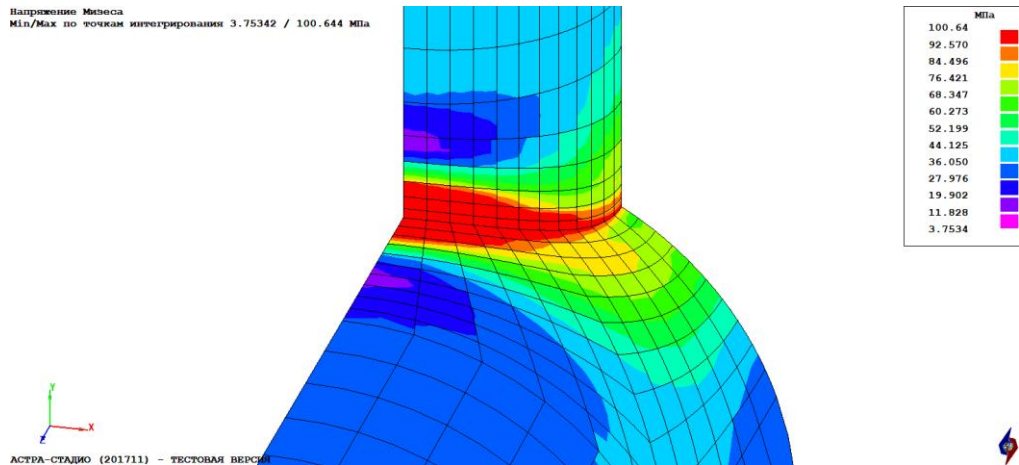


Рис. 132 Эквивалентные пластические деформации (Треска) при предельной нагрузке по критерию двойного упругого наклона $p^* = 3.5106$ МПа. Максимум – 0.54%

Напряжение Мизеса
 Min/Max по точкам интегрирования 3.75342 / 100.644 МПа



Напряжение Мизеса
 Min/Max по точкам интегрирования 3.75342 / 100.644 МПа

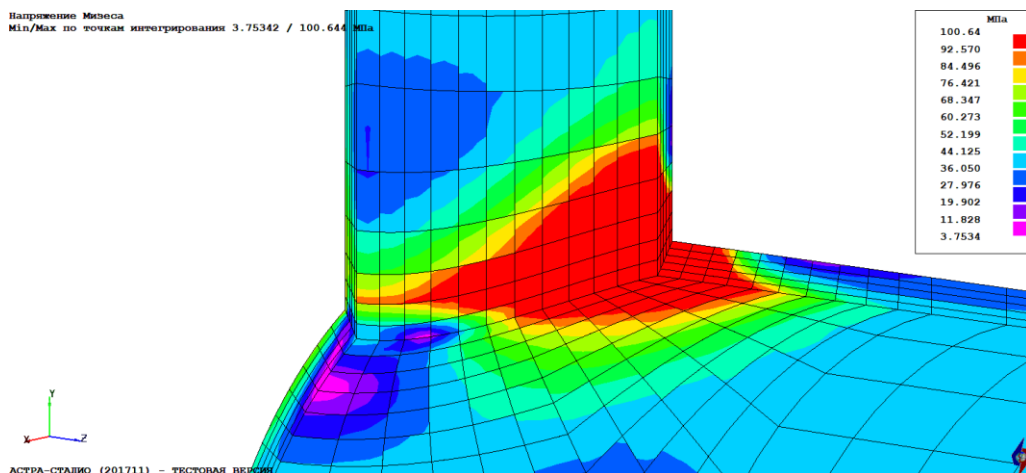


Рис. 133 Эквивалентные напряжения (Мизес) при предельной нагрузке по критерию двойного упругого наклона $p^* = 3.5106$ МПа. Максимум – 100.64 МПа
 Визуализация результатов – по ближайшей точке интегрирования без осреднения

$$D/t = 10$$

Модель: tee_D500_t50_d250_t25.ast

Исходные данные

Диаметр магистрали, мм	500
Толщина стенки магистрали, мм	50
Диаметр штуцера, мм	250
Толщина стенки штуцера, мм	25
Модуль упругости, МПа	$2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0.3
Предел текучести, МПа	100
Тангенциальный модуль, МПа	200
Максимальное рассматриваемое давление, МПа	20

Параметры КЭ-сетки

Количество узлов в элементах	20
Количество слоев по толщине	7
Количество КЭ на четверти штуцера	16
Коэффициент сгущения	1.1
Коэффициент при начальном шаге	0.1

ИПКЭ 20



АСТРА-СТРАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

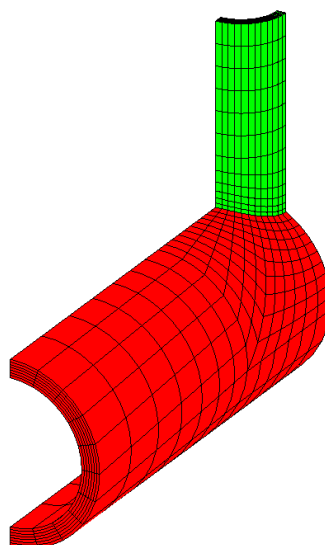
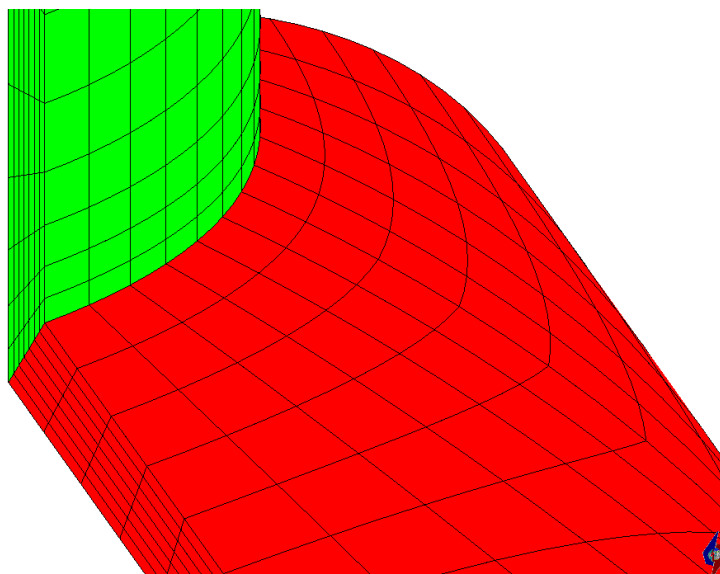


Рис. 134 КЭ-модель тройника

ИПКЭ 20



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. 135 КЭ-модель тройника. Зона соединения штуцера и магистрали

Результаты расчёта предельной нагрузки

Критерий	Предельная нагрузка	
	коэффициент*	значение, МПа
Двойной упругий наклон (TES) (Рис. 136)	0.6310	12.62
Максимум скорости изменения относительной пластической работы (Рис. 137)	0.9110	18.22

*Предельное значение параметра нагрузки q

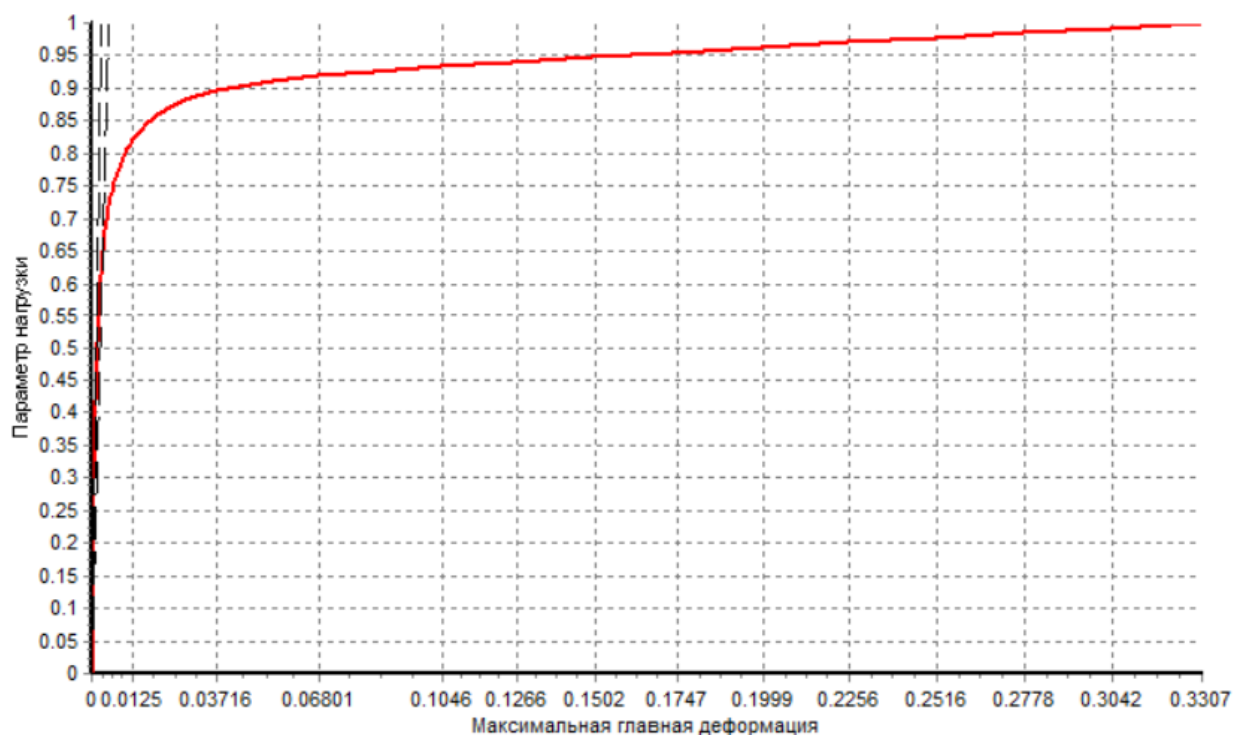


Рис. 136 Критерий двойного упругого наклона

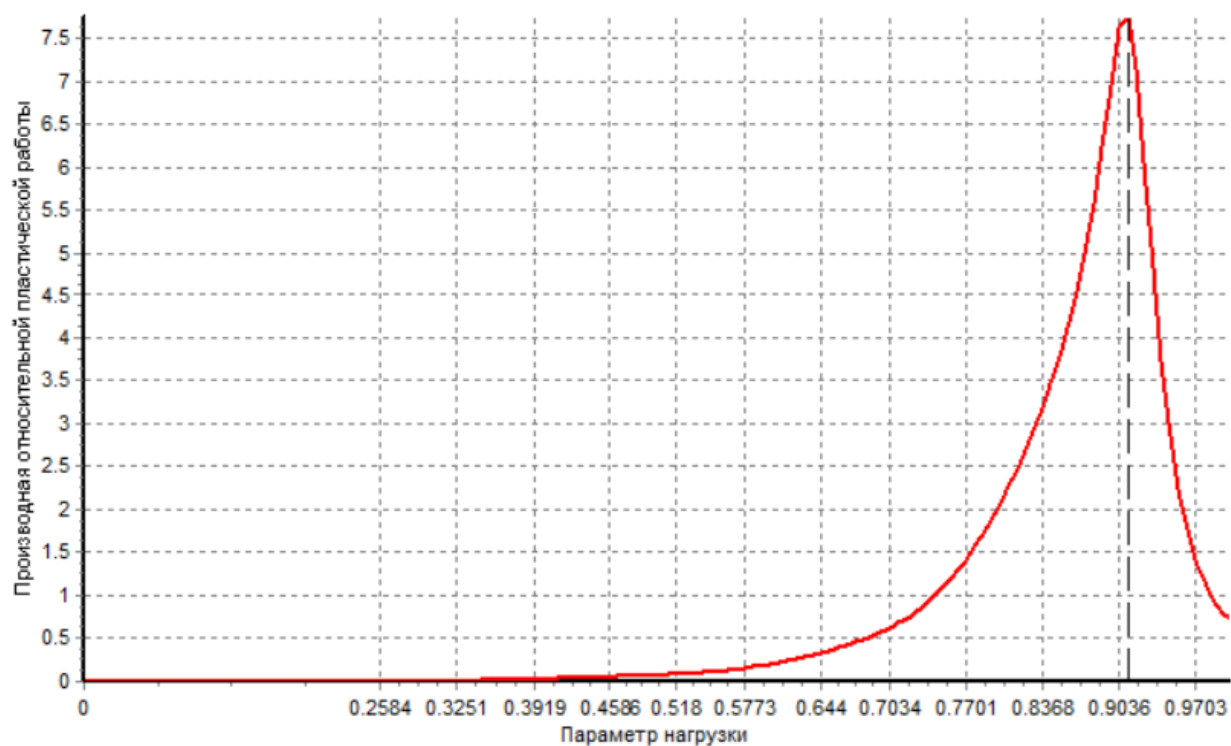
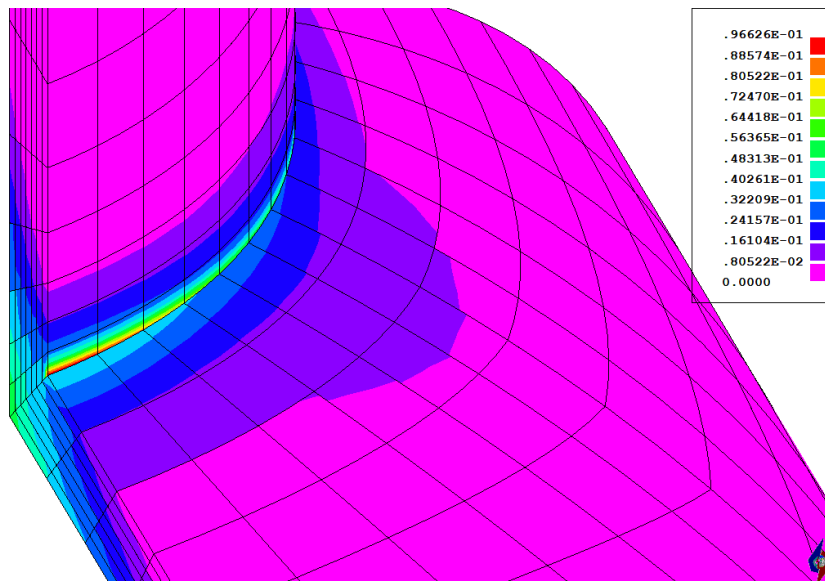


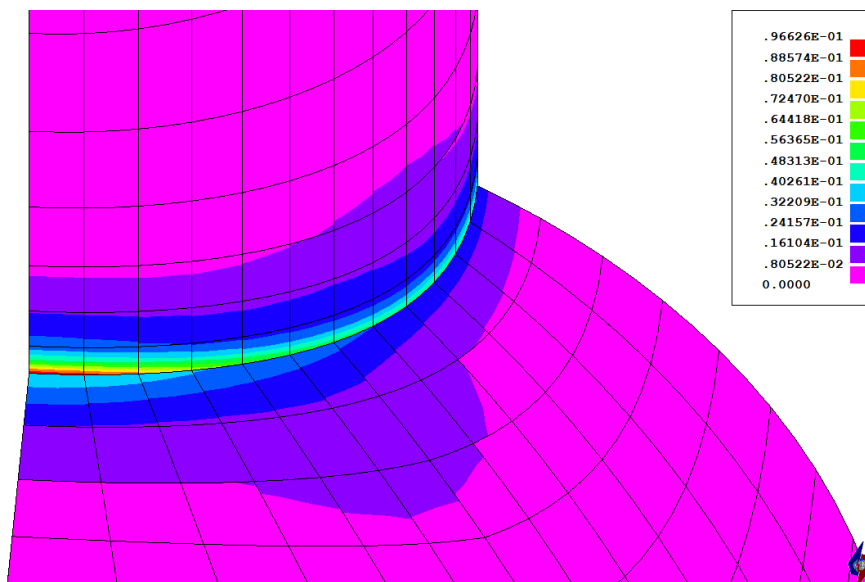
Рис. 137 Критерий максимума скорости возрастания относительной пластической работы

Пластическая деформация Треска
 Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.0966264



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

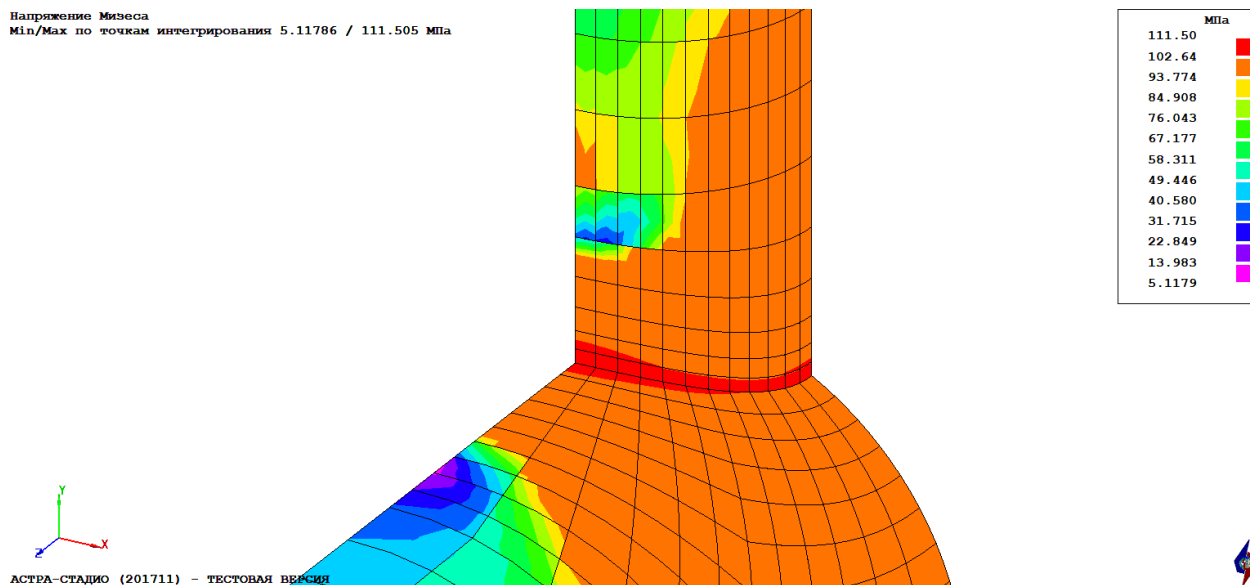
Пластическая деформация Треска
 Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.0966264



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. 138 Эквивалентные пластические деформации (Треска) при предельной нагрузке по критерию максимума скорости изменения относительной пластической работы $p^* = 18.22$ МПа. Максимум – 9.67%
 Визуализация результатов – по ближайшей точке интегрирования без осреднения

Напряжение Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 5.11786 / 111.505 МПа



Напряжение Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 5.11786 / 111.505 МПа

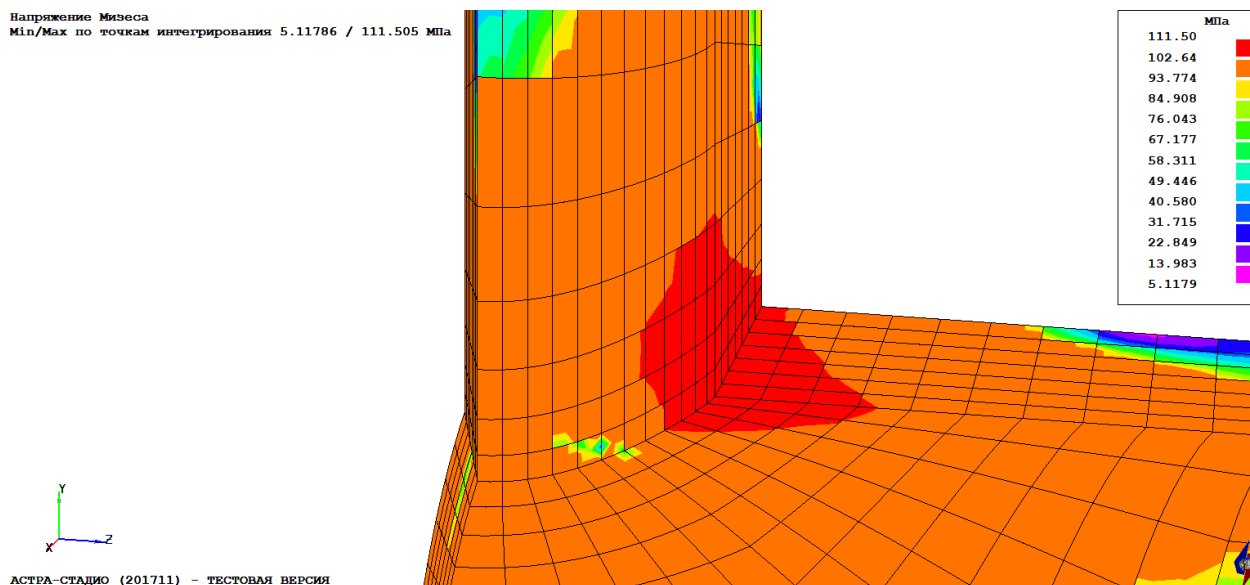
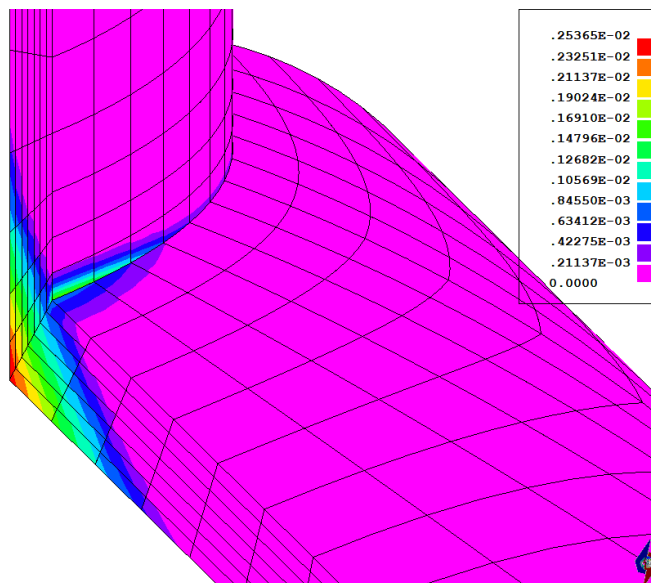


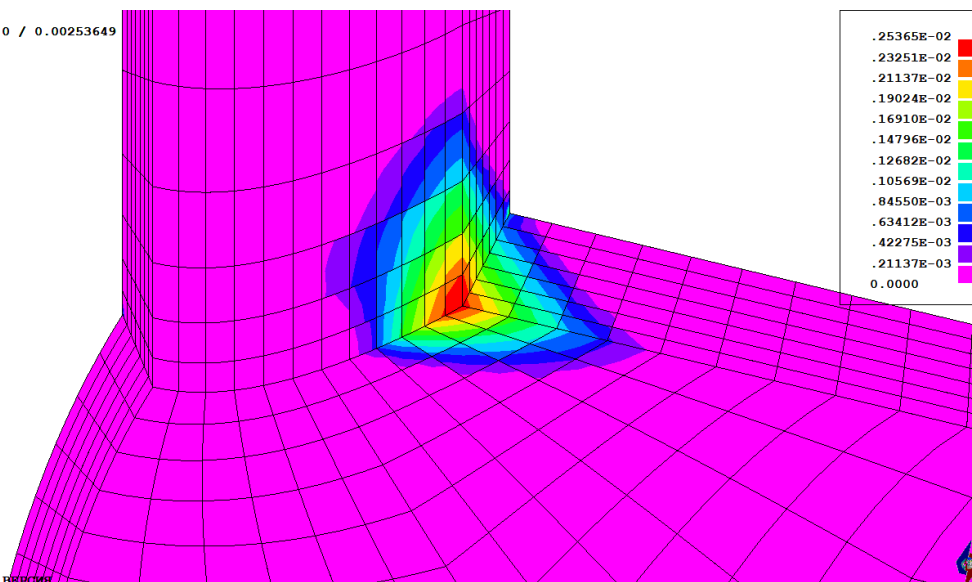
Рис. 139 Эквивалентные напряжения (Мизес) при предельной нагрузке по критерию максимума скорости изменения относительной пластической работы $p^* = 18.22$ МПа. Максимум – 111.50 МПа
Визуализация результатов – по ближайшей точке интегрирования без осреднения

Пластическая деформация Треска
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.00253649



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

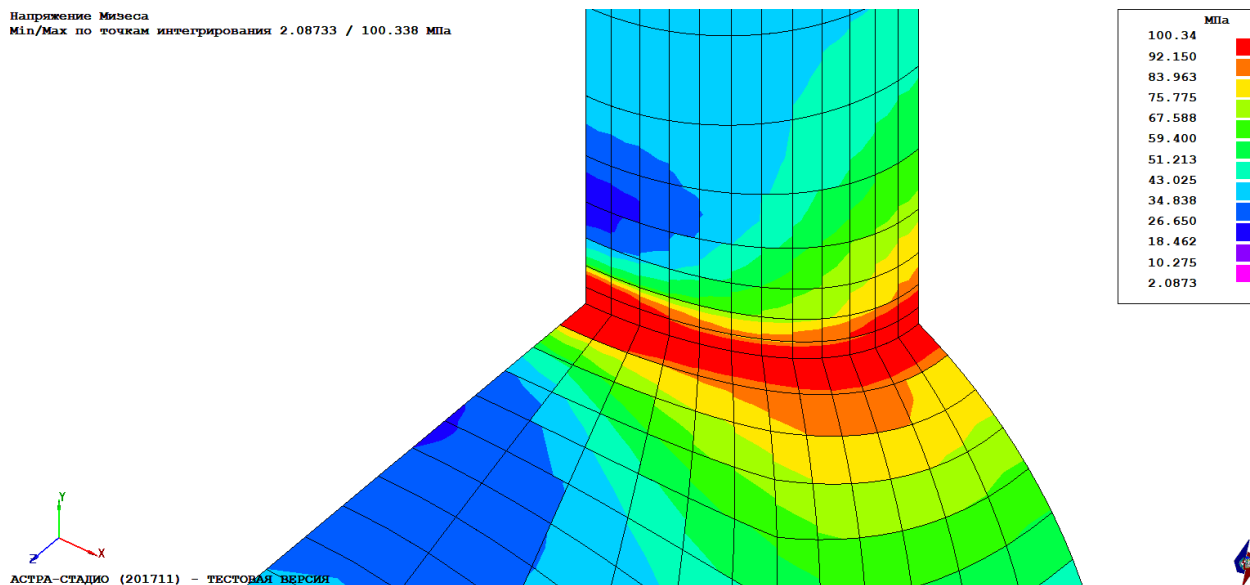
Пластическая деформация Треска
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.00253649



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

Рис. 140 Эквивалентные пластические деформации (Треска) при предельной нагрузке по критерию двойного упругого наклона $p^* = 12.62$ МПа. Максимум – 0.25%

Напряжение Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 2.08733 / 100.338 МПа



Напряжение Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 2.08733 / 100.338 МПа

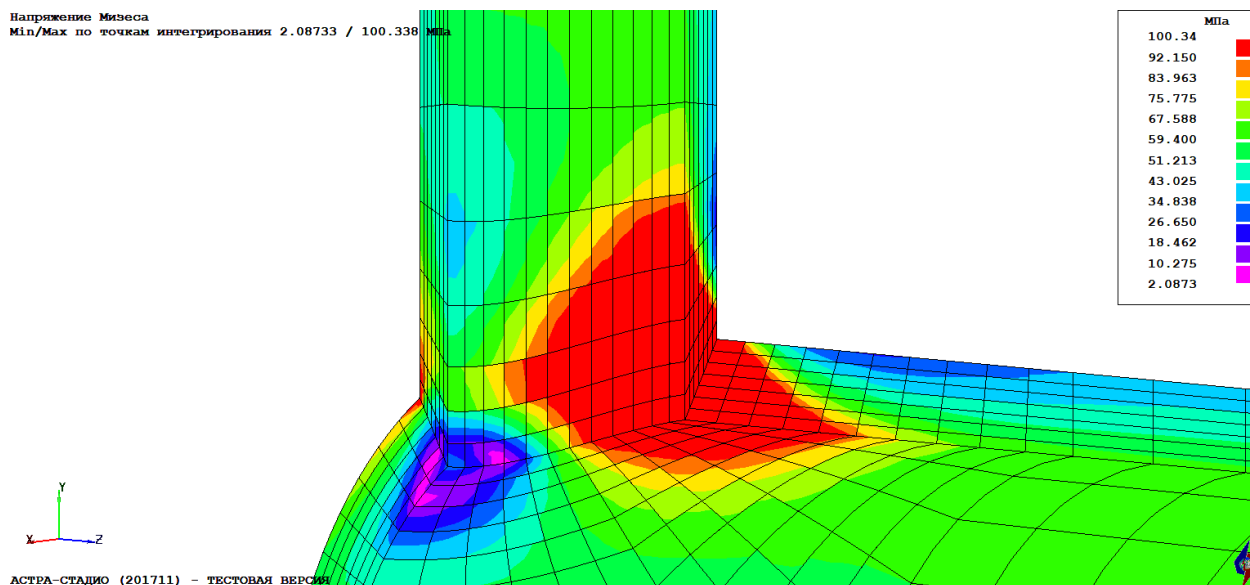


Рис. 141 Эквивалентные напряжения (Мизес) при предельной нагрузке по критерию двойного упругого наклона $p^* = 12.62$ МПа. Максимум – 100.34 МПа
Визуализация результатов – по ближайшей точке интегрирования без осреднения

Табл. 7 Пределное давление, МПа

Отношение диаметра к толщине D/t	Критерий		
	Двойного наклона	упругого	Максимум скорости возрастания относительной пластической работы
			Нормы ПНАЭ Г-7-002-86
Прямая труба			
25	9.459	9.427	8.333
Равнопроходные тройники			
100	0.431	0.524	0.342
50	1.193	1.427	0.918
25	3.371	5.299	2.432
10	12.442	17.422	8.743
Неравнопроходные тройники			
100	0.4848	0.6558	0.596
50	1.3055	1.9987	1.534
25	3.5106	5.2374	3.875
10	12.62	18.22	13.008

Настройки расчета по определению предельной нагрузки

Общие | Сетка | **Расчёт**

Статика	
Тип расчёта	
Количество шагов по нагрузке	50
Относительная точность для дос	0.0001
Относительная точность для лок	1e-007
Макс. количество итераций до р:	10000
Согласованная упруго-пластичес	Да
Бисекция шага	Нет
Поиск линий	Нет
Масштаб для нагрузок	1
Количество подшагов	1
ГСК для интегрирования ИПКЭ	Нет
Тип dat-файла	Новый
Метод расчёта	Прямой (PARDISO)
Предобуславливатель	none
Относительная точность	1e-005
Пределное число итераций	1000
Вывод в текстовый файл	
Исходные данные	Да
Результаты	Да

Примечание. Для тройников D/t = 10 расчет проводился на 100 шагов по нагрузке.

Заключение

Для всех рассмотренных вариантов тройников критерий максимума скорости изменения относительной пластической работы дает больший запас по предельному давлению, чем критерий двойного упругого наклона. Что можно объяснить невозможностью учета в локальных критериях (к которым относится критерий двойного упругого наклона) сложного характера изменения пластических деформаций по объему детали в отличие от интегральных энергетических критериев (к которым относится критерий максимума скорости изменения относительной пластической работы). В пользу данного утверждения выступает и повышение расхождений между критериями с увеличением толстостенности тройника (отношения наружного диаметра к толщине стенки).

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.