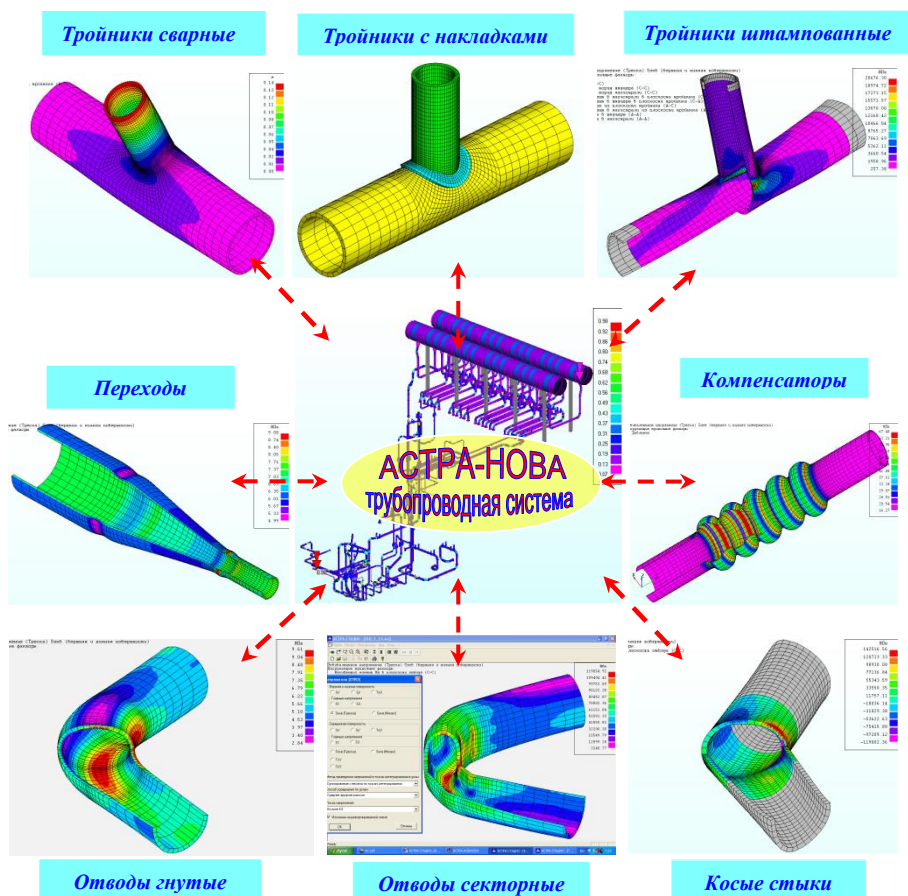


## “Семейство” программных комплексов **АСТРА-НОВА’2023**

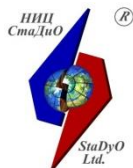
### **АСТРА-СТАДИО’2023**

Уточненный расчет температурного и напряженно-деформированного состояния (по пространственно-оболочечным и объемным схемам МКЭ), статической, циклической и сейсмической прочности деталей трубопроводов









Инв.№ \_\_\_\_\_

**“Утверждаю”**

Генеральный директор НИЦ СтаДиО

\_\_\_\_\_  
**А.М.Белостоцкий**

“ ” \_\_\_\_\_ 2023 г.

**“Семейство” программных комплексов АСТРА-НОВА’2023  
(релиз 202311)**

**Автоматизированное проектирование и расчеты трубопроводных систем  
на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия,  
вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы  
в соответствии с российскими нормативными требованиями**

**АСТРА-СТАДИО’2023**

**Уточненный расчет температурного и напряженно-деформированного  
состояния (по пространственно-оболочечным и объемным схемам МКЭ),  
статической, циклической и сейсмической прочности  
деталей трубопроводов**

**Общее описание  
Сеанс работы**

Руководитель разработки  
докт.техн.наук, профессор **А.М.Белостоцкий**

Ответственный исполнитель  
**А.Л.Потапенко**





## **Аннотация**

Настоящий документ содержит описание сеанса работы с программным модулем АСТРА-СТАДИО, обеспечивающим уточненный расчет температурного и напряженно-деформированного состояния, статической, циклической и сейсмической прочности основных деталей трубопроводов (тройников, отводов, косых стыков, линзовых компенсаторов, переходов), в составе ПК АСТРА-НОВА и автономно.





## Содержание

Аннотация .....	5
Содержание .....	7
Введение .....	9
Краткое описание сеанса работы с ПК АСТРА-СТАДИО .....	32
Меню Файл .....	38
Новый .....	39
Открыть .....	39
Сохранить .....	39
Сохранить как .....	39
Установки; .....	41
Печать .....	43
Предварительный просмотр .....	43
Выбор и настройка принтера .....	43
Выход .....	43
Меню Расчёт .....	44
Параметры модели (расчёт) тройника .....	45
Расчет тройника с учётом пластических деформаций .....	59
Расчет тройника с учётом автофретирования .....	67
Расчет тройника (предельная нагрузка) .....	68
Параметры модели (расчет) отвода .....	69
Расчёт отвода с учётом пластических деформаций .....	73
Расчёт отвода (предельная нагрузка) .....	76
Параметры модели (расчет) отвода .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Параметры модели (расчет) компенсатора2 .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Параметры модели (расчет) компенсатора .....	77
Параметры модели (расчет) перехода .....	80
Параметры модели (расчет) косого стыка .....	83
Параметры модели (расчет) сварного соединения труб .....	86
Параметры модели (расчет) прямой трубы (давление) .....	88
Меню Результаты .....	91
Варианты нагрузок .....	92
Значения нагрузок (тройник) .....	94
Значения нагрузок (отвод, косой стык) .....	96
Значения нагрузок (переход, компенсатор) .....	97
Деформированная схема .....	98
Исходная схема .....	99
Масштаб .....	99
Автомасштабирование .....	100
Изополя перемещений .....	100
Запись AVI-файла .....	101
Изополя деформаций .....	102

Изополя напряжений .....	103
<i>Min / Max</i> в точках интегрирования.....	106
Оценка прочности .....	108
Графики (от нагрузки) .....	109
Отчет .....	111
Меню Вид .....	116
Параметры изолиний .....	117
Настройка изображения модели. . . . .	119
Настройка нумерации. . . . .	120
Визуализация .....	121
Виды .....	121
Видеть все .....	122
Ось вверх.....	122
Копировать изображение в буфер .....	122
Перерисовать .....	122
Фрагменты. . . . .	123
Фрагмент по объёму видимости. . . . .	123
Фрагменты по элементам .....	124
Фрагменты по материалам .....	124
Показать всё.....	124
Скрыть всё .....	124
Инвертировать фрагмент.....	124
Меню Окно .....	125
Каскад.....	125
Делить горизонтально.....	125
Делить вертикально .....	125
Упорядочить иконы .....	125
Окно 1, 2 .....	125
Меню Помощь.....	126
Справка .....	126
О программе .....	126
Теоретическое описание.....	127
Нормативная оценка упругих напряжений.....	127
Трёхмерные упругопластические расчёты элементов трубопровода .....	130
Общие конечноэлементные подходы .....	137
Литература.....	162
Пример использования АСТРА-СТАДИО в составе АСТРА-НОВА .....	168

## Введение

Программный модуль АСТРА-СТАДИО предназначен для уточненного расчета температурного и напряженно-деформированного состояния (НДС), статической, циклической и сейсмической прочности тяжело нагруженных деталей трубопроводов – ортогональных тройников (сварных, штампованных, с накладками и плакирующим слоем), отводов и гибов (в том числе, секторных с учетом эллиптичности и переменной толщины сечения), косых стыков, переходов и линзовых/сильфонных компенсаторов. АСТРА-СТАДИО полностью совместима с ПК АСТРА-НОВА'2023, а также может использоваться автономно.

В подсистеме АСТРА-СТАДИО реализована автоматическая генерация оптимальных по точности пространственно-оболочечных (для тонко- и “среднестенных” элементов) и объемных (для толстостенных деталей) расчетных конечноэлементных моделей.

Подсистема обладает диалоговым пре- и постпроцессором, может быть связана с базой данных типовых элементов, требует лишь необходимого минимума информации для автоматической генерации оптимальных по точности пространственно-оболочечных (для тонко- и “среднестенных” элементов) и объемных (для толстостенных деталей и системы “трубопровод-изоляция-грунт”) расчетных конечноэлементных моделей. Вычислительным “ядром” служит мощный верифицированный конечно/суперэлементный комплекс СТАДИО'2023, имеющий богатый послужной список исследованных сложных объектов атомной, тепловой и гидроэнергетики, различных отраслей строительства и машиностроения.

АСТРА-СТАДИО полностью совместим с АСТРА-НОВА'2023 (экспорт геометрических характеристик, физико-механических свойств и нагрузок, импорт уточненных напряжений и матриц жесткости/податливости), обеспечивает уточненный расчет по пространственно-оболочечным и объемным схемам метода конечных элементов (МКЭ) напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности следующих тяжело нагруженных элементов трубопроводов при действии полной системы квазистатических нагрузок (внутреннее давление, вес и температурные деформации, осевая и поперечные силы, изгибающие и крутящий моменты на границах-торцах):

- 1) тройников ортогональных и неортогональных (косых) радиальных (сварных с зачищенным швом, штампованных, штампованных и кованых, с незачищенными швами, накладками и плакирующим слоем);

- 2) отводов (гибов, колен) гнутых, крутоизогнутых, штампованных и секторных с учетом эллиптичности, разностенности (переменной толщины сечения) и примыкающих прямых труб;

- 3) косых стыков;

4) конических переходов;

5) линзовых и сильфонных компенсаторов осевых, угловых и сдвиговых (многоволновых с учетом примыкающих прямых труб).

Подсистема аккумулирует мировой и собственный 33-летний опыт разработчиков по анализу сложного пространственного распределения температур, перемещений, деформаций и напряжений в деталях, определяющих прочность всей трубопроводной системы, в оборудовании, строительных конструкциях и сооружениях.

Основные реализованные гипотезы: изотропия и линейная упругость металла (физическая линейность) и малость деформаций-перемещений (геометрическая линейность).

Результаты расчета при заданных сочетаниях нагрузок:

- температурное поле (узловые значения);
- перемещения (вариант – при единичных нагрузках – матрица податливости);
- значимые компоненты полных нормальных и касательных напряжений, главных напряжений и приведенных (эквивалентных) напряжений на внутренней, срединной и наружной поверхностях;
- оценка статической, циклической и сейсмической прочности по критериям, принятым в соответствующих отраслях.

Характерное время счета на Pentium 4 1,7GHz для линейных пространственных и трехмерных задач (тройники, отводы,...) – 60-200сек, для нелинейных трехмерных задач анализа подземных трубопроводов – до 1 час.

В течение первого десятилетия своей жизни АСТРА-СТАДИО использовалась преимущественно самими разработчиками при выполнении заказных научно-исследовательских работ (как правило, для уточненного расчета деталей, не удовлетворивших критериям прочности при расчете по АСТРА-НОВА или другим программам расчета трубопроводов). Такая возможность существует и приветствуется НИЦ СтаДиО и сейчас. Более того, неизменным остается принципиальный, ранее провозглашенный подход: *программные системы такого класса должны использоваться только расчетчиками-профессионалами.*

В подсистеме уточненного расчета деталей трубопроводов (АСТРА-СТАДИО) реализована автоматическая генерация оптимальных по точности пространственно-оболочечных (для тонко- и “среднестенных” элементов, криволинейные 6-и и 8-и узловые КЭ переменной толщины суперпараметрического семейства, СПКЭ) и объемных (для средне- и толстостенных деталей, 12-и, 15-и, 16-и и 20-и узловые КЭ изопараметрического семейства, ИПКЭ) расчетных конечноэлементных моделей – см. таблицу.

Таблица 1 Типы деталей, КЭ и виды расчета

Деталь (элемент, узел)	Типы КЭ, вид сетки	Виды расчёта	Рисунок
<i>Тройник сварной</i> с зачищенным швом	<ul style="list-style-type: none"> <li>СПКЭ8 (пересечение штуцера и магистрали по верхней и нижней поверхности);</li> <li>СПКЭ8 (пересечение штуцера и магистрали по срединной поверхности)</li> </ul>	(2)	Рис. 2
			Рис. 1
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ-16</li> <li>ИПКЭ-20</li> </ul> Многослойная схема	(1-4)	
<i>Тройник сварной</i> с зачищенным швом и плакирующим слоем	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16</li> <li>ИПКЭ20</li> </ul> Многослойная схема	(1-4)	Рис. 4
<i>Тройник штампованный</i> <i>и штампосварной</i> (с тянутой горловиной)	<ul style="list-style-type: none"> <li>СПКЭ8, СПКЭ6</li> </ul>	(2)	Рис. 12
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16, ИПКЭ12</li> <li>ИПКЭ20, ИПКЭ15</li> </ul> Многослойная схема.	(1-4)	Рис. 13
<i>Тройник штампованный</i> <i>и штампосварной</i> с плакирующим слоем	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16, ИПКЭ12</li> <li>ИПКЭ20, ИПКЭ15</li> </ul> Многослойная схема	(1-4)	Рис. 14
<i>Тройник сварной</i> с зачищенным швом и накладкой	<ul style="list-style-type: none"> <li>СПКЭ8 (пересечение штуцера и магистрали по верхней и нижней поверхности);</li> <li>СПКЭ8 (пересечение штуцера и магистрали по срединной поверхности)</li> </ul>	(2)	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16</li> <li>ИПКЭ20</li> </ul> Многослойная схема	(1-4)	Рис. 8
<i>Тройник сварной</i> с пропущенным штуцером	<ul style="list-style-type: none"> <li>СПКЭ8 (пересечение штуцера и магистрали по срединной поверхности)</li> </ul>	(2)	Рис. 7

Деталь (элемент, узел)	Типы КЭ, вид сетки	Виды расчёта	Рисунок
<i>Тройник сварной с зачищенным швом, накладкой и плакирующим слоем</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16</li> <li>ИПКЭ20</li> </ul> Многослойная схема	(1-4)	Рис. 9
<i>Тройник сварной со швом (“треугольник”) “штуцер-магистраль”</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16, ИПКЭ12</li> <li>ИПКЭ20, ИПКЭ15</li> </ul> Многослойная схема	(1-3)	Рис. 10
<i>Тройник сварной с накладкой и швами “штуцер-магистраль-накладка” и “магистраль-накладка”</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16, ИПКЭ12</li> <li>ИПКЭ20, ИПКЭ15</li> </ul> Многослойная схема	(1-3)	Рис. 11
<i>Неортогональный (“косой”) сварной тройник с зачищенным швом</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>СПКЭ8 (пересечение штуцера и магистрали по верхней и нижней поверхности);</li> <li>СПКЭ8 (пересечение штуцера и магистрали по срединной поверхности)</li> </ul>	(2)	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16</li> <li>ИПКЭ20</li> </ul>	(1-3)	Рис. 30
<i>Сверлёный тройник с кольцевым корпусом</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ20</li> </ul>	(1-3)	Рис. 31
<i>Неортогональный (“косой”) сварной тройник с зачищенным швом и накладкой</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>СПКЭ8 (пересечение штуцера и магистрали по верхней и нижней поверхности);</li> <li>СПКЭ8 (пересечение штуцера и магистрали по срединной поверхности)</li> </ul>	(2)	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16</li> <li>ИПКЭ20</li> </ul>	(1-3)	
<i>Отвод гнутый (с примыкающими трубами)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>СПКЭ8</li> </ul>	(1-4)	Рис. 15
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16,</li> <li>ИПКЭ20</li> </ul> Многослойная схема	(1-3)	Рис. 16
<i>Отвод гнутый с плакирующим слоем (с примыкающими трубами)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16,</li> <li>ИПКЭ20</li> </ul> Многослойная схема	(1-3)	Рис. 17

Деталь (элемент, узел)	Типы КЭ, вид сетки	Виды расчёта	Рисунок
<i>Отвод секторный</i> (с примыкающими трубами)	<ul style="list-style-type: none"> <li>СПКЭ8 –пересечение по верхней и нижней поверхности</li> <li>СПКЭ8 –пересечение по срединной поверхности</li> </ul>	(2)	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16,</li> <li>ИПКЭ20</li> </ul> Многослойная схема	(1-3)	Рис. 18
<i>Отвод секторный</i> с плакирующим слоем (с примыкающими трубами)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16,</li> <li>ИПКЭ20</li> </ul> Многослойная схема	(1-3)	Рис. 19
<i>Косой стык</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>СПКЭ8 – пересечение по верхней и нижней поверхности</li> <li>СПКЭ8 –пересечение по срединной поверхности</li> </ul>	(2)	Рис. 21
			Рис. 20
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16,</li> <li>ИПКЭ20</li> </ul> Многослойная схема	(1-3)	Рис. 22
<i>Косой стык</i> с плакирующим слоем	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ16,</li> <li>ИПКЭ20</li> </ul> Многослойная схема.	(1-3)	Рис. 23
<i>Косой стык</i> со сварным швом	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ20, ИПКЭ15</li> </ul> Многослойная схема	(1-3)	Рис. 24
<i>Прямая труба</i> (четверть) с кольцевым сварным швом	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ20, ИПКЭ15</li> </ul> Многослойная схема	(1-3)	Рис. 25
<i>Сварное соединение труб (полная модель)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ИПКЭ20</li> </ul>	(1-3)	Рис. 29
<i>Переход</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>СПКЭ8 –пересечение по верхней и нижней поверхности</li> <li>СПКЭ8 –пересечение по срединной поверхности</li> </ul>	(2)	Рис. 27
			Рис. 26
<i>Компенсатор</i> (сильфонный, линзовый)	<ul style="list-style-type: none"> <li>СПКЭ8</li> </ul>	(2)	Рис. 28

(1) – стационарная задача теплопроводности

(2) – расчет НДС и прочности

(3) – комбинированный расчет (определение температурного поля и использование его в качестве температурной нагрузки для определения НДС)

(4) – формирование матрицы жесткости детали (элемента)

СПКЭ8 – четырехугольный в плане 8-узловой оболочечный конечный элемент с промежуточными узлами суперпараметрического семейства.

СПКЭ6 – треугольный в плане 6-узловой оболочечный конечный элемент с промежуточными узлами суперпараметрического семейства.

ИПКЭ16 – трехмерный, шестигранный четырехугольный в “плане”, линейный по толщине 16-узловой КЭ с промежуточными узлами.

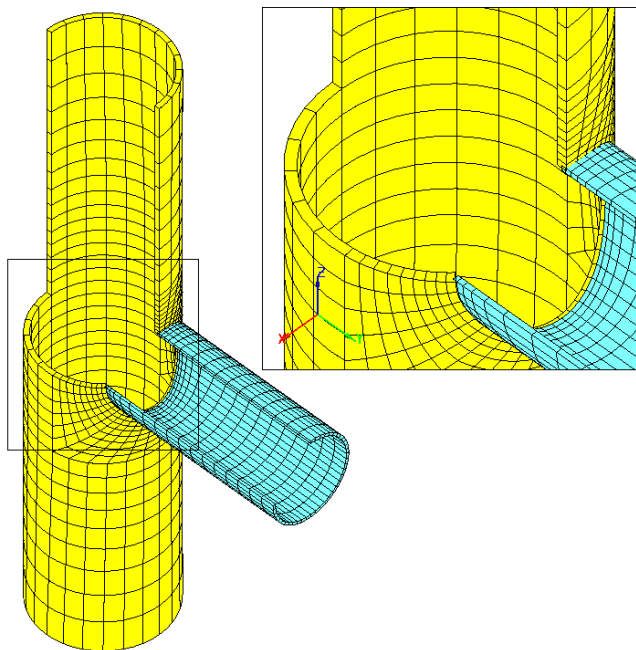
ИПКЭ20 – трехмерный, шестигранный четырехугольный в “плане”, 20-ти узловой КЭ с промежуточными узлами.

ИПКЭ12 – трехмерный, пятигранный треугольный в “плане”, линейный по толщине 12-узловой КЭ с промежуточными узлами.

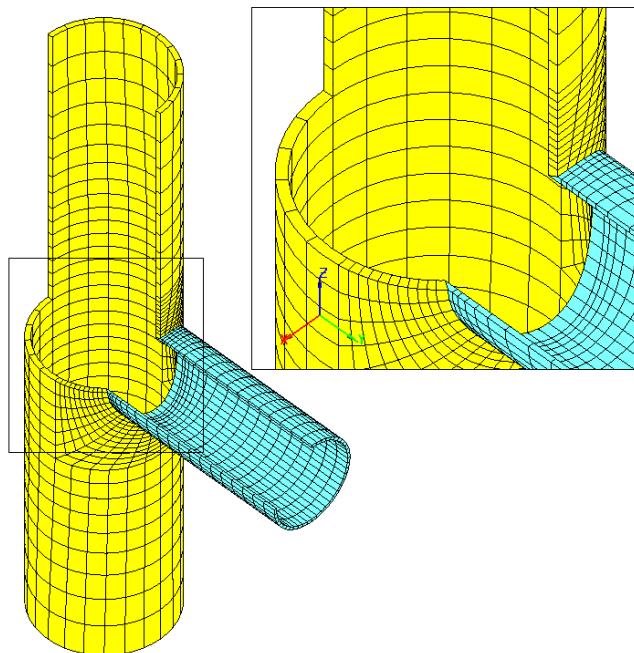
ИПКЭ15 – трехмерный, пятигранный треугольный в “плане”, 15-узловой КЭ с промежуточными узлами.



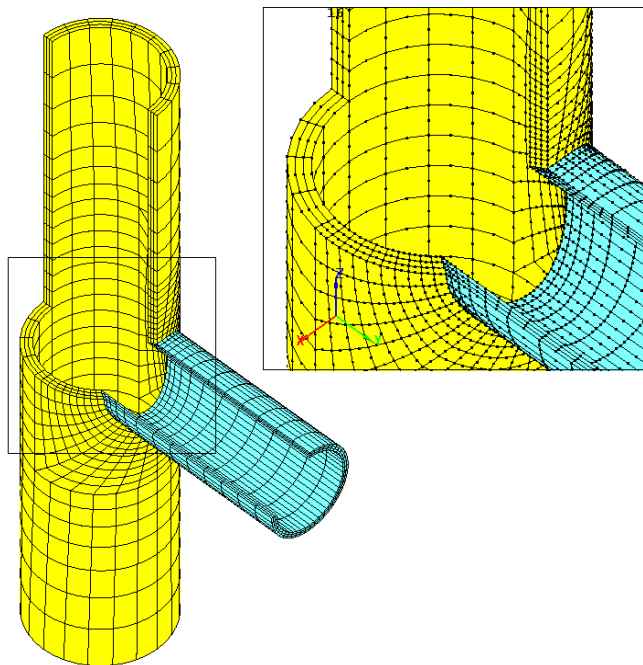
*Рис. 1 Тройник сварной с зачищенным швом. СПКЭ по срединной поверхности*



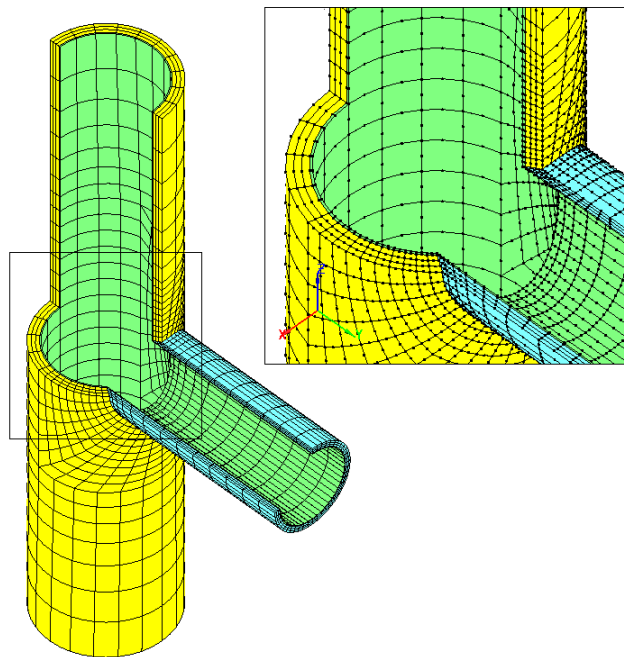
*Рис. 2 Тройник сварной с зачищенным швом. СПКЭ по верхней и нижней поверхности*



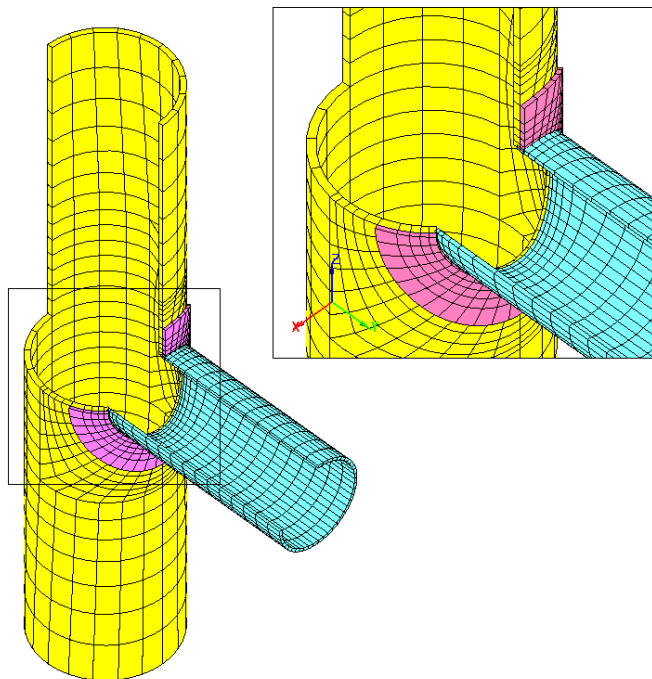
*Рис. 3* Тройник сварной с зачищенным швом. ИПКЭ16  
(ИПКЭ20) многослойная схема



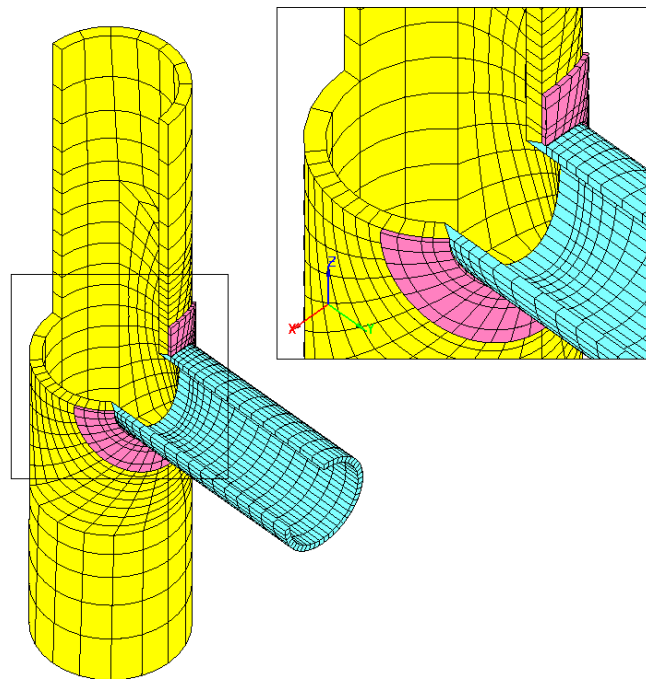
*Рис. 4* Тройник сварной с зачищенным швом и  
плакирующим слоем. ИПКЭ16 (ИПКЭ20)



*Рис. 5 Тройник сварной с зачищенным швом и накладкой. СПКЭ по срединной поверхности*



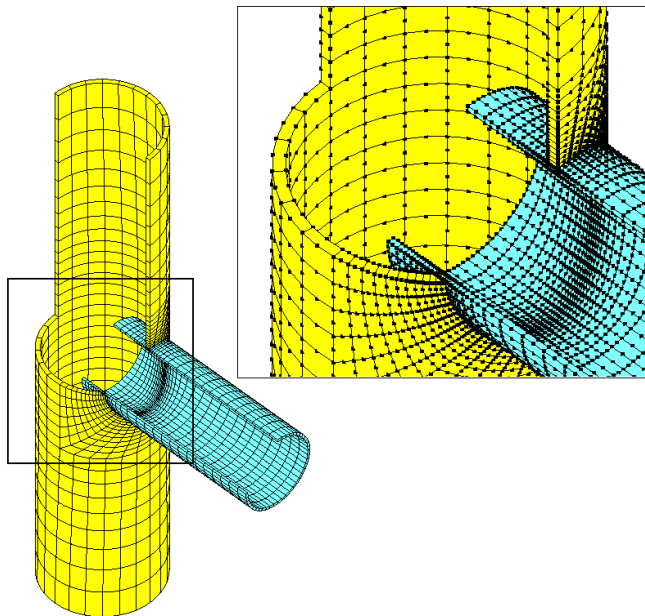
*Рис. 6 Тройник сварной с зачищенным швом и накладкой. СПКЭ по верхней и нижней поверхности*



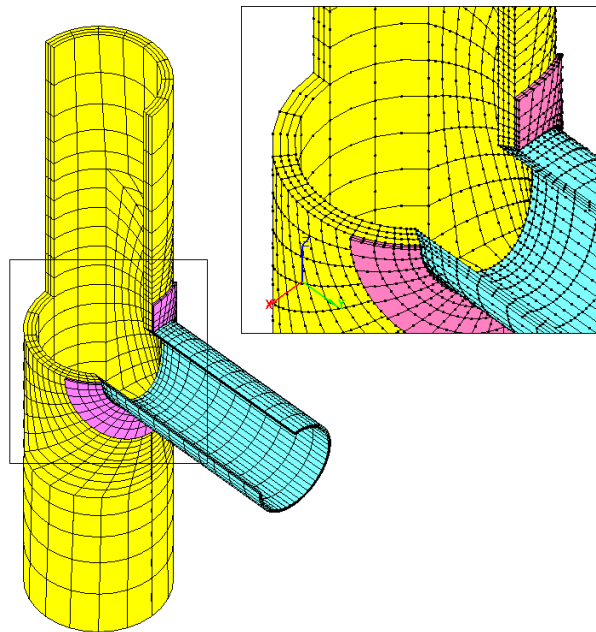
*Рис. 7 Тройник сварной с пропущенным штуцером.*

*Рис. 8 Тройник сварной с зачищенным швом и накладкой.*

*СПКЭ по срединной поверхности*



*ИПКЭ16 (ИПКЭ20) многослойная схема*



## Введение

Рис. 9 Тройник сварной с защищенным швом, накладкой и плакирующим слоем. ИПКЭ16 (ИПКЭ20) многослойная схема

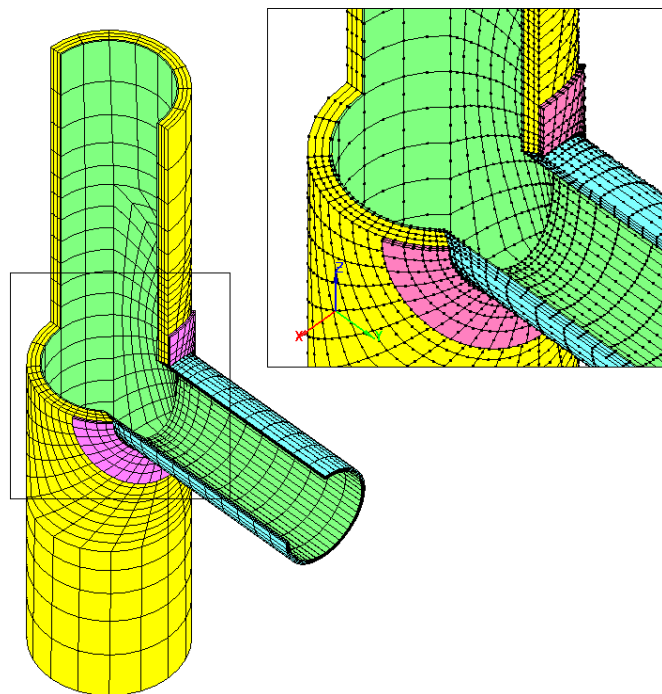
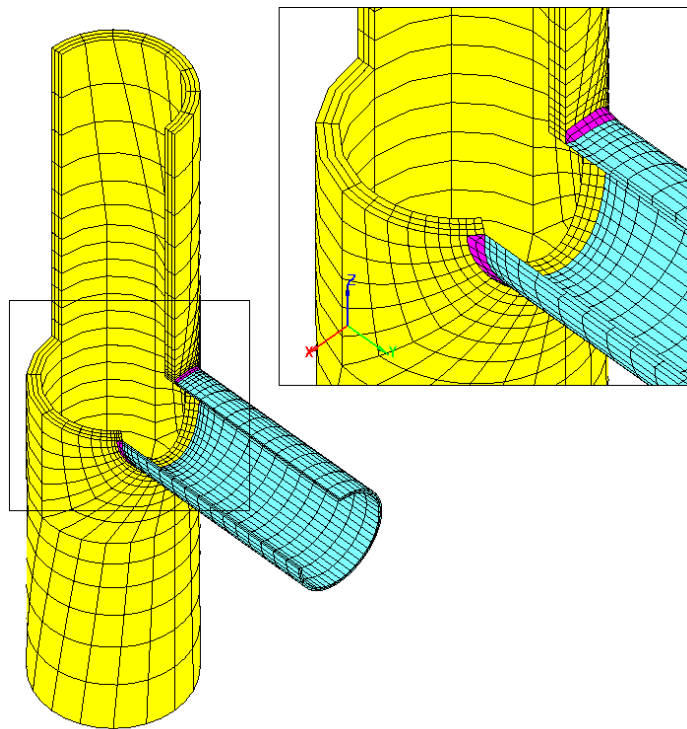
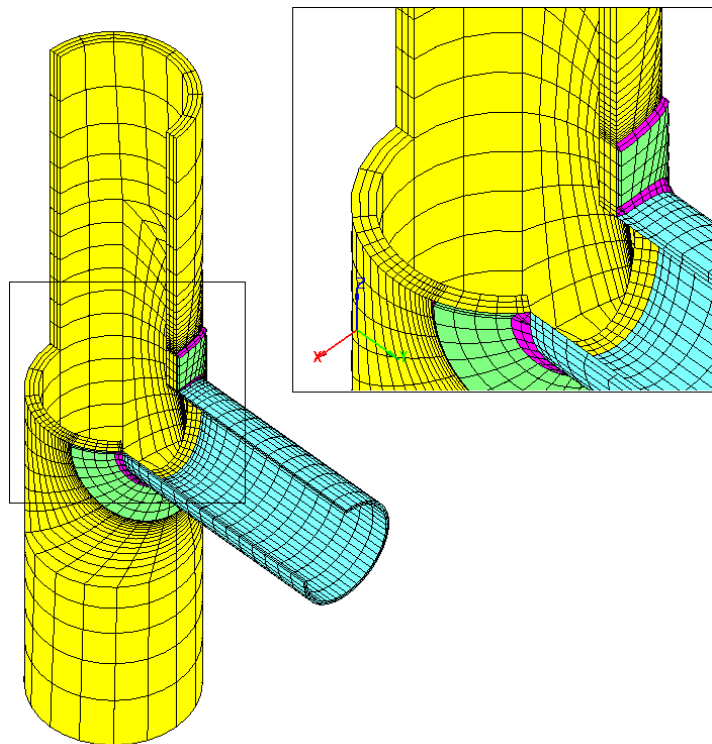


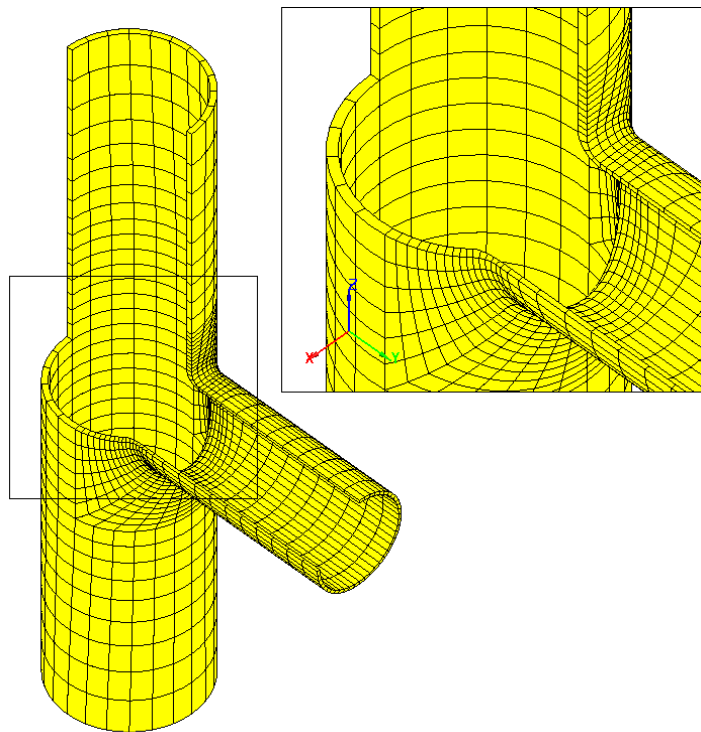
Рис. 10 Тройник сварной со швом (“треугольник”) “штуцер-магистраль”. ИПКЭ20 многослойная схема



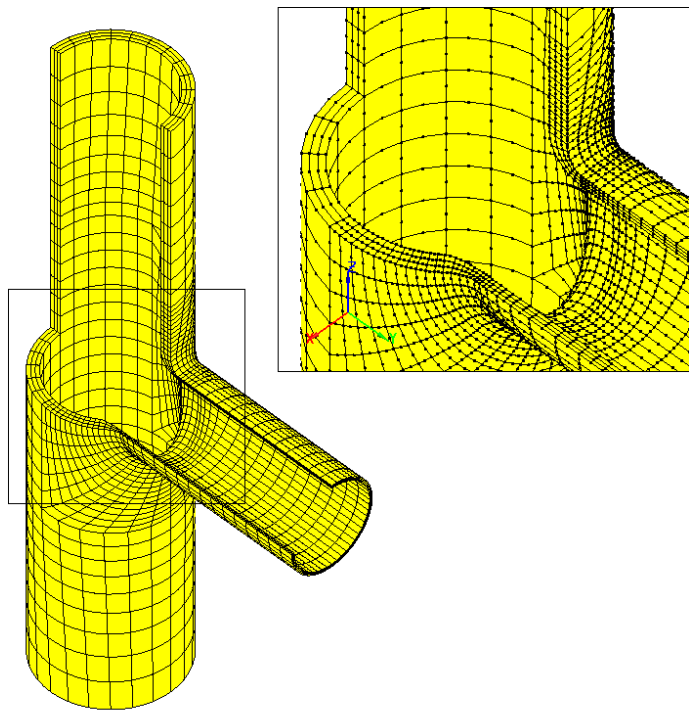
*Рис. 11 Тройник сварной с накладкой и швами “штуцер-магистраль-накладка” и “магистраль-накладка”. ИПКЭ20 многослойная схема*



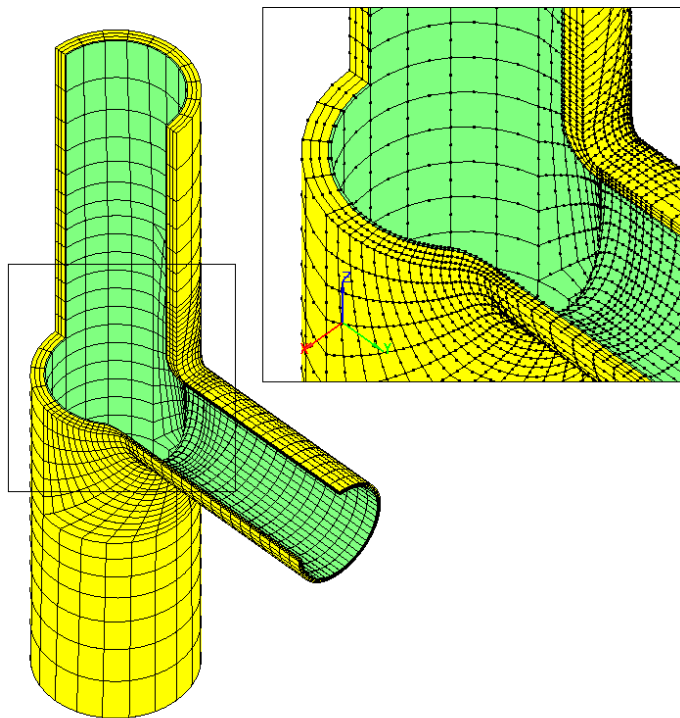
*Рис. 12 Тройник штампованный и штампосварной (с тянутой горловиной). СПКЭ*



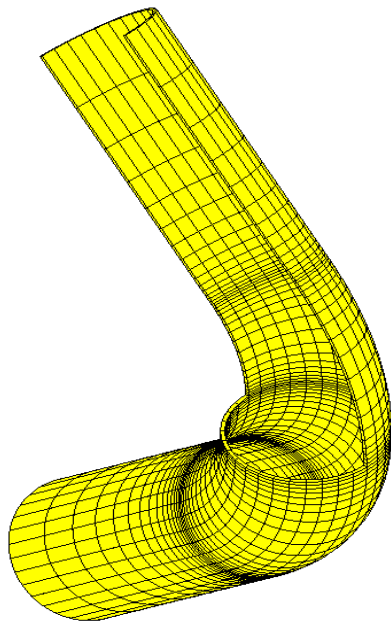
*Рис. 13 Тройник штампованный и штампосварной (с тянутой горловиной). ИПКЭ многослойная схема*



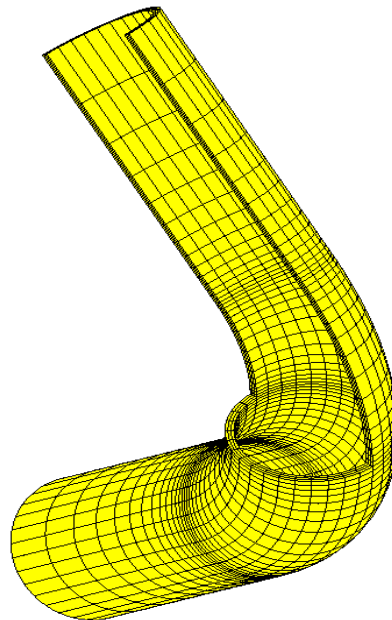
*Рис. 14 Тройник штампованный и штампосварной (с тянутой горловиной) с плакирующим слоем. ИПКЭ многослойная схема*



*Рис. 15 Отвод гнутый (с примыкающими трубами). СПКЭ*

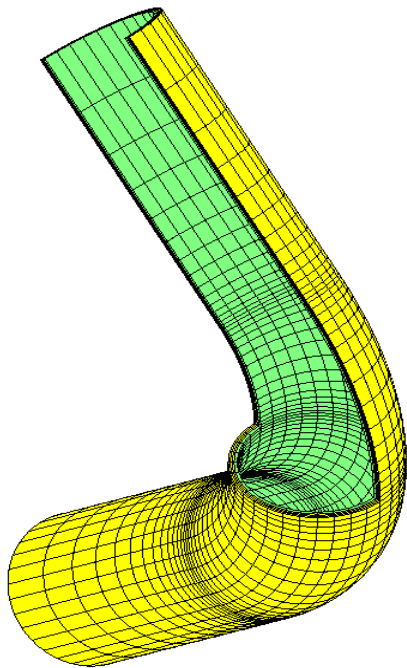


*Рис. 16 Отвод гнутый (с примыкающими трубами). ИПКЭ16 (ИПКЭ20) многослойная схема*

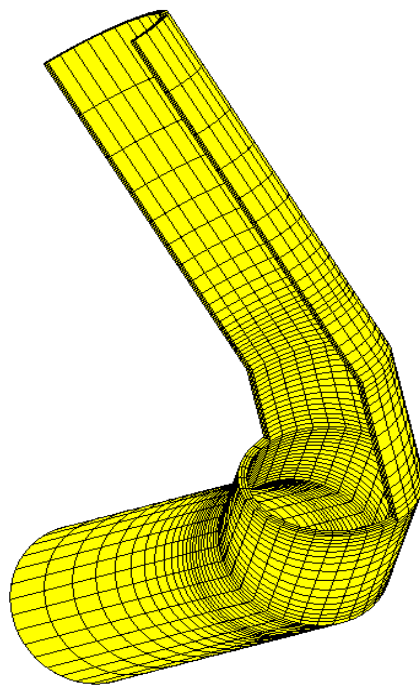




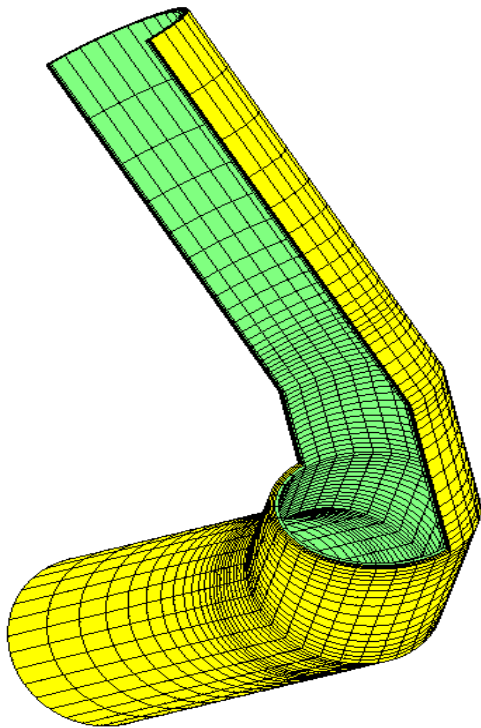
*Рис. 17 Отвод гнутый (с примыкающими трубами) с  
плакирующим слоем.ИПКЭ16 (ИПКЭ20) многослойная схема*



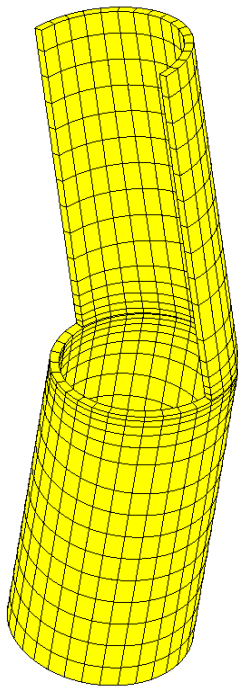
*Рис. 18 Отвод секторный (с примыкающими трубами).  
ИПКЭ многослойная схема*



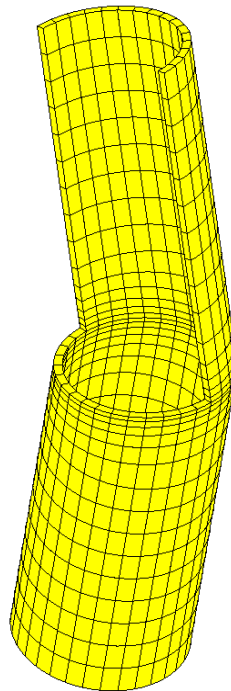
*Рис. 19 Отвод секторный (с примыкающими трубами) и  
плакирующим слоем. ИПКЭ многослойная схема*



*Рис. 20 Косой стык. СПКЭ, пересечение по  
срединной поверхности*

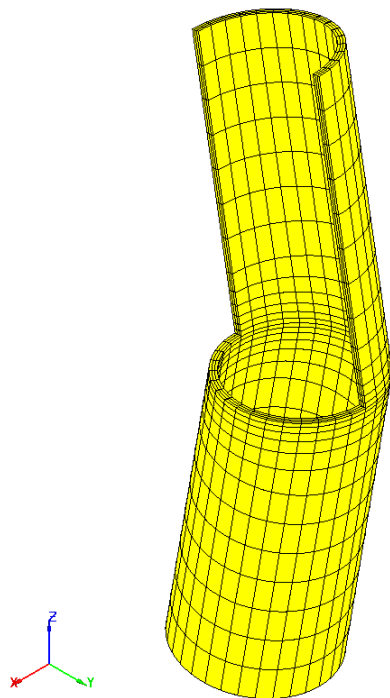


*Рис. 21 Косой стык. СПКЭ, пересечение по верхней и нижней  
поверхности*



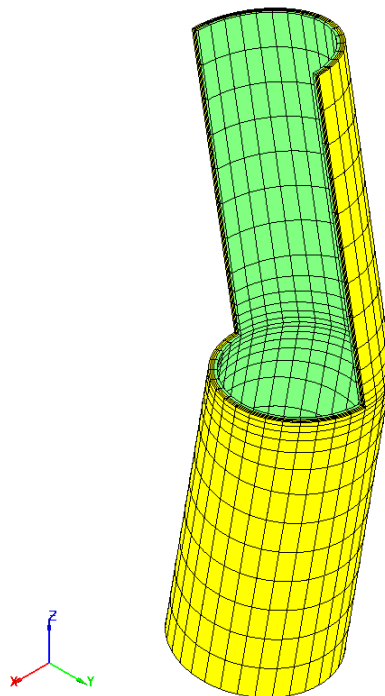
*Рис. 22 Косой стык. ИПКЭ многослойная схема*

ИПКЭ 16



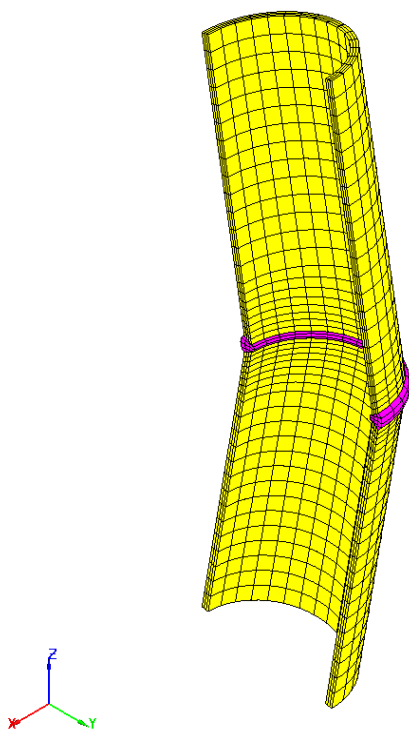
*Рис. 23 Косой стык с плакирующим слоем.ИПКЭ многослойная схема*

ИПКЭ 16



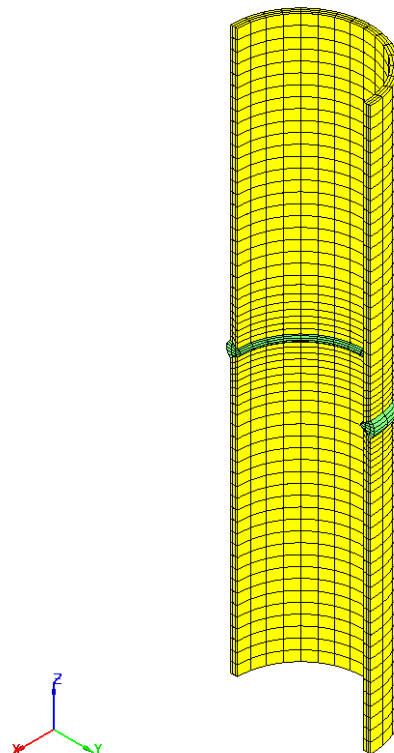
*Рис. 24 Косой стык со сварным швом. ИПКЭ  
многослойная схема*

ИПКЭ 20



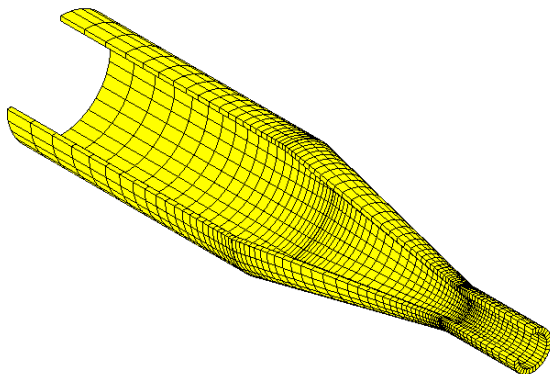
*Рис. 25 Прямая труба с кольцевым сварным швом.  
ИПКЭ многослойная схема*

ИПКЭ 20



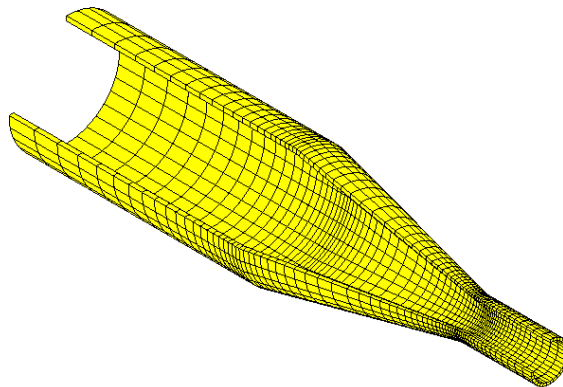
*Рис. 26 Переход. СПКЭ, по срединной поверхности*

СПКЭ

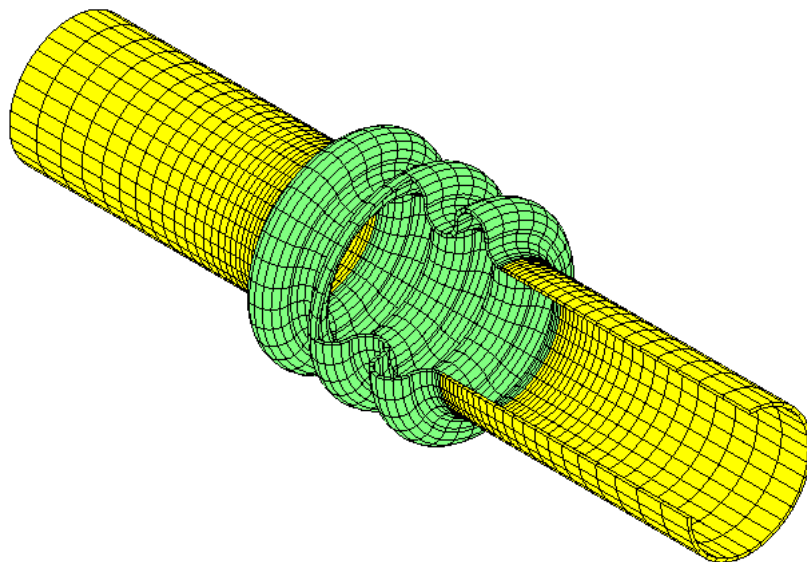


*Рис. 27 Переход. СПКЭ, по верхней и нижней поверхности*

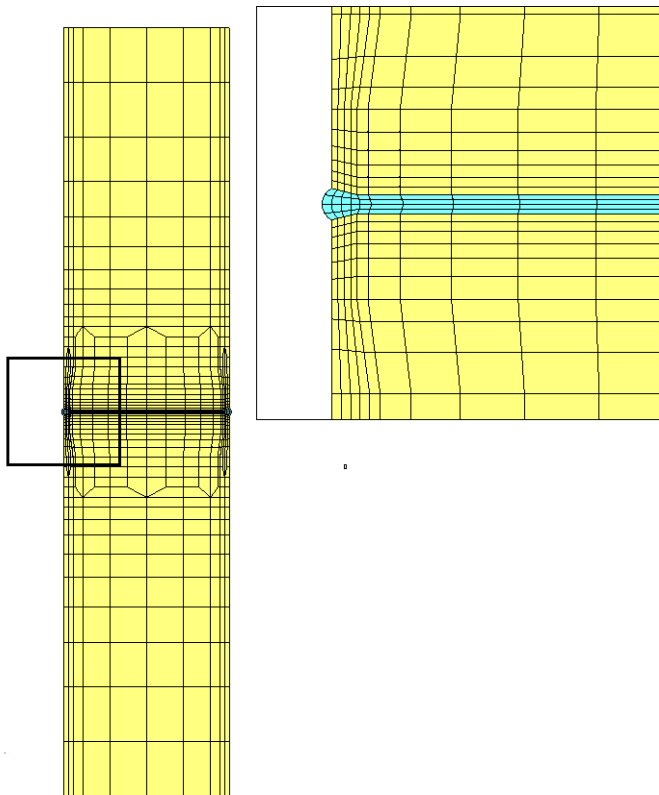
СПКЭ



*Рис. 28 Компенсатор (сильфонный, линзовый)*

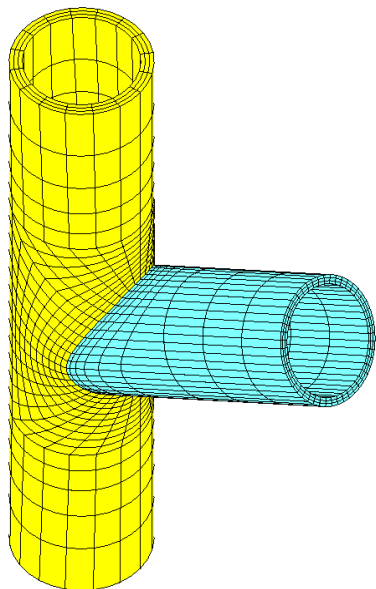


*Рис. 29 Сварное соединение труб. ИПКЭ20*

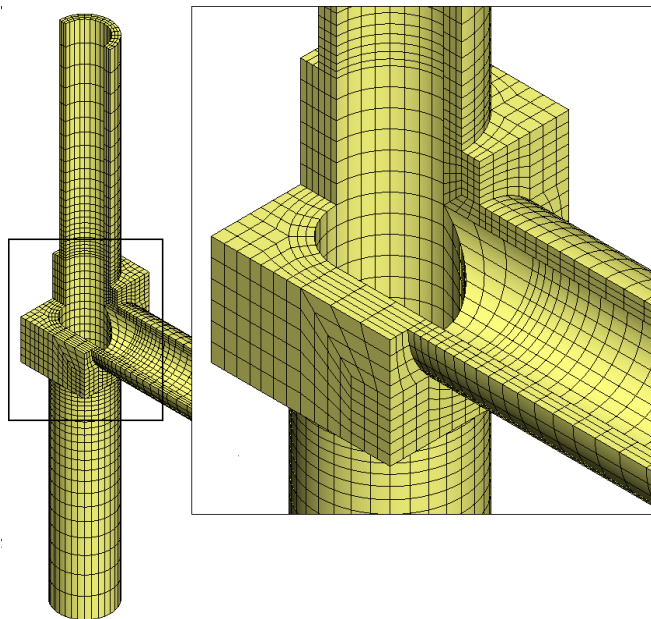




*Рис. 30 Сварной тройник с неортогональным  
штуцером. ИПКЭ20*



*Рис. 31 Сверлёный тройник с некольцевым корпусом.  
ИПКЭ20*

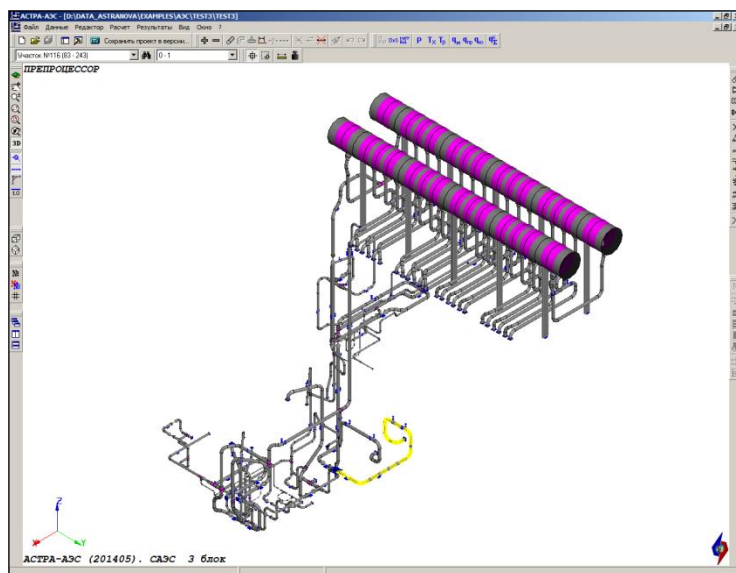


## Краткое описание сеанса работы с ПК АСТРА-СТАДИО

Для уточнения температурного поля, НДС, оценки статической, циклической и сейсмической прочности детали в ПК АСТРА-СТАДИО необходимо сделать следующее:

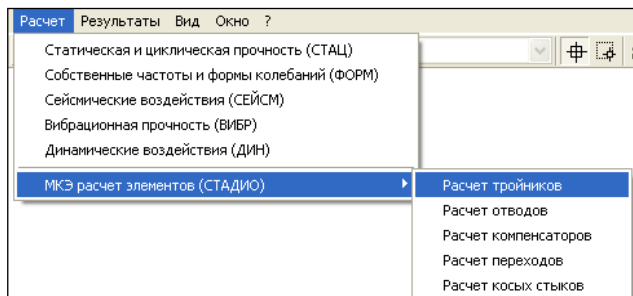
1. Проведите статический или сейсмический расчет в АСТРА-НОВА. Несмотря на то, что в программе АСТРА-НОВА сейсмический расчет может проводиться без предварительного статического расчета, для оценки сейсмических напряжений с учетом статики в АСТРА-СТАДИО необходимо провести статический расчет в АСТРА-НОВА, т.е. должны присутствовать результаты расчета Этапа 1
2. Выберите деталь-элемент трубопровода в графическом окне, результаты по которому необходимо уточнить при помощи МКЭ-расчета (Рис. 32). Вы можете пропустить этот пункт, и выбрать элемент в последующем диалоге (Рис. 34).

Рис. 32 Выбор элемента в АСТРА-НОВА



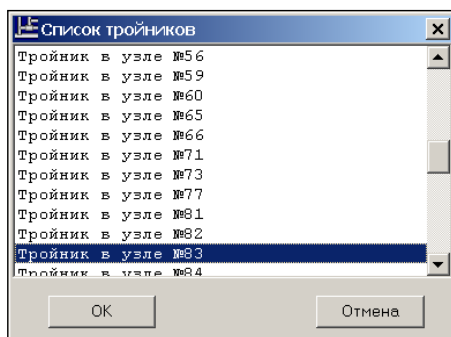
3. Выберите необходимый тип расчета в Меню *Расчет* (Рис. 33). Пункты данного меню активны в зависимости от наличия элементов в схеме, а также от наличия результатов расчетов на статическую и циклическую прочность и сейсмовоздействия.

*Рис. 33 Меню МКЭ-расчет элементов в АСТРА-НОВА*

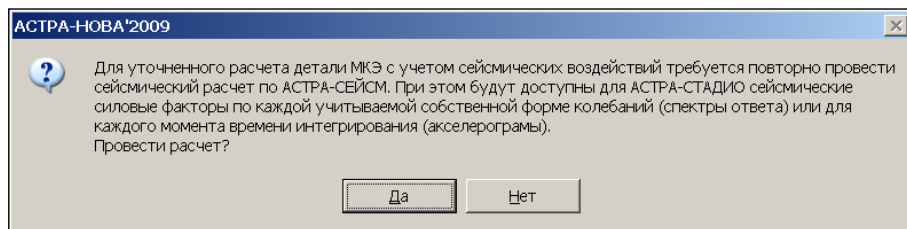


4. Окончательно подтвердите выбор элемента (Рис. 34). В случае наличия результатов расчета на сейсмозодействия может быть выдано следующее предупреждение (Рис. 35)

*Рис. 34 Диалог для окончательного выбора элемента в АСТРА-НОВА*



*Рис. 35 Отказ или подтверждение повторного сейсмического расчета*



При ответе “Да” повторяется сейсмический расчет с сохранением силовых факторов для каждой учитываемой собственной формы колебаний (спектры ответа) или для каждого момента интегрирования (акселерограммы).

При ответе “Нет” в АСТРА-СТАДИО поступают только статические нагрузки в случае их наличия. При их отсутствии нагрузки придется задавать в АСТРА-СТАДИО вручную.

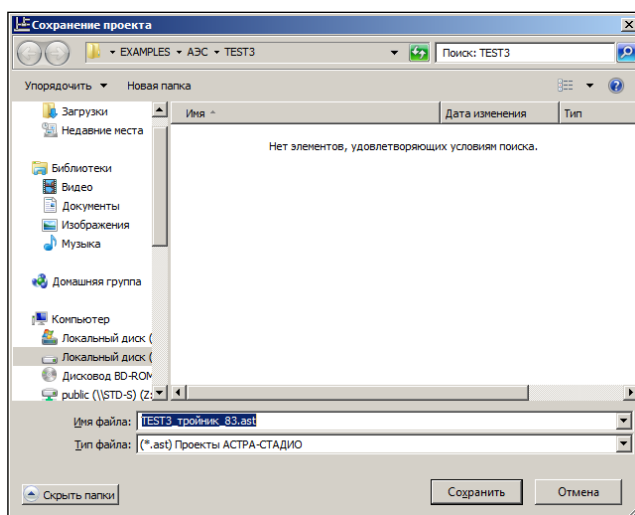
5. Сохраните файл АСТРА-СТАДИО в нужной Вам папке (Рис. 36). В выбранной Вами папке в дальнейшем будут располагаться файлы с исходными данными и результатами расчета.

Название файла АСТРА-СТАДИО формируется по следующему шаблону: *<имя проекта>\_<тип детали>\_<расположение детали>.ast*, где

- *<имя проекта>* – имя файла проекта *АСТРА-НОВА*;
- *<тип детали>* – тройник, отвод, переход, компенсатор, стык (для косого стыка и сварного шва);
- *<расположение детали>* – идентифицирует положение детали в модели АСТРА-НОВА, номера узла для тройников, номера участка и номера первого сечения детали (для отводов, переходов, компенсаторов), номера участка и номера сечения (стык и сварной шов).

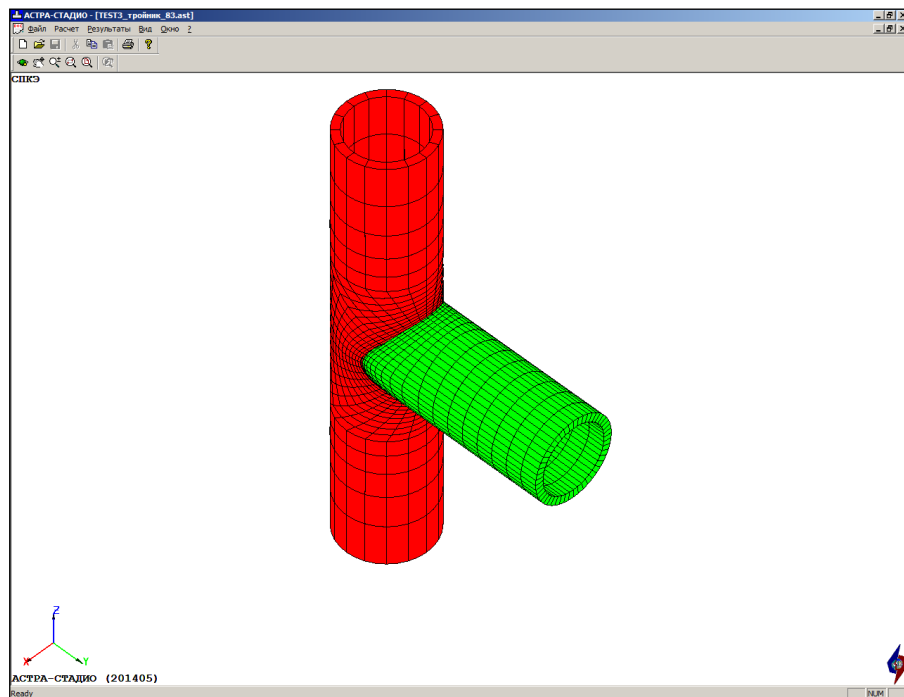
Название файла, сформированное таким образом, позволяет сохранить соответствие между файлами *АСТРА-НОВА* и файлами *АСТРА-СТАДИО*. При желании можно изменить название.

Рис. 36 Сохранение проекта АСТРА-СТАДИО



После нажатия кнопки *Сохранить* автоматически запустится ПК АСТРА-СТАДИО с выбранным элементом (Рис. 37).

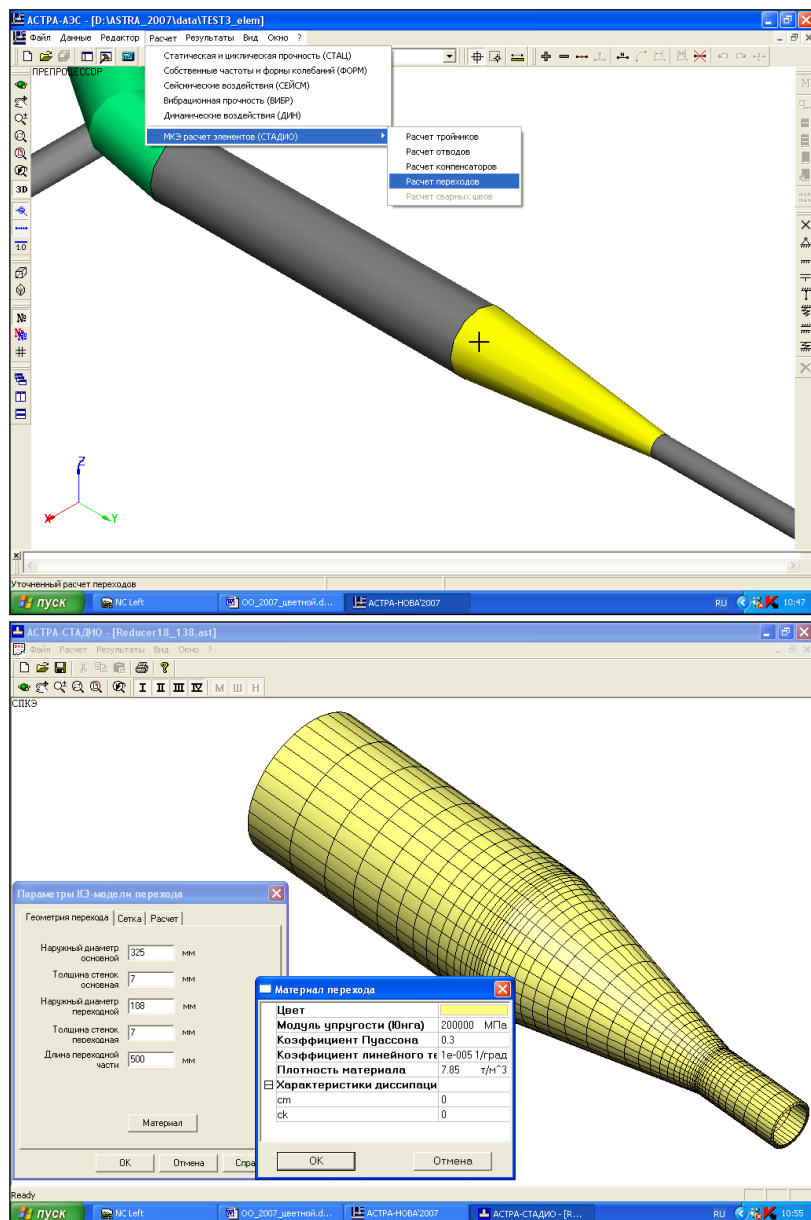
*Рис. 37 ПК АСТРА-СТАДИО с элементом трубопровода, полученным из АСТРА-НОВА*



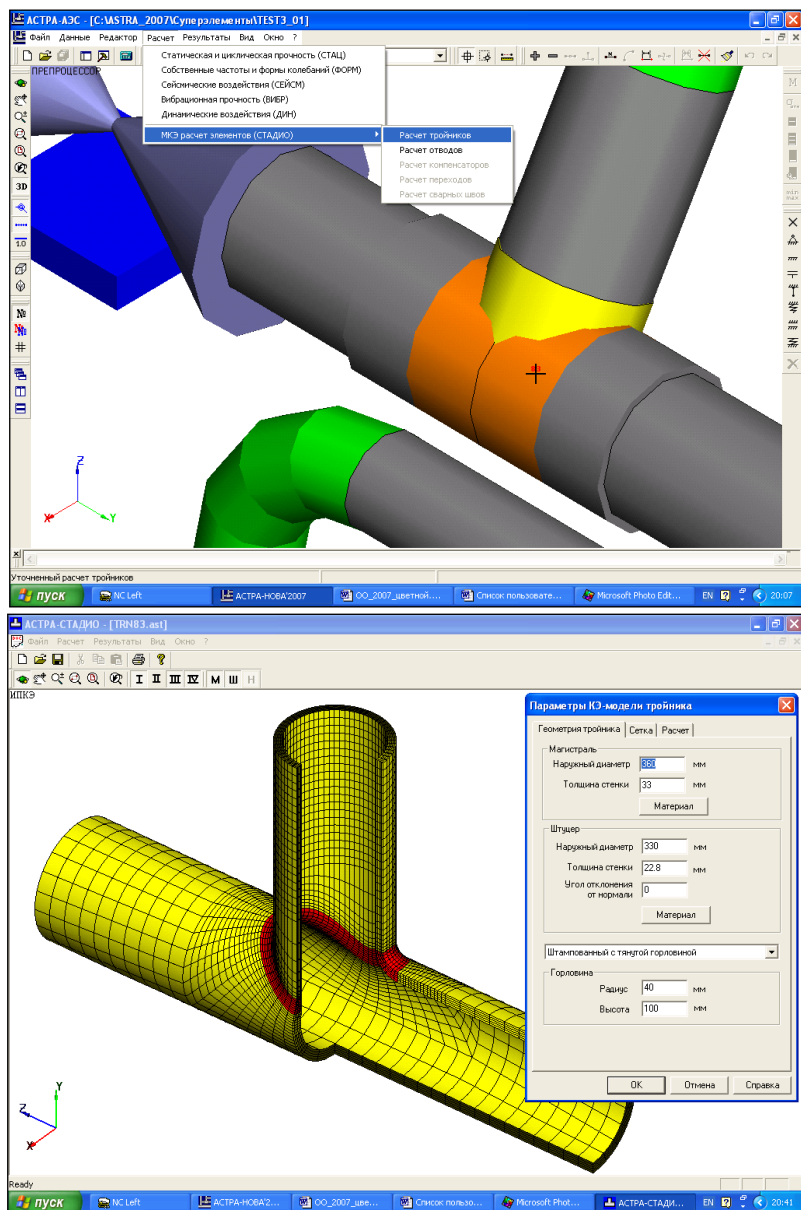
8. Проведите расчет в АСТРА-СТАДИО. В режиме постпроцессора проанализируйте и выберите необходимые результаты в табличных и графических видах для формирования отчетных материалов.

Импорт данных из АСТРА-НОВА и генерация конечноэлементных моделей деталей на примерах конического перехода и штампованного тройника (Рис. 38 и Рис. 39).

Рис. 38 АСТРА-СТАДИО. Импорт данных из АСТРА-НОВА и генерация конечноэлементных моделей деталей (на примере конического перехода)



*Рис. 39 АСТРА-СТАДИО. Импорт данных из АСТРА-НОВА и генерация конечноэлементных моделей деталей (на примере штампованного тройника)*



## Меню Файл

Новый	Ctrl+N
Открыть...	Ctrl+O
Сохранить	Ctrl+S
Сохранить как...	
Установки...	
Печать...	Ctrl+P
Предварительный просмотр	
Настройка принтера...	
1 TRN_83.ast	
2 ELB_6_79.ast	
3 TRN_1.ast	
4 тройник.ast	
Выход	

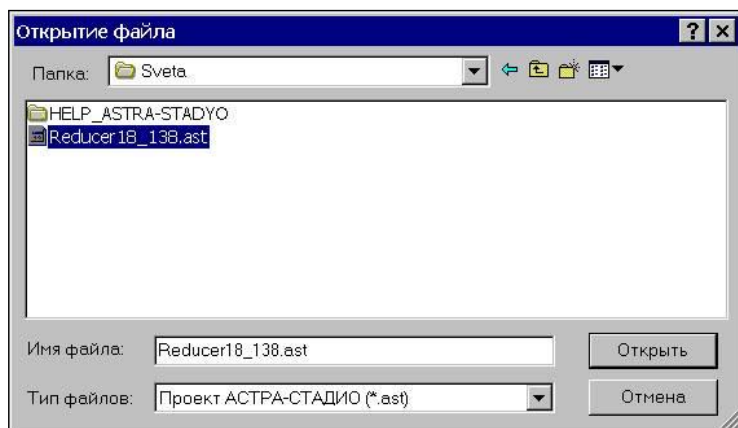


## Новый

Создание нового проекта АСТРА-СТАДИО

## Открыть

Открытие существующего проекта АСТРА-СТАДИО

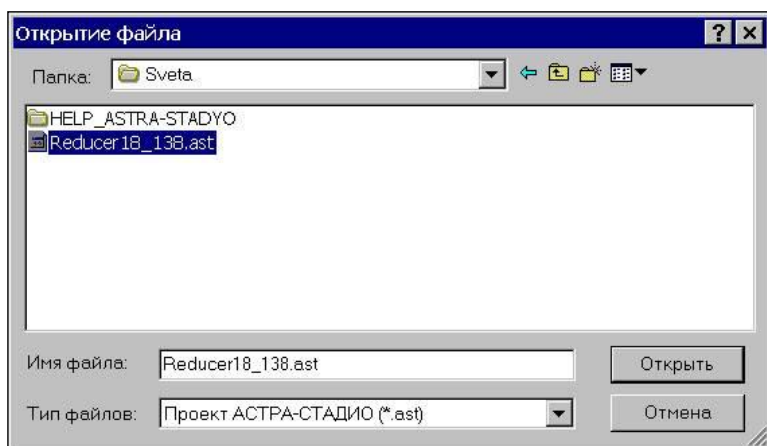


## Сохранить

Сохранение активного проекта АСТРА-СТАДИО

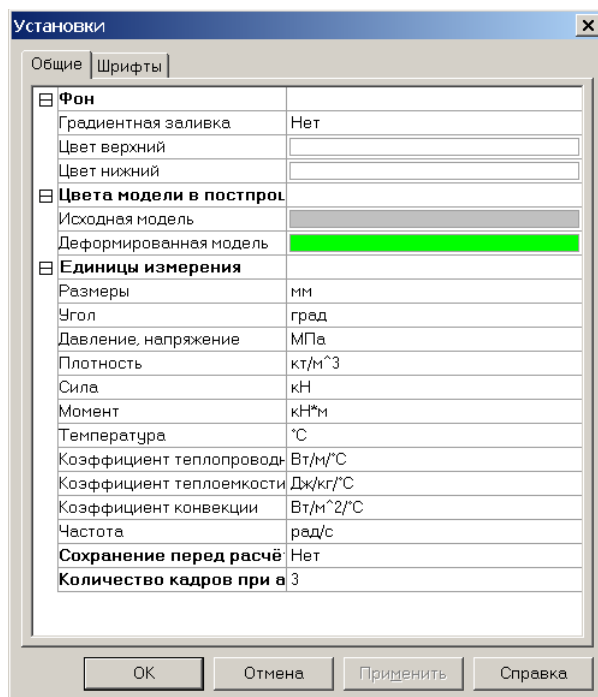
## Сохранить как

Сохранить и открыть проект под новым именем



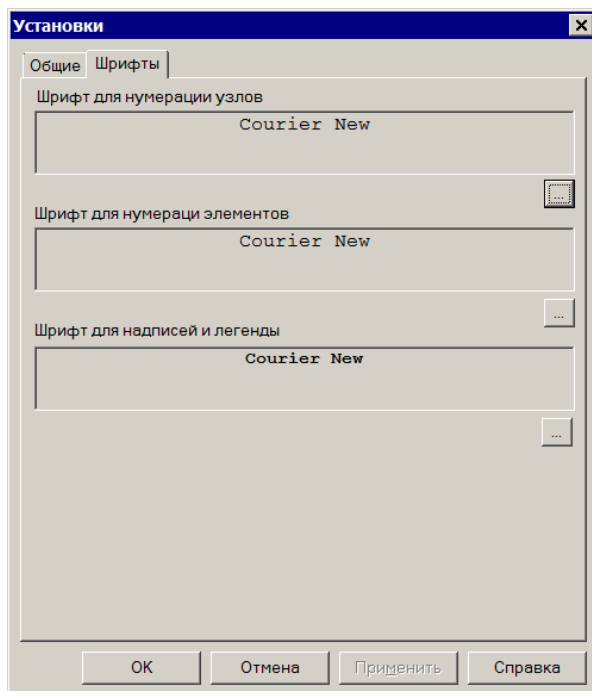
## Установки;

Этот пункт в меню [Файл](#) вызывает следующий диалог



Здесь Вы можете

- Изменить цвета фона по Вашему вкусу. По желанию можно использовать градиентную заливку фона (плавное изменение цвета от Цвета внизу графического окна до Цвета сверху).
- Настроить цвета для визуализации исходной модели и результатов расчета (перемещений) в постпроцессоре;
- Настроить единицы измерения для задания исходных данных и отображения результатов при их визуализации и в отчёте;
- Выбрать опцию автоматического сохранения перед расчётом;
- Указать количество кадров от 2 до 10 при анимации собственных форм колебаний. Чем больше кадров, тем анимация выполняется более плавно, однако в этом случае возрастает время подготовки анимации.



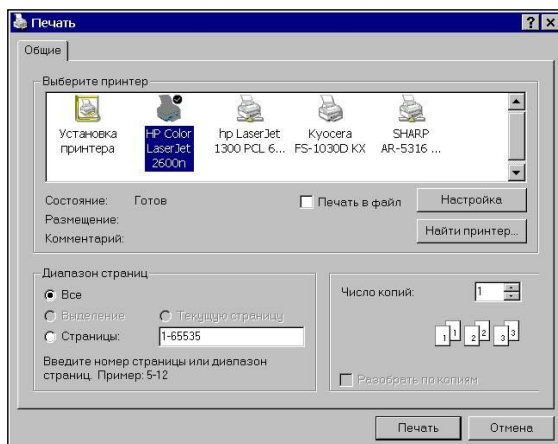
Здесь можно выбирать шрифты:

- Шрифт для нумерации узлов;
- Шрифт для нумерации элементов;
- шрифт для надписей и легенды;

Для выбора шрифта нажмите кнопку справа. При этом появится стандартный диалог Windows для выбора шрифта.

## Печать

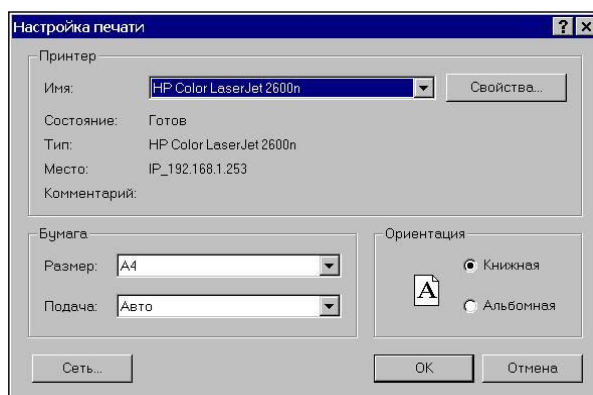
Печать содержимого активного окна



## Предварительный просмотр

Предварительный просмотр активного окна на экране перед печатью

## Выбор и настройка принтера

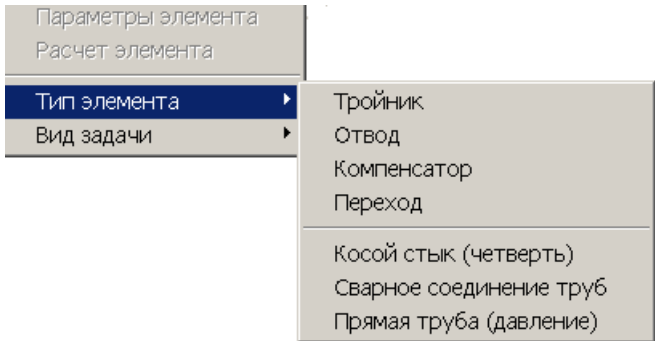


## Выход

Выход – выход из программы

Меню Расчёт

Рис. 40 Меню Расчёт



В меню *Расчет* осуществляется выбор типа элемента (Рис. 41), вида решаемой задачи (Рис. 42), а также настройка параметров расчётной КЭ-модели элемента

Рис. 41 Типы элементов

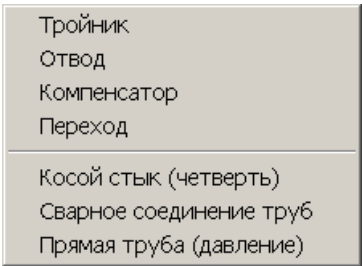
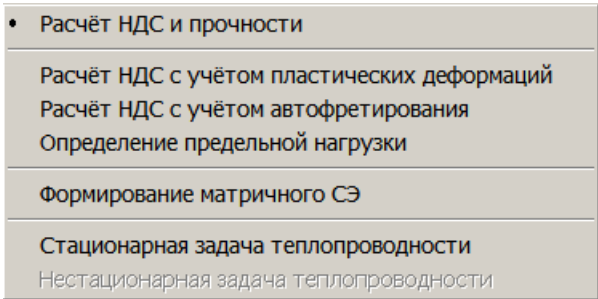


Рис. 42 Вид задачи



### Параметры модели (расчёт) тройника

В случае выбора пункта *Параметры модели тройника* при нажатии кнопки ОК происходит автоматическая генерация расчетной модели тройника, в случае выбора пункта *Расчет тройника* дополнительно к этому происходит запуск расчета сгенерированной расчетной модели.

Диалог *Параметры модели тройника* / *Расчет тройника* состоит из трех вкладок (Рис. 43, Рис. 52, Рис. 54).

## Закладка Общие

Закладка *Общие* содержит поля для ввода геометрических параметров, свойств материалов, параметров конвекции и т.д.

Рис. 43 Закладка Общие данных расчётной модели тройника

Параметры модели тройника		
Общие   Сетка   Расчёт		
<b>Вид тройника</b>	Сварной	
<b>Полная модель</b>	Нет	
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Материал магистрали</b>		
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Материал штуцера</b>		
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Материал сварных швов</b>		
<input type="checkbox"/> <b>Геометрия магистрали</b>		
Наружный диаметр	133	мм
Толщина стенки	6	мм
Длина	310.5	мм
<input type="checkbox"/> <b>Геометрия штуцера</b>		
Наружный диаметр	89	мм
Толщина стенки	5	мм
Длина	244.5	мм
Пропущенный штуцер	Нет	
<b>Плакирующий слой</b>	Нет	
<input type="checkbox"/> <b>Сварные швы</b>	Да	
Ширина внутреннего корня шва	2	мм
Ширина наружного корня шва	11	мм
Высота наружного корня шва	6	мм
<b>Задача теплопроводности</b>	Да	
Температура на внутренней поверхности	100	°C
<input type="checkbox"/> <b>Параметры конвекции</b>		
Коэффициент конвекции на магистрали	750	Вт/м <sup>2</sup> /°C
Температура среды на магистрали	20	°C
Коэффициент конвекции на штуцере	750	Вт/м <sup>2</sup> /°C
Температура среды на штуцере	20	°C

OK

Отмена

В зависимости от выбранного вида тройника, наличия /отсутствия сварных швов, плакирующего слоя и т.п., те или иные пункты не видны или не активны.

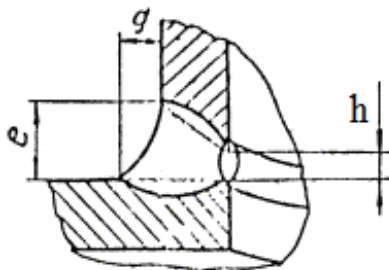
Таблица 2 Параметры геометрической модели тройника

<b>Вид тройника</b>	Доступны следующие виды тройников: – Сварной – Сварной с укрепляющей накладкой – Штампованный с тянутой горловиной – Сверленный
<b>Полная модель</b>	Нет/Да – использование полной модели
<b>Материал магистрали</b>	Для всех материалов, используемых в модели, задаются:  – Цвет (для отображения модели) – Модуль упругости Юнга – Коэффициент Пуассона – Коэффициент линейного температурного расширения – Плотность – Коэффициент теплопроводности – Модель материала (линейная, билинейное изотропное упрочнение, мультилинейное изотропное упрочнение) – Предел текучести – Тангенциальный модуль упругости – Диаграмма деформирования
<b>Материал штуцера</b>	
<b>Материал накладки</b>	
<b>Материал плакирующего слоя</b>	
<b>Материал сварных швов</b>	
<b>Материал тройника</b>	
<b>Геометрия магистрали</b>	– Наружный диаметр – Толщина стенки – Длина (если задан 0, то определяется автоматически)
<b>Геометрия штуцера</b>	– Наружный диаметр – Толщина стенки – Длина (если задан 0, то определяется автоматически) – Пропущенный штуцер (Нет/Да) – Длина пропущенной части
<b>Геометрия накладки</b>	– Ширина – Толщина – Угол фаски (для сварного шва)
<b>Геометрия горловины</b>	– Радиус – Высота



<b>Плакирующий слой</b>	<i>Нет/Да</i> – наличие плакирующего слоя – Толщина на магистрали – Толщина на штуцере
<b>Сварные швы</b>	<i>Нет/Да</i> – наличие сварных швов ([73]-[76]) – Ширина внутреннего корня шва (параметр $h$ на Рис. 44) – Ширина наружного корня шва (параметр $e$ на Рис. 44) – Высота наружного корня шва (параметр $g$ на Рис. 44)
<b>Задача теплопроводности</b>	<i>Нет/Да</i> – предварительное решение задачи теплопроводности
<b>Разность температур между рабочим и холодным состоянием</b>	Если задача теплопроводности не решается, задаётся разность температур,
<b>Температура на внутренней поверхности</b>	При решении задачи теплопроводности задаётся температура на внутренней поверхности
<b>Параметры конвекции</b>	При решении задачи теплопроводности дополнительно задаются: – Коэффициент конвекции на магистрали – Температура среды в магистрали – Коэффициент конвекции на штуцере – Температура среды в штуцере

Рис. 44 Параметры для моделирования сварного соединения



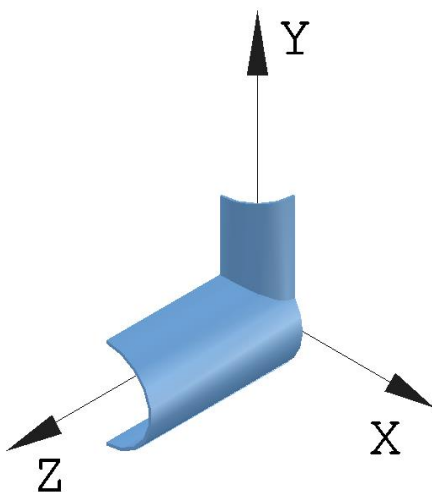
В случае использования **неполной модели**, расчётный фрагмент тройника представляет собой его четверть. Расчётная модель автоматически строится с использованием свойств циклической симметрии и антисимметрии давления  $p$  и 8 групп значимых самоуравновешенных торцевых нагрузок относительно двух плоскостей геометрической симметрии  $X=0$  и  $Z=0$  (Рис. 45).

В этом случае возможен расчёт только Т-образных радиальных ортогональных тройниковых соединений.

Таблица 3 Группы нагрузок тройника

Название нагрузки	Симметрия/ Антисимметрия
Давление	С-С
Температура	С-С
Осевые силы по торцу штуцера	С-С
Осевые силы по торцу магистрали	С-С
Изгибающий момент в магистрали в плоскости тройника	С-С
Изгибающий момент в штуцере в плоскости тройника	С-А
Момент в штуцере из плоскости тройника	А-С
Изгибающий момент в магистрали из плоскости тройника	А-С
Крутящий момент в штуцере	А-А
Крутящий момент в магистрали	А-А

Рис. 45 Расчётный фрагмент тройника и расположение осей



В случае использования **полной модели** расчётный фрагмент представляет собой целый тройник. Расчётная модель строится по “консольной” схеме с учётом давления  $p$  и 8 групп значимых самоуравновешенных торцевых нагрузок. Для полной модели этом случае возможен расчёт радиальных косых тройниковых соединений. Поле *Угол отклонения от нормали в Геометрии штуцера* становится активным.

## Материал (тройника, магистрали, штуцера, накладки, сварных швов)

Для просмотра и редактирования характеристик материала (магистрали, штуцера, накладки, сварных швов, плакирующего слоя) предназначено поле *Материал*.

После двойного нажатия на значек “+” рядом с полем нужного материала раскрываются характеристики материалов (Рис. 46).

Рис. 46 Характеристики материала

Материал магистрали		
Цвет		
Модуль упругости (Юнга)	200000	МПа
Коэффициент Пуассона	0.3	
Коэффициент линейного температурного расширения	1e-005	1/град
Плотность	0.00785	кг/м <sup>3</sup>

Помимо физико-механических свойств материала также можно настроить цвет материала для отображения в исходной модели.

Рис. 47 Поля для ввода основных геометрических характеристик тройника

Геометрия магистрали		
Наружный диаметр	325	мм
Толщина стенки	13	мм
Длина	800	мм
Геометрия штуцера		
Наружный диаметр	219	мм
Толщина стенки	7	мм
Длина	300	мм
Угол фаски	45	град
Пропущенный штуцер	Да	
Длина пропущенной части	100	мм

Рис. 48 Дополнительные параметры для задачи теплопроводности

Задача теплопроводности		
Температура на внутренней поверхности	100	°C
Параметры конвекции		
Коэффициент конвекции на магистрали	750	Вт/м <sup>2</sup> /°C
Температура среды на магистрали	20	°C
Коэффициент конвекции на штуцере	750	Вт/м <sup>2</sup> /°C
Температура среды на штуцере	20	°C

*Рис. 49 Дополнительные параметры для тройника с накладкой*

Геометрия накладки		
Ширина	40	мм
Толщина	7	мм
Угол фаски	45	град

*Рис. 50 Дополнительные параметры для тройника с тянутой горловиной*

Геометрия горловины		
Радиус	20	мм
Высота	100	мм

*Рис. 51 Дополнительные параметры для сверлёного тройника с некольцевой зоной*

Размеры некольцевой зоны		
По X	487.5	мм
По Y	487.5	мм
По Z	487.5	мм

## Закладка Сетка

Рис. 52 Закладка Сетка

Параметры модели тройника	
Общие Сетка Расчет	
<input type="checkbox"/> Тип КЭ	Оболочечные СПКЭ
Пересечение по срединной повер	Да
Перенумерация Катхилла-Макс	Да
<input checked="" type="checkbox"/> Параметры по умолчанию	Да
Коэффициент сгущения	1.1
Коэффициент при начальном шаге	0.1
Количество КЭ на четверти штуцера	16
Тип краевых условий	"Мягкие"

OK Отмена Справка

Закладка **Сетка** содержит поля для ввода данных, влияющих на формирование сетки.

Если в поле **Параметры по умолчанию** выбрано «да», то параметры для формирования сетки выбираются автоматически. Для изменения параметров генерации КЭ-сетки следует в поле **Параметры по умолчанию** выбрать «нет», после этого становятся активными следующие поля *Коэффициент сгущения*, *Количество КЭ на четверти штуцера*, *Количество КЭ на горловине*, *Коэффициент при начальном шаге*.

*Коэффициент сгущения* – вещественное число большее 1, следует увеличить данный коэффициент для большей скорости сгущения линий сетки вблизи зоны сочленения штуцера и магистрали.

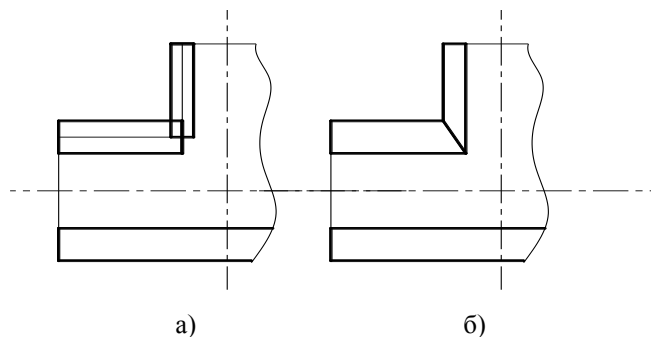
*Коэффициент при начальном шаге* – вещественное число, большее нуля, регулирует размер начального шага вблизи зоны сочленения штуцера и магистрали (в долях от  $(Rh)^{1/2}$ ). По умолчанию равен 0.2, рекомендуемый диапазон значений (0,1 – 0,2).

Возможно применение двух **типов конечных элементов**

- криволинейные оболочечные КЭ суперпараметрического семейства (СПКЭ)
- криволинейные трехмерные (объемные) КЭ изопараметрического семейства (ИПКЭ)

В случае применения оболочечных СПКЭ для сварных тройников возможно различное моделирование зоны пересечения магистрали и штуцера (Рис. 53)

*Рис. 53 Варианты пересечения магистрали и штуцера для оболочечных моделей сварных тройников*



Если поставить флажок напротив *Пересечение по срединной поверхности*, то будет использоваться вариант пересечения по срединной поверхности (Рис. 53, а), иначе используется “точное” моделирование зоны пересечения (Рис. 53, б).

В случае применения трехмерных ИПКЭ следует указать *количество слоев по толщине* в магистрали и накладке.

**Перенумерация Катхилла-Макки** – после генерации расчётной модели используется обратный алгоритм Катхилла-Макки для оптимизации нумерации с целью уменьшения ширины ленты матрицы жёсткости. Данной опцией следует пользоваться, если при расчёте будет использован прямой профильный метод факторизации (СТАДИО).

**Жесткие краевые условия** – торцы магистрали и штуцера как бы закрыты «крышками» конечных элементов: материал вблизи торцев тройника делается жестче, чем материал остального корпуса (модуль упругости умножается на задаваемое пользователем значение **Коэффициента контрастности**).

**Мягкие краевые условия** – торцы свободно деформируются: материал конечных элементов вблизи торцев тройника такой же, как материал всего тройника.

Для сварного тройника с накладкой предусмотрено две возможности работы накладки:

- **совместная работа накладки магистрали** – перемещения контактирующих узлов нижней поверхности накладки и наружной поверхности магистрали совпадают (жесткая связь по всей поверхности контакта)
- альтернатива – **жестко связаны только узлы по кромке накладки**.

В случае ввода неверных (нереальных) характеристик тройника выдается соответствующее предупреждение.

## Закладка Расчет

Рис. 54 Закладка Расчет

Расчет тройника

Общие Сетка **Расчёт**

☐ **Статика**

Метод расчёта	Метод сопряжённых градиентов ▼
Предобуславливатель	Последовательная верхняя
Относительная точность	1e-005
Предельное число итераций	1000

OK Отмена

- **Прямой (СТАДИО)** – профильный метод факторизации. Не требователен по оперативной памяти (используется дисковый файл), недостатком является относительно большое время счёта. Рекомендуются для тонко- и среднестенных оболочечных моделей.
- **Прямой (MUMPS)** – эффективный многофронтальный прямой решатель СЛАУ (**M**Ultifrontal **M**assively **P**arallel sparse direct **S**olver). Требователен



по оперативной памяти, но время счёта значительно сокращается по сравнению с прямым профильным методом факторизации.

- **Прямой (PARDISO)** – **рекомендуемый** прямой решатель СЛАУ (Parallel Direct Solver) из библиотеки Intel Math Kernel Library (Intel MKL). Требователен по оперативной памяти, но время счёта значительно сокращается по сравнению с прямым профильным методом факторизации. Данный прямой метод, разработанный специально для архитектуры SMP (symmetric multiprocessing), можно охарактеризовать, как исключительно эффективный. К существенным достоинством метода следует отнести высокую производительность и масштабируемость.
- **Метод сопряжённых градиентов** – итерационный метод из известного открытого математического пакета PETSc (Portable Extensible Toolkit for Scientific Computation – разработка Argonne National Laboratory/MCS division, США).

Для итерационного метода доступны следующие предобуславыватели:

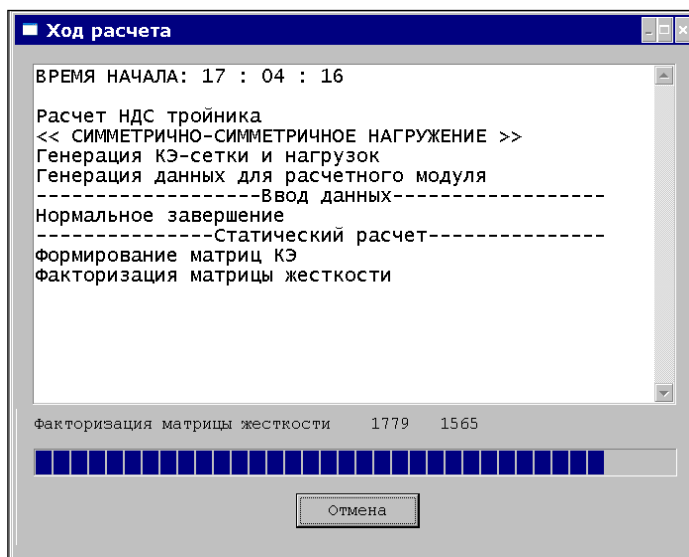
- Последовательная верхняя релаксация (рекомендуется для объемных моделей с ИПКЭ)
- Неполная факторизация Холецкого (рекомендуется для оболочечных моделей с СПКЭ)

Задаются также параметры выхода из итерационного процесса:

- Относительная точность
- Предельное число итераций

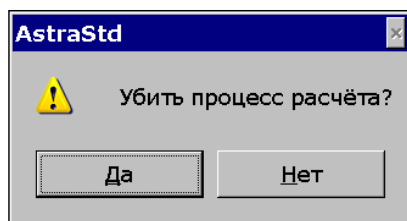
После нажатия ОК задача запускается на счет, ход которого отображается на экране (Рис. 55)

Рис. 55 Протокол хода расчета



После нажатия на кнопку Отмена процесс расчёта прекращается когда программа дойдёт до очередной контрольной точки вывод очередного сообщения на экран). При этом программа завершает работу корректно, рабочие файлы удаляются из рабочей директории. Для экстренного завершения процесса расчёта нужно нажать на крестик в правом верхнем углу окна *Ход расчёта*. После подтверждения (Рис. 56), процесс расчёта будет прерван, при этом все временные рабочие файлы сохранятся.

Рис. 56 Экстренное прерывание хода расчёта



КЭ-модели ортогональных радиальных тройников. а) сварной с зачищенным швом; б) сварной с накладкой; в) штампованный с тянутой горловиной и деформированное (а) и напряженное (б) состояния при заданных сочетаниях нагрузок, расчетная группа напряжений (в, этап 3, группа ( $\sigma_{aF}$ )<sub>к</sub>) тройникового соединения (Рис. 57, Рис. 58).

*Рис. 57 КЭ-модели ортогональных радиальных тройников. а) сварной с зачищенным швом; б) сварной с накладкой; в) штампованный с тянутой горловиной*

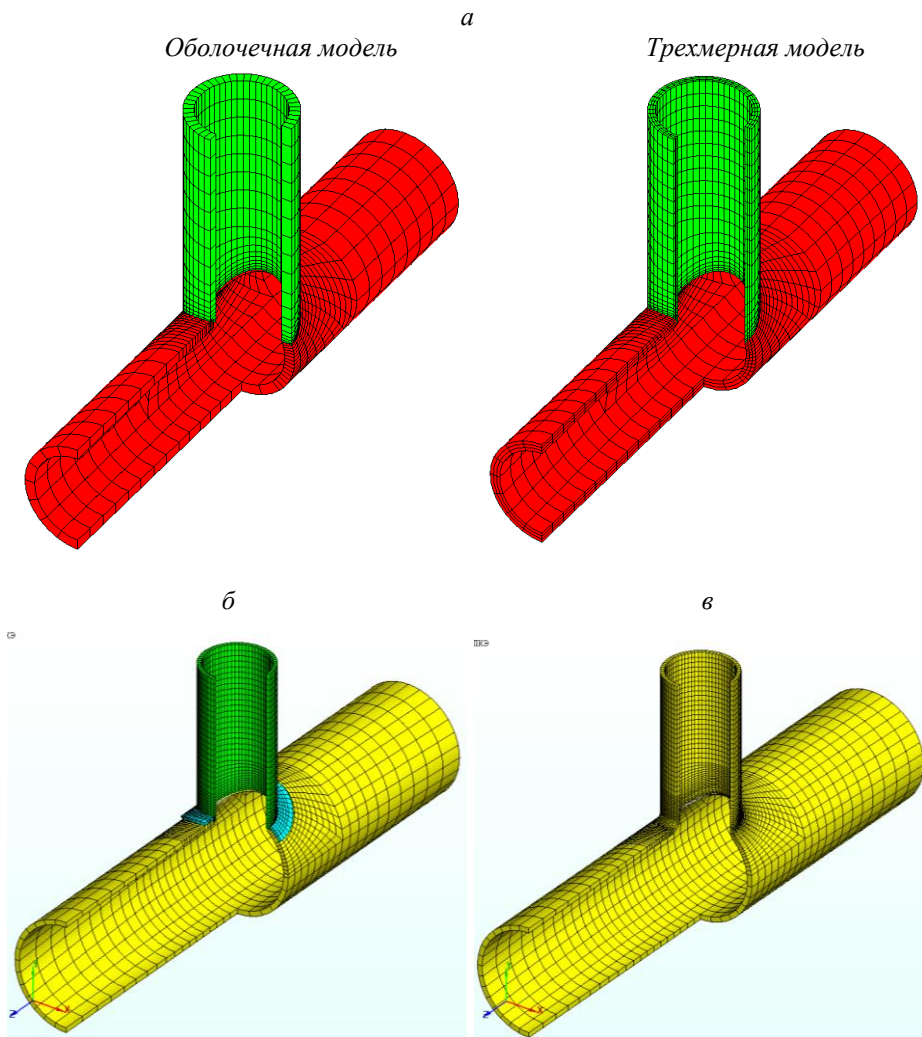
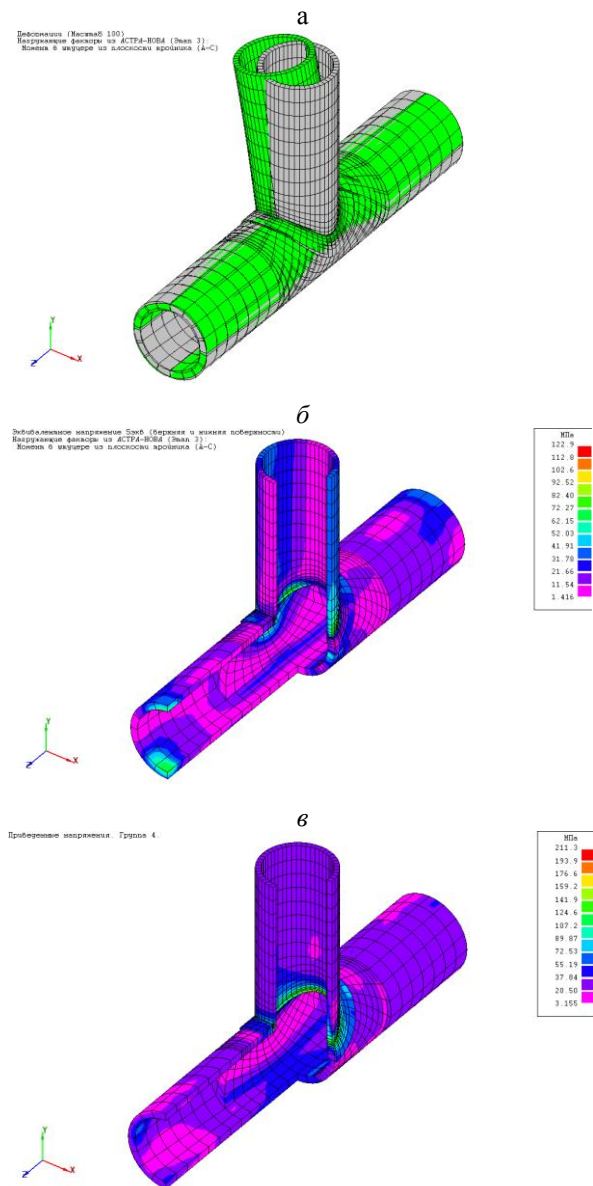


Рис. 58 Деформированное (а) и напряженное (б) состояния при заданных сочетаниях нагрузок, расчетная группа напряжений (в, этап 3, группа ( $\sigma_{aF}$ )К) тройникового соединения



## Расчет тройника с учётом пластических деформаций

Параметры модели тройника (с учётом пластических деформаций)	
Расчет тройника (с учётом пластических деформаций)	
Тип элемента	▶
Вид задачи	▶

В случае выбора пункта *Расчёт тройника с учётом пластических деформаций* после задании всех необходимых параметров в происходит автоматическая генерация рациональной расчетной модели *тройника* выбранного типа и последующий расчёт на внутренне давление с учётом пластических деформаций.

Для расчёта с учётом пластических деформаций доступны следующие модели материала:

- билинейное изотропное упрочнение
- мультилинейное изотропное упрочнение

При выборе билинейного изотропного упрочнения материала в окне *Параметры модель тройника* необходимо дополнительно задать следующие параметры материалов (Рис. 59)

- предел текучести
- тангенциальный модуль упругости

Рис. 59 Параметры материала для билинейного изотропного упрочнения

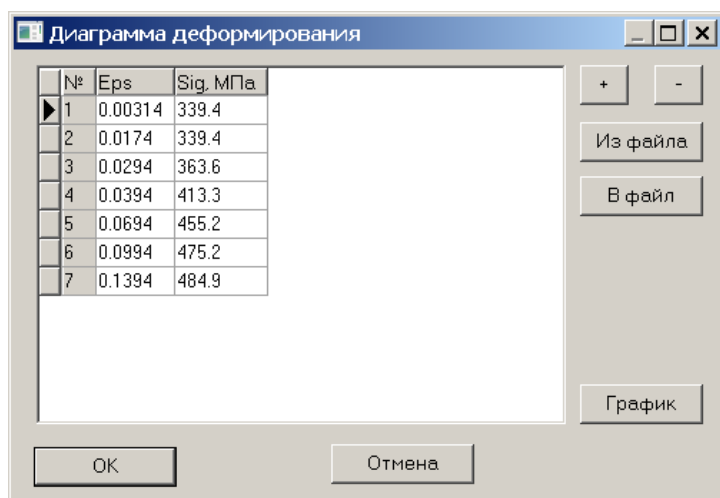
⊟	Материал	
	Цвет	
	Модуль упругости (Юнга)	200000 МПа
	Коэффициент Пуассона	0.3
	Коэффициент линейного температур	1e-005 1/град
	Плотность	0.00785 кг/м^3
	Модель материала	Билинейное изотропное
	Предел текучести	339.4 МПа
	Тангенциальный модуль упругости	400 МПа

Для мультилинейного изотропного упрочнения (Рис. 60) необходимо по точкам задать **истинную** диаграмму деформирования  $\sigma - \varepsilon$  в окне *Диаграмма деформирования* (Рис. 61).

Рис. 60 Параметры материала для мультилинейного изотропного упрочнения

Материал		
Цвет		
Модуль упругости (Юнга)	200000	МПа
Коэффициент Пуассона	0.3	
Коэффициент линейного температурного расширения	1e-005	1/град
Плотность	0.00785	кг/м <sup>3</sup>
Модель материала	Мультилинейное изотропное упрочнение	
Диаграмма деформирования	Задана	

Рис. 61 Окно Диаграмма деформирования



Окно содержит таблицу со следующими параметрами:

- № – номер точки;
- Eps – значение деформаций;
- Sig – значение напряжений;

Добавить и удалить точки можно с помощью кнопок + и –, расположенных в правой части окна *Диаграмма деформирования*. Место вставки новой точки указывается путём перестановки в нужное место курсора в виде треугольника с левого края таблицы окна *Диаграмма деформирования*.

Кнопка *Из файла* позволяет ввести диаграмму деформирования из текстового файла. При помощи кнопки *В файл* можно сохранить диаграмму деформирования в текстовом файле.

Текстовый файл содержит две колонки чисел. Числа в строке могут разделяться пробелами, либо табуляцией.

0.003140...	→	339.40
0.017400...	→	339.40
0.029400...	→	363.60
0.039400...	→	413.30
0.069400...	→	455.2
0.099400	→	475.2
0.13940	→	484.9

Точка с нулевой деформацией не задаётся. Первая точка диаграммы должна быть задана таким образом чтобы отношение напряжений к деформациям заданных в этой точке были равны модулю упругости материала. Напряжение в первой точке диаграммы должно быть равно пределу текучести материала.

Кнопка *График* позволяет отобразить график введённой диаграммы (см. Рис. 62). Для прекращения в табличный режим следует нажать кнопку *Таблица*.

Рис. 62 Окно Диаграмма деформирования (График)



Если при расчёте достигнута деформация превышающая максимальную деформацию в диаграмме, то используется значение напряжения, соответствующее последней точке диаграммы

Возможно задание двух видов нагрузок

- Давление (Рис. 63)
- Произвольная нагрузка (Рис. 64)

В случае использования произвольной нагрузки возможен учёт поперечных сил. Для этого в пункте *Учёт поперечных сил* надо выбрать *Да*.

Рис. 63 Общие параметры тройника для расчёта с учётом пластических деформаций (давление)

Параметры модели тройника		
Общие   Сетка   Расчёт		
Вид тройника	Сварной	
Учёт поперечных сил	Нет	
Материал магистрали		
Материал штуцера		
Геометрия магистрали		
Наружный диаметр	360	мм
Толщина стенки	33	мм
Длина	885	мм
Геометрия штуцера		
Наружный диаметр	330	мм
Толщина стенки	22.8	мм
Длина	840	мм
Пропущенный штуцер	Нет	
Плакирующий слой	Нет	
Сварные швы	Нет	
Температура на внутренней поверхности	285	°C
Нагрузка	Давление	
Рабочее давление	8.73	МПа

OK Отмена



*Рис. 64 Общие параметры тройника для расчёта с учётом пластических деформаций (произвольная нагрузка)*

Параметры модели тройника

Общие | Сетка | Расчёт

Вид тройника	Сварной	
Учёт поперечных сил	Нет	
Материал магистрали		
Материал штуцера		
Геометрия магистрали		
Наружный диаметр	611	мм
Толщина стенки	6	мм
Длина	1700	мм
Геометрия штуцера		
Наружный диаметр	325	мм
Толщина стенки	6	мм
Длина	0	мм
Плакирующий слой	Нет	
Сварные швы	Нет	
Температура на внутренней поверхности	0	°C
Нагрузка	Произвольная	
Редактировать	>>	

OK Отмена

При задании произвольной нагрузки возможно как использование нагрузки, импортированной из АСТРА-НОВА (Рис. 65)., так и её задание вручную (Рис. 66).

Рис. 65 Диалог для задания произвольной нагрузки (нагрузка из АСТРА-НОВА)

**Нагрузка**

Тип нагрузки:  
☐ Единичная (МН, МН\*н, МПа)  
☐ Задаваемая  
☒ Из АСТРА-НОВА (СТАЦ)

Этап 2  
☐ Из АСТРА-НОВА (СЕЙСМ)    Количество точек -1    Номер вектора  
 Воздействие №1 спектр

Внутреннее давление: 8.73 МПа  
 Перепад температур: 0 град

Силы на торцах (кН)

	Fx	Fy	Fz
1	0	0	-4.561
2	0	0	4.502
3	0	-32.739	0

Моменты на торцах (кН\*н)

	Mx	My	Mz
1	-4.028	0.929	22.711
2	1.734	-9.942	22.417
3	2.295	9.013	-45.128

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

Проверка на равновесие

OK    Отмена

Рис. 66 Диалог для задания произвольной нагрузки (нагрузка задается вручную)

**Нагрузка**

Тип нагрузки:  
☐ Единичная (МН, МН\*н, МПа)  
☒ Задаваемая  
☐ Из АСТРА-НОВА (СТАЦ)

Этап 2  
☐ Из АСТРА-НОВА (СЕЙСМ)    Количество точек -1    Номер вектора  
 Воздействие №1 спектр

Внутреннее давление: 8.73 МПа  
 Перепад температур: 0 град

Силы на торцах (кН)

	Fx	Fy	Fz
1	0	0	-4.561
2	0	0	4.502
3	0	-32.739	0

Моменты на торцах (кН\*н)

	Mx	My	Mz
1	-4.028	0.929	22.711
2	1.734	-9.942	22.417
3	2.295	9.013	-45.128

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

Проверка на равновесие

OK    Отмена

Для расчёта тройника с учётом пластических деформаций необходимо задать следующие параметры (Таблица 4) в закладке *Расчёт* (Рис. 67)

Рис. 67 Параметры расчёта тройника с учётом пластических деформаций

Параметры модели тройника

Общие Сетка **Расчёт**

<input type="checkbox"/> <b>Статика</b>	
Тип расчёта	С учётом пластических д
Метод расчёта	Прямой (PARDISO)
Предобуславливатель	Последовательная верхн
Относительная точность	1e-005
Предельное число итераций	1000
<input type="checkbox"/> <b>Нелинейный расчёт</b>	
Метод	Модифицированный Ньютон
Количество шагов по нагрузке	10
Относительная точность для дости	1e-007
Относительная точность для локал	1e-007
Макс. количество итераций до равн	1000
Согласованная упруго-пластическ	Да
Масштаб для нагрузок	1
Запись результатов	Запись последнего шага
Шаг записи	1
<input type="checkbox"/> <b>Вывод в текстовый файл</b>	
Исходные данные	Да
Результаты	Да

OK Отмена

Таблица 4 Параметры расчёта с учётом пластических деформаций

Метод	Модифицированный метод <i>Ньютона-Рафсона</i> или <i>метод Ньютона-Рафсона</i>
Количество шагов по нагрузке	Количество шагов, на которое разбивается пластическая часть нагрузки
Относительная точность до достижения равновесия	Относительная точность для невязки нагрузки для глобального итерационного процесса Ньютона-Рафсона до достижения равновесия. В случае, если относительная невязка по нагрузке становится меньше заданного числа, итерационный
Относительная точность для локальной процедуры Ньютона	Относительная точность для локальной процедуры Ньютона- решения системы нелинейных уравнений в методе радиального возврата
Максимальное количество итераций до достижения равновесия	Максимальное количество итераций для глобального итерационного процесса Ньютона-Рафсона до достижения равновесия. В случае превышения количества итераций заданного значения итерационный процесс останавливается с диагностическим сообщением “Заданная точность не достигнута”
Согласованная матрица	Использовать или нет согласованную матрицу для построения матрицы касательной жёсткости
Масштаб для нагрузок	Масштабный коэффициент для нагрузок
Метод расчёта	Метод решения SLAY. Рекомендуется прямой решатель PARDISO.
Запись результатов	Возможны следующие варианты: -Запись последнего шага -Запись каждого шага -Запись каждого N-го шага (шаг записи задаётся в поле ниже)
Вывод в текстовый файл	Признаки вывода в текстовый файл исходных данных и результатов расчёта

## Расчет тройника с учётом автофретирования

В случае выбора пункта *Автофретирование* после задания всех необходимых параметров происходит автоматическая генерация рациональной расчетной модели *тройника* выбранного типа и последующий расчёт на внутренне давление с учётом упругопластического поведения материала.

В меню *Расчёт* необходимо указать вид задачи – *Автофретирование* (Рис. 42)

В открывшемся окне *Параметры модели тройника*, вкладка *Общие* выбрать модель материала для штуцера и магистрали в *Модель материала*:

Параметры модели тройника		
Общие   Сетка   Расчёт		
Вид тройника	Сварной	
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Материал магистрали</b>		
Цвет		
Модуль упругости (Юнга)	200000	МПа
Коэффициент Пуассона	0.3	
Коэффициент линейного температурного расширения	1e-005	1/град
Плотность	0.00785	кг/м³
Модель материала	Линейная	
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Материал штуцера</b>		
Цвет		
Модуль упругости (Юнга)	200000	МПа
Коэффициент Пуассона	0.3	
Коэффициент линейного температурного расширения	1e-005	1/град
Плотность	0.00785	кг/м³
Модель материала	Линейная	
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Геометрия магистрали</b>		
Наружный диаметр	0.325	м
Толщина стенки	0.11	м
Длина	0.7595	м
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Геометрия штуцера</b>		
Наружный диаметр	0.219	м
Толщина стенки	0.09	м
Длина	0.6005	м
Плакирующий слой	Нет	
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Сварные швы</b>		
Температура на внутренней поверхности	100	°C
Давление автофретирования	0	МПа
Рабочее давление	0	МПа

OK Отмена

Задаются параметры материалов и расчёта аналогично параметрам для [Расчёта тройника с учётом пластических деформаций](#)

Кроме параметров материала в окне *Параметры модели тройника* необходимо также задать давление автофретирования и рабочее давление

## Расчет тройника (предельная нагрузка)

В случае выбора пункта *Расчёт тройника (предельная нагрузка)* после задания всех необходимых параметров происходит автоматическая генерация рациональной расчетной модели *тройника* выбранного типа и последующий расчёт на определение предельного внутреннего давления для упругопластического поведения материала.

В меню *Расчёт* необходимо указать вид задачи – *Определение предельной нагрузки* (Рис. 42)

Задаются параметры материалов и расчёта аналогично параметрам для Расчёта тройника с учётом пластических деформаций, а также максимальное внутреннее давление (вместо рабочего давления). Задаётся достаточно большое количество шагов по нагрузке для построения графиков (порядка 50 шагов) (Рис. 67, Таблица 4)

## Параметры модели (расчет) отвода

В случае выбора пункта *Параметры модели отвода* при нажатии кнопки ОК происходит автоматическая генерация рациональной расчетной модели отвода – *гнутого* или *секторного*. При выборе пункта *Расчет отвода* происходит запуск статического расчета для сгенерированной конечноэлементной модели.

Рис. 68 Общие параметры отвода

**Расчет отвода (Гнутый)**

Геометрия отвода		Вид отвода
Радиус	0.55	м
Угол раскрытия	90	град
Наружный диаметр	0.325	м
Толщина стенки (минимальная)	0.016	м
Толщина стенки (максимальная)	0.016	м
Эллиптичность среднего сечения	8	%
Длина прямой части	0	м

**Материал отвода**

Плакирующий слой	Нет
Температура на внутреннем радиусе	100 °C
Задача теплопроводности	Нет

OK Отмена Справка

**Расчет отвода (Секторный)**

Геометрия отвода		Вид отвода
Радиус	0.55	м
Угол раскрытия	90	град
Наружный диаметр	0.325	м
Толщина стенки	0.016	м
Количество секций	5	
Длина концевой секции	0	м
Длина промежуточной секции	0	м
Длина прямой части	0	м

**Материал отвода**

Плакирующий слой	Нет
Температура на внутреннем радиусе	100 °C
Задача теплопроводности	Нет

OK Отмена Справка

Закладки *Сетка* и *Расчет* содержат задаваемые параметры, аналогичные ранее описанным для тройников.

Рис. 69 Параметры сетки модели отвода

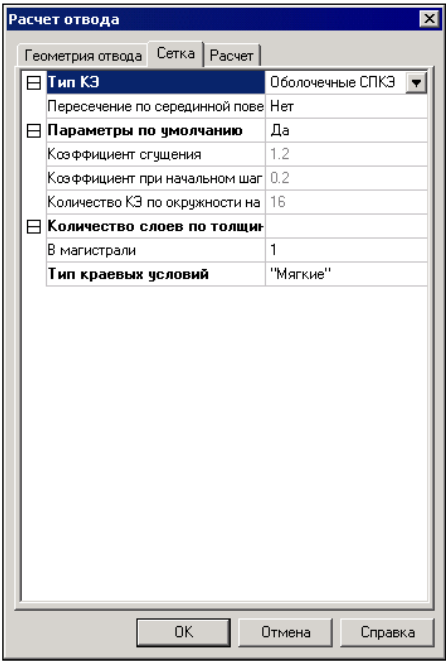
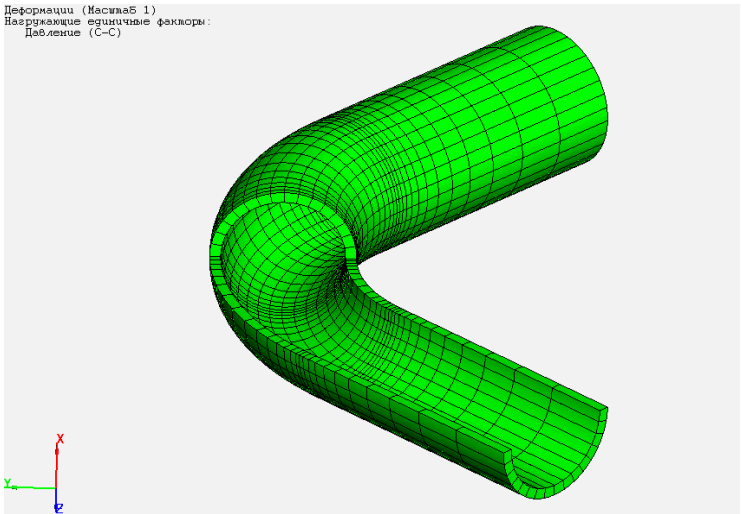
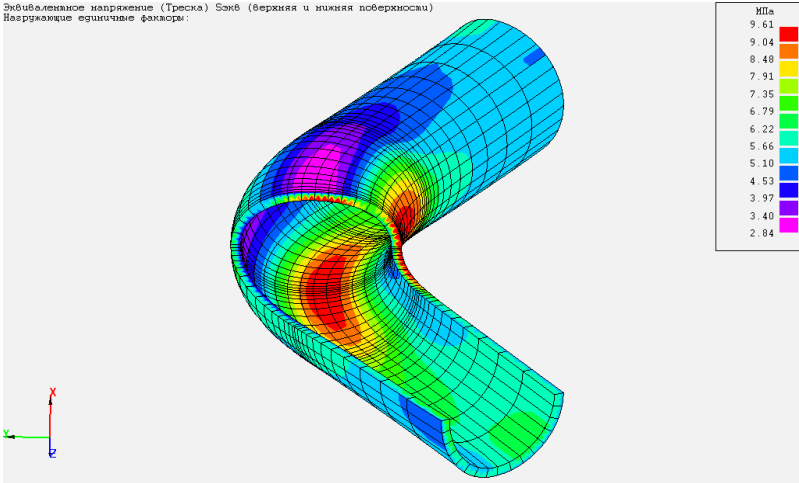


Рис. 70 Конечноэлементная модель гнутого отвода





*Рис. 71 Напряженно-деформированное состояние гнутого отвода*



*Рис. 72 Конечноеэлементная модель секторного отвода*

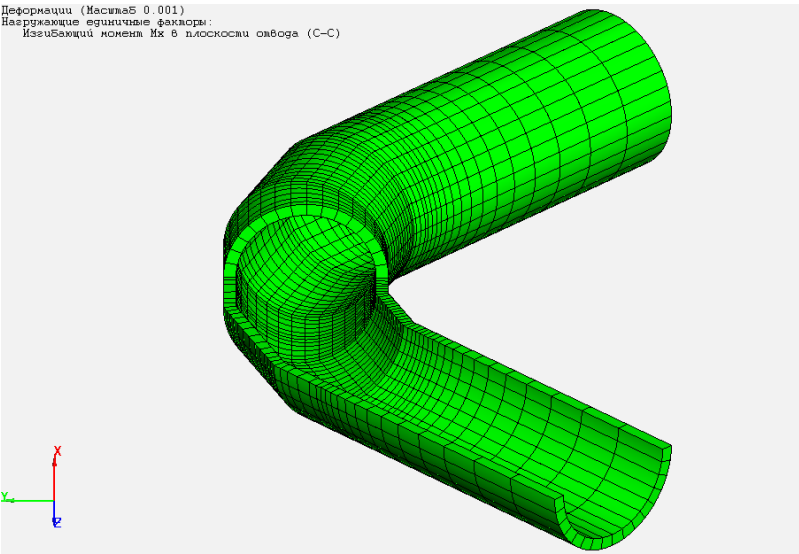
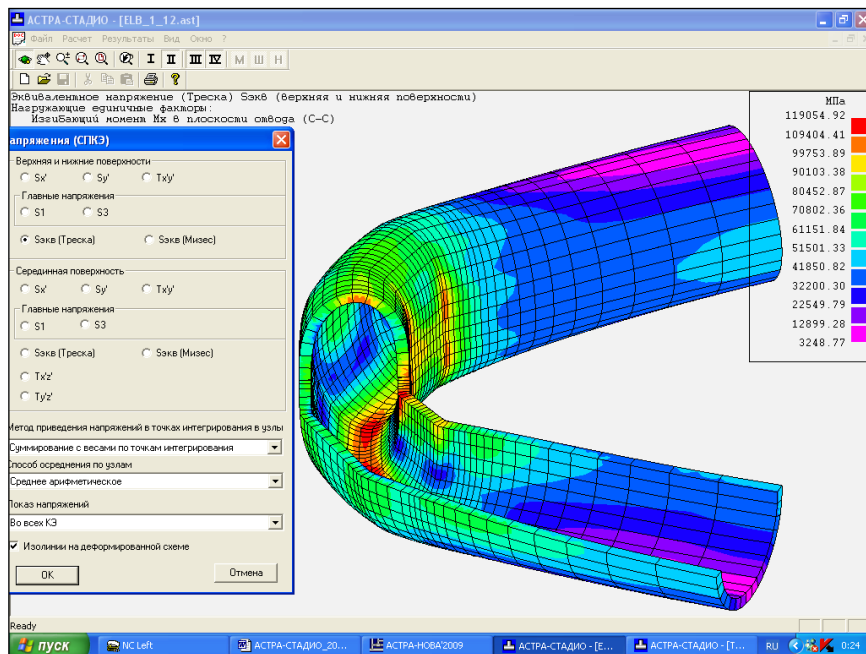


Рис. 73 Напряженно-деформированное состояние секторного отвода

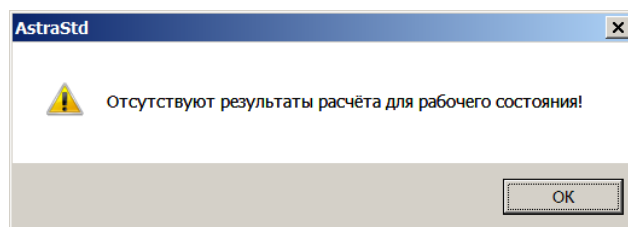


В случае выбора пункта *Параметры КЭ-модели компенсатора* при нажатии кнопки ОК происходит автоматическая генерация расчетной модели линзового/сильфонного компенсатора, в случае выбора пункта *Расчет компенсатора* дополнительно к этому происходит запуск расчета сгенерированной расчетной модели.

## Расчёт отвода с учётом пластических деформаций

Параметры модели отвода (с учётом пластических деформаций)	
Расчет отвода (с учётом пластических деформаций)	
Тип элемента	►
Вид задачи	►

В случае выбора пункта *Расчёт отвода с учётом пластических деформаций* после ввода всех необходимых параметров происходит автоматическая генерация рациональной расчетной модели гнутого отвода и последующий расчёт с учётом пластических деформаций. При этом должны быть доступны результаты **этапа 2** из **АСТРА-НОВА**. В случае их отсутствия появляется предупреждение.



Для расчёта отвода с учётом пластических деформаций должна быть выбрана модель материала отвода и плакирующего слоя при его наличии. В настоящем релизе доступна билинейная и мультилинейные модели материала с изотропным упрочнением.

*Рис. 74 Общие параметры отвода для расчёта с учётом пластических деформаций*

Расчет отвода с учётом пластичности		
Общие   Сетка   Расчёт		
<b>Вид отвода</b>	Гнутый	
<b>Полная модель</b>	Да	
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Геометрия отвода</b>		
Радиус	550	мм
Угол раскрытия	90	град
Наружный диаметр	325	мм
Толщина стенки (минимальная)	16.1	мм
Толщина стенки (максимальная)	16.1	мм
Эллиптичность среднего сечения	8	%
Длина прямой части	0	мм
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Материал отвода</b>		
Плакирующий слой	Нет	
Температура на внутренней поверхности	100	°C

OK Отмена

Для расчёта с учётом пластических деформаций необходимо задать следующие параметры (Таблица 4) в закладке *Расчёт* (Рис. 75)

Рис. 75 Параметры расчёта отвода с учётом пластических деформаций

Параметры модели отвода

Общие | Сетка | Расчет

<input type="checkbox"/> <b>Статика</b>	
Тип расчёта	
Метод расчёта	Прямой (PARDISO)
Предобуславливатель	Последовательная верх-
Относительная точность	1e-005
Предельное число итераций	1000
<input type="checkbox"/> <b>Нелинейный расчёт</b>	
Метод	Модифицированный Ньют
Количество шагов по нагрузке	10
Относительная точность для дости	1e-007
Относительная точность для локал	1e-007
Макс. количество итераций до равн	1000
Согласованная упруго-пластическ	Да
Масштаб для нагрузок	1
Запись результатов	Запись последнего шага
Шаг записи	1
<input type="checkbox"/> <b>Вывод в текстовый файл</b>	
Исходные данные	Нет
Результаты	Нет

OK Отмена

### Расчёт отвода (предельная нагрузка)

В случае выбора пункта *Расчёт отвода (предельная нагрузка)* после задания всех необходимых параметров происходит автоматическая генерация рациональной расчетной модели *отвода* выбранного типа и последующий расчёт на определение предельного внутреннего давления для упругопластического поведения материала.

В меню *Расчёт* необходимо указать вид задачи – *Определение предельной нагрузки* (Рис. 42)

Задаются параметры материалов и расчёта аналогично параметрам для Расчёта отвода с учётом пластических деформаций, а также максимальное внутреннее давление (вместо рабочего давления). Задаётся достаточно большое количество шагов по нагрузке для построения графиков (порядка 50 шагов) (Рис. 67, Таблица 4)

## Параметры модели (расчет) компенсатора

В случае выбора пункта *Параметры модели компенсатора* при нажатии кнопки ОК происходит автоматическая генерация расчетной модели конического перехода, в случае выбора пункта *Расчет компенсатора* дополнительно к этому происходит запуск расчета сгенерированной расчетной модели.

**Параметры модели компенсатора** [X]

Общие | Сетка | Расчет

<input type="checkbox"/> <b>Материал линз</b>		
Цвет		
Модуль упругости (Юнга)	200000	МПа
Коэффициент Пуассона	0.3	
Коэффициент линейного температурного расширения	1e-005	1/град
Плотность	0.00785	кг/м³
<input type="checkbox"/> <b>Геометрия линз</b>		
Наружный диаметр внешний	420	мм
Наружный диаметр внутренний	273	мм
Толщина стенки	7	мм
Радиус сопряжения	30	мм
Количество линз	3	
<input type="checkbox"/> <b>Материал примыкающих труб</b>		
Цвет		
Модуль упругости (Юнга)	200000	МПа
Коэффициент Пуассона	0.3	
Коэффициент линейного температурного расширения	1e-005	1/град
Плотность	0.00785	кг/м³
<input type="checkbox"/> <b>Геометрия примыкающих труб</b>		
Наружный диаметр	273	мм
Толщина стенки	8	мм

OK Отмена

Закладки *Сетка* и *Расчет* содержит задаваемые параметры, аналогичные ранее описанным для тройников.

**Параметры модели компенсатора** [X]

Общие | Сетка | Расчёт

<b>Тип КЭ</b>	Оболочечные СПКЭ
<input type="checkbox"/> <b>Параметры по умолчанию</b>	Да
Количество КЭ на четверти окруж	8
Коэффициент сгущения	1.1
Коэффициент при начальном шаге	0.1
Количество КЭ на гнутой части год	8
<b>Тип краевых условий</b>	"Мягкие"

OK Отмена



Рис. 76 Конечноэлементная модель линзового/сильфонного компенсатора

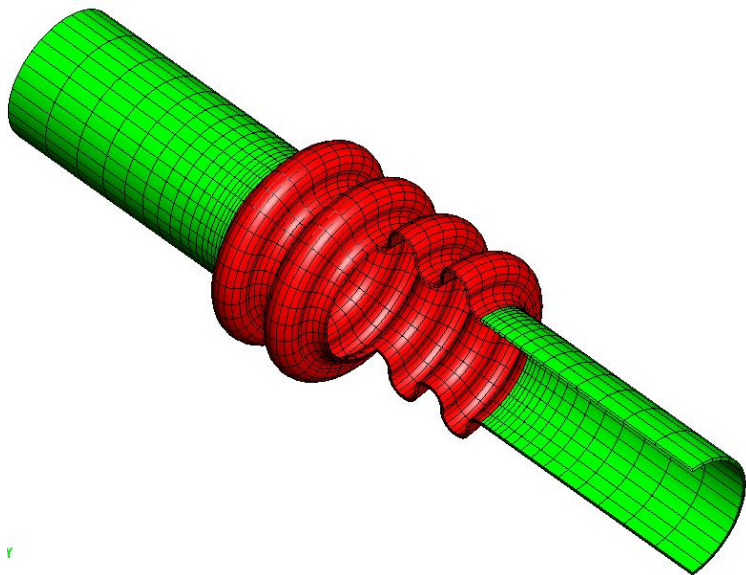
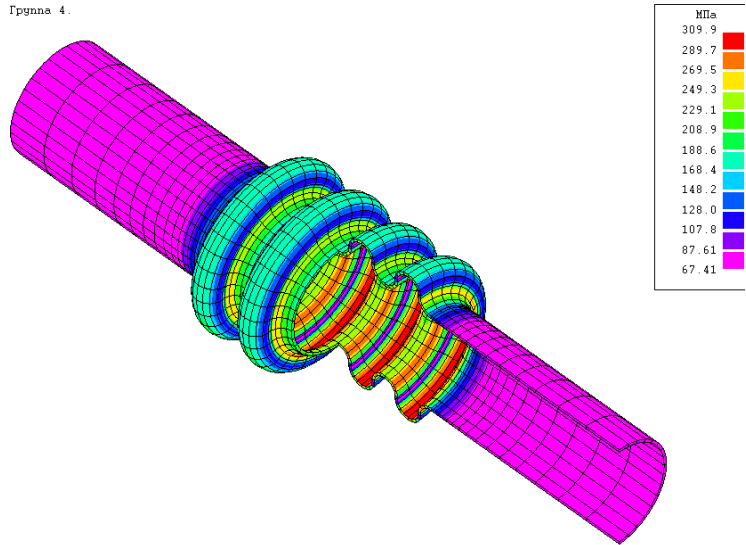


Рис. 77 Напряженное состояние линзового/сильфонного компенсатора

я. Группа 4.



## Параметры модели (расчет) перехода

В случае выбора пункта *Параметры модели перехода* при нажатии кнопки ОК происходит автоматическая генерация расчетной модели конического перехода, в случае выбора пункта *Расчет перехода* дополнительно к этому происходит запуск расчета сгенерированной расчетной модели.

The dialog box titled "Параметры модели перехода" (Parameters of the transition model) has three tabs: "Общие" (General), "Сетка" (Grid), and "Расчёт" (Calculation). The "Расчёт" tab is selected, displaying a table of parameters for the transition model.

Материал		
Цвет		
Модуль упругости (Юнга)	200000	МПа
Коэффициент Пуассона	0.3	
Коэффициент линейного температурного расширения	1e-005	1/град
Плотность	0.00785	кг/м^3
Наружный диаметр основной	325	мм
Толщина стенки основная	7	мм
Наружный диаметр переходной	108	мм
Толщина стенки переходная	7	мм
Длина переходной части	500	мм

At the bottom of the dialog box are two buttons: "ОК" (OK) and "Отмена" (Cancel).

Закладки *Сетка* и *Расчет* содержит задаваемые параметры, аналогичные ранее описанным для тройников.

**Параметры модели перехода** [X]

Общие | Сетка | Расчет

<input type="checkbox"/> <b>Тип КЭ</b>	Оболочечные СПКЭ
<input type="checkbox"/> <b>Параметры по умолчанию</b>	Да
Пересечение по срединной повер	Да
Коэффициент сгущения	1.1
Коэффициент при начальном шаге	0.1
Количество КЭ по окружности на ч	8
<b>Тип краевых условий</b>	"Мягкие"

OK Отмена

Рис. 78 Конечноэлементная модель перехода конического концентрического

Деформации (Масштаб 159.28)  
Напряжения единичные факторы  
Давление

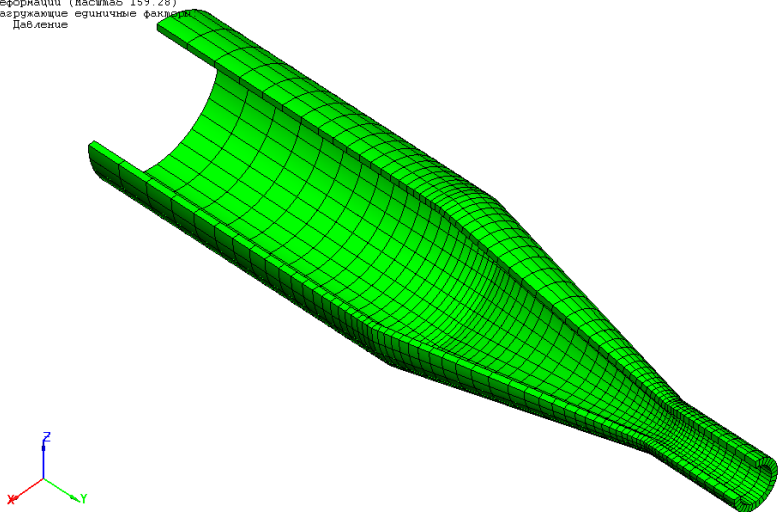
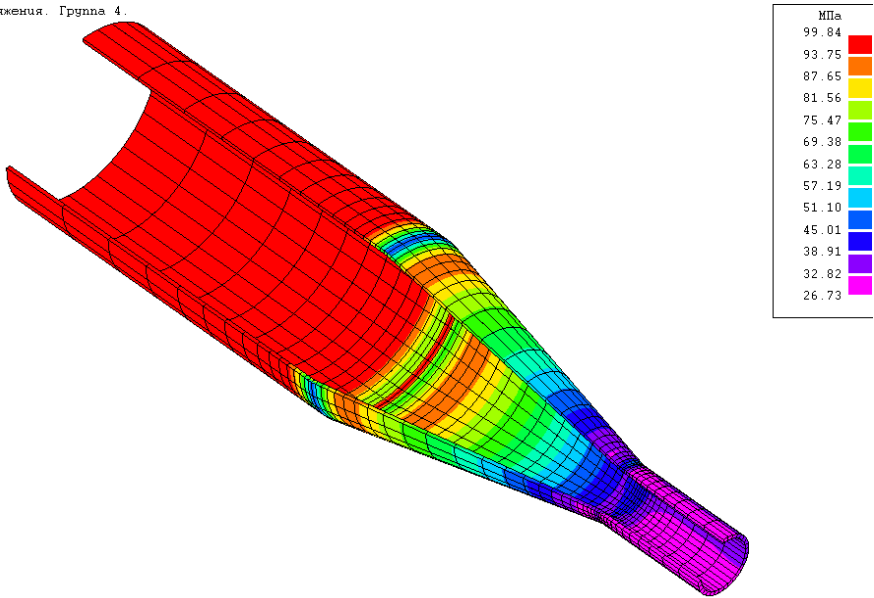


Рис. 79 Напряженное состояние перехода конического концентрического

ляжения. Группа 4.



## Параметры модели (расчет) косого стыка

В случае выбора пункта *Параметры модели косого стыка* при нажатии кнопки ОК происходит автоматическая генерация расчетной модели косого стыка. При выборе пункта *Расчет косого стыка* происходит запуск статического расчета для сгенерированной конечноэлементной модели.

**Параметры КЗ-модели косого стыка** [X]

Геометрия | Сетка | Расчет

☒ **Геометрия сварного шва**

Угол между трубами	170	град
Наружный диаметр	0.273	м
Толщина стенки	0.007	м
Длина прямой части	0	м
Ширина внутреннего сварного шва	0.006	м
Высота внутреннего сварного шва	0.001	м
Ширина наружного сварного шва	0.02	м
Высота наружного сварного шва	0.003	м

☒ **Материал труб**

Плакирующий слой	Нет
Сварные швы	Нет
Температура на внутренне	100 °C
Задача теплопроводности	Нет

OK Отмена Справка

Закладки *Сетка* и *Расчет* содержит задаваемые параметры, аналогичные отводам и ранее описанным для тройников.

**Параметры КЭ-модели косого стыка** [X]

Геометрия | Сетка | Расчет

<input type="checkbox"/> <b>Тип КЭ</b>	Оболочечные СПКЭ ▾
Пересечение по срединной пове	Нет
<input type="checkbox"/> <b>Параметры по умолчанию</b>	Да
Коэффициент сгущения	1.1
Коэффициент при начальном шаг	0.2
Количество КЭ по окружности на	16
<b>Тип краевых условий</b>	"Мягкие"

OK Отмена Справка

Рис. 80 Конечноэлементная модель косого стыка

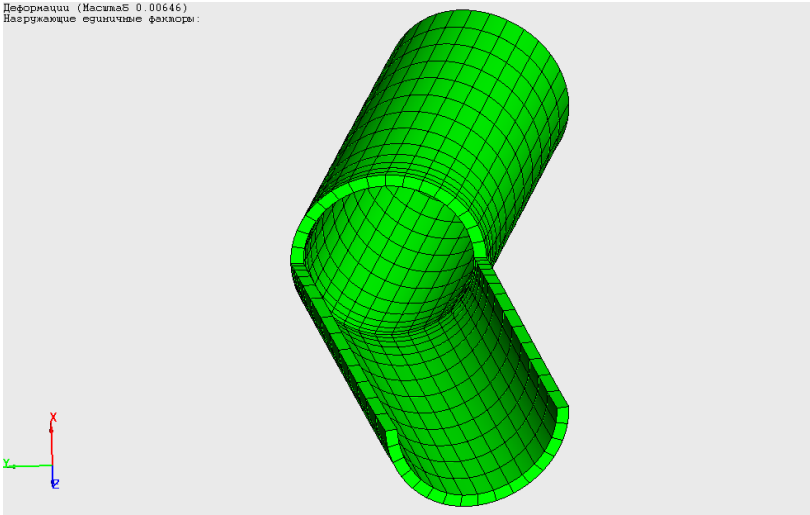
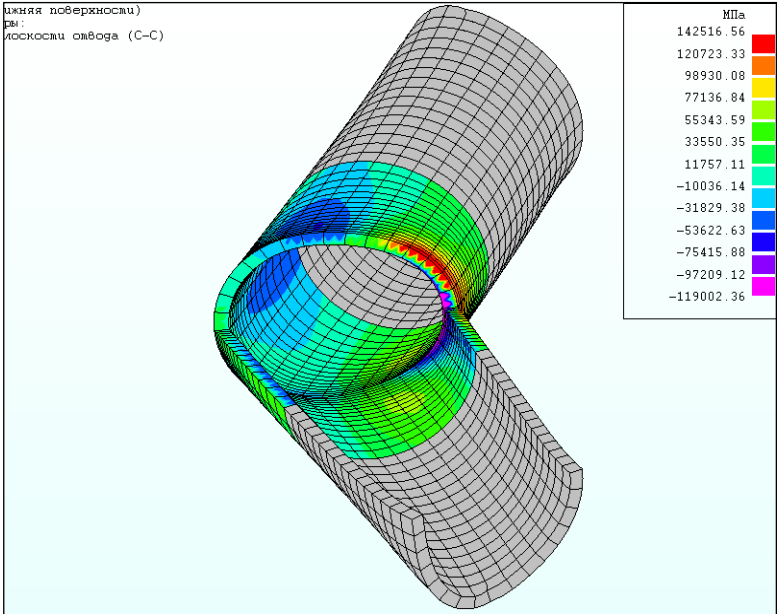


Рис. 81 Напряженное состояние косого стыка (на деформированной модели без торцевых зон)



## Параметры модели (расчет) сварного соединения труб

В случае выбора пункта *Параметры модели сварного соединения труб* при нажатии кнопки ОК происходит автоматическая генерация расчетной модели косого стыка. При выборе пункта *Расчет сварного соединения труб* происходит запуск статического расчета для сгенерированной конечноэлементной модели.

Рис. 82 Диалог для ввода общих параметров расчётной модели сварного соединения труб

Параметры модели сварного соединения труб		
Общие   Сетка   Расчёт		
<input type="checkbox"/> <b>Геометрия прямых труб</b>		
Угол между трубами	180	град
Наружный диаметр (1)	325	мм
Толщина стенки (1)	16	мм
Наружный диаметр (2)	325	мм
Толщина стенки (2)	16	мм
Длина прямой части	0	мм
<input type="checkbox"/> <b>Материал трубы (1)</b>		
<input type="checkbox"/> <b>Материал трубы (2)</b>		
<input type="checkbox"/> <b>Материал сварного шва</b>		
<input type="checkbox"/> <b>Расточка трубы (1)</b> Да		
Толщина стенки в зоне цил. расточ	12	мм
Ширина зоны цил. расточки (1)	20	мм
Ширина зоны кон. расточки (1)	20	мм
<input type="checkbox"/> <b>Расточка трубы (2)</b> Да		
Толщина стенки в зоне цил. расточ	12	мм
Ширина зоны цил. расточки (2)	20	мм
Ширина зоны кон. расточки (2)	20	мм
<input type="checkbox"/> <b>Сварной шов</b>		
Ширина внутреннего корня шва	8	мм
Высота внутреннего корня шва	1.5	мм
Ширина наружного корня шва	18	мм
Высота наружного корня шва	2	мм
<b>Температура на внутренней поверхности</b>	100	°C
<b>Задача теплопроводности</b>	Да	
<input type="checkbox"/> <b>Параметры конвекции</b>		
Коэффициент конвекции	750	Вт/м <sup>2</sup> /°C
Температура среды	200	°C

OK Отмена

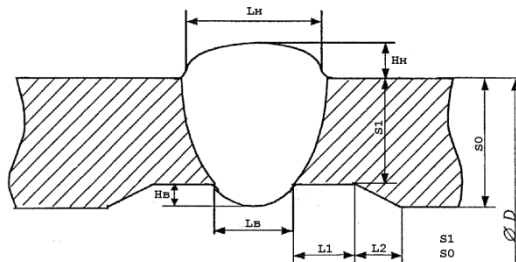


В данном диалоге вводятся основные характеристики сварного соединения труб. Допускаются небольшие различия в геометрических характеристиках стыкуемых труб.

Таблица 5 Параметры сварного соединения труб

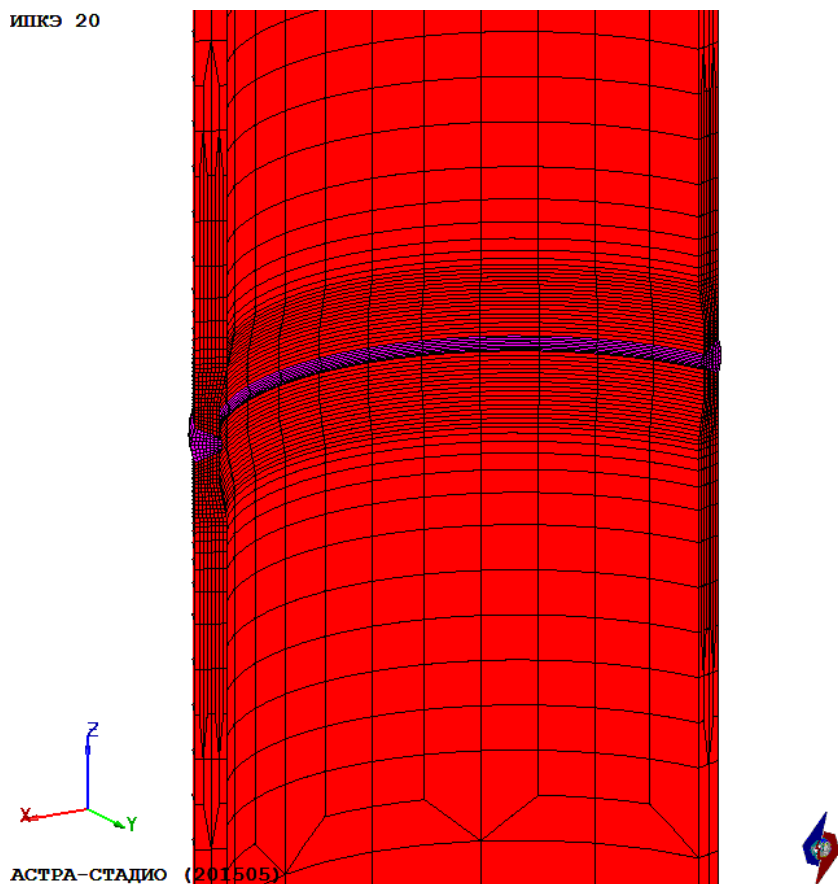
Геометрия свариваемых труб	
Угол между трубами	Значение в градусах, если задано 180, значит трубы сосны
Наружный диаметр (1,2)	Размер D на Рис. 83 для каждой из двух свариваемых труб
Толщина стенки (1,2)	Размер S0 на Рис. 83 для каждой из двух свариваемых труб
Расточка трубы (1,2)	
Толщина стенки в зоне цилиндрической расточки	Размер S1 на Рис. 83 для каждой из двух свариваемых труб
Ширина зоны цилиндрической расточки	Размер L1 на Рис. 83 для каждой из двух свариваемых труб
Ширина зоны конической расточки	Размер L2 на Рис. 83 для каждой из двух свариваемых труб
Сварной шов	
Ширина внутреннего корня шва	Размер Lв на Рис. 83 - ширина корня шва внутри свариваемых труб
Высота внутреннего корня шва	Размер Hв на Рис. 83 - высота корня шва внутри свариваемых труб
Ширина наружного корня шва	Размер Lн на Рис. 83 - ширина корня шва снаружи свариваемых труб
Высота наружного корня шва	Размер Hн на Рис. 83 - высота корня шва снаружи свариваемых труб

Рис. 83 Сварное соединение труб с зонами расточки



*Рис. 84 Расчётная модель сварного соединения труб с зонами расточки (фрагмент)*

ИПКЭ 20



### Параметры модели (расчет) прямой трубы (давление)

В случае выбора пункта *Параметры модели прямой трубы* при нажатии кнопки ОК происходит автоматическая генерация расчетной модели трубы. При выборе пункта *Расчет прямой трубы* запуск статического расчета для сгенерированной конечноэлементной модели. В качестве нагрузки используется давление, поэтому расчётная модель представляет собой четверть трубы.

Рис. 85 Диалог для ввода общих параметров расчётной трубы

Параметры модели трубы

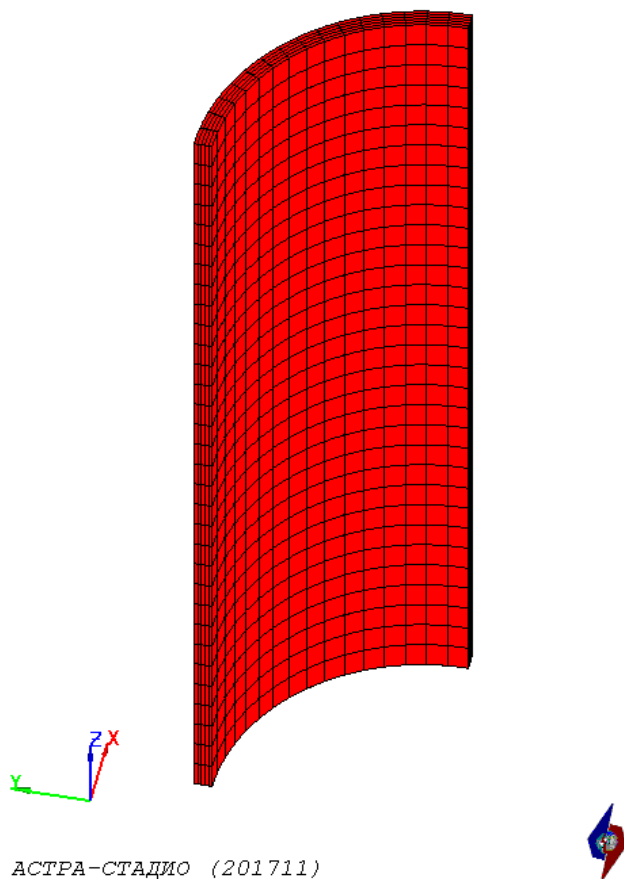
Общие | Сетка | Расчёт

<input type="checkbox"/> <b>Геометрия прямой трубы</b>		
Наружный диаметр	325	мм
Толщина стенки	13	мм
<input type="checkbox"/> <b>Материал трубы</b>		
Плакирующий слой	Нет	
Температура на внутренней поверхности	100	°C
Задача теплопроводности	Нет	
Рабочее давление	0	МПа

OK Отмена

*Рис. 86 Расчётная модель прямой трубы*

ИПКЭ 20



## Меню Результаты

Варианты нагрузок...
Значения нагрузок...
Шаг по нагрузке...
Информация о модели...
<b>Деформированная схема</b>
Исходная схема
<b>Масштаб перемещений...</b>
Автомасштабирование
<b>Изополя перемещений...</b>
Запись AVI-файла...
Сохранить кадры...
<b>Изополя деформаций...</b>
<b>Изополя напряжений...</b>
Max / Min в точках интегрирования
Температурное поле
Оценка прочности (ПНАЭ Г-7-002-86)...
Препроцессор
Показ форм колебаний
Анимация форм колебаний
Экспорт результатов...
<b>Графики (от параметра нагрузки)</b> ▶
<b>Отчёт</b>

## Варианты нагрузок

Для любых типов графически отображаемых результатов, за исключением оценки прочности, Вы можете посмотреть вклад каждого типа нагрузки в суммарные результаты. Для этого предназначен диалог *Варианты нагрузок*. Вид диалога (и набор значимых нагрузок) зависит от типа детали.

Выбор нагрузок для тройника, для отвода и косого стыка, перехода и компенсатора (Рис. 87–Рис. 89).

Отметьте флажками те нагрузки, вклад от которых должен присутствовать в отображаемых результатах.

Рис. 87 Диалог выбора вариантов нагрузок для тройника

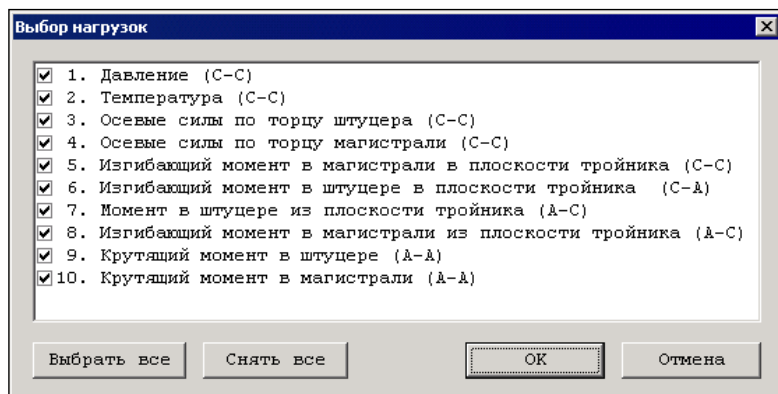


Рис. 88 Диалог выбора вариантов нагрузок для отвода и косого стыка

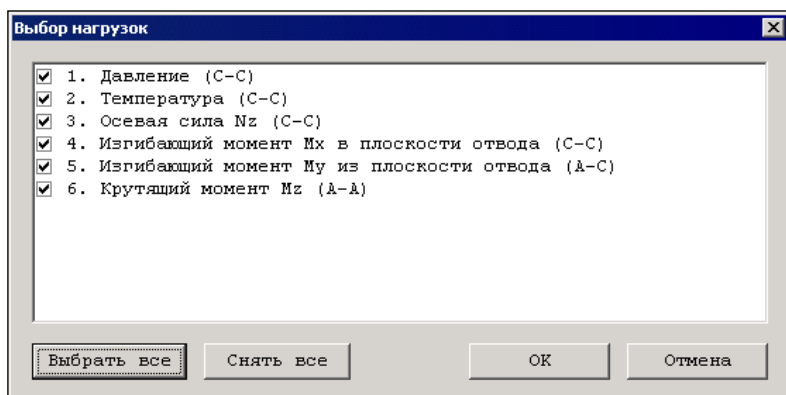
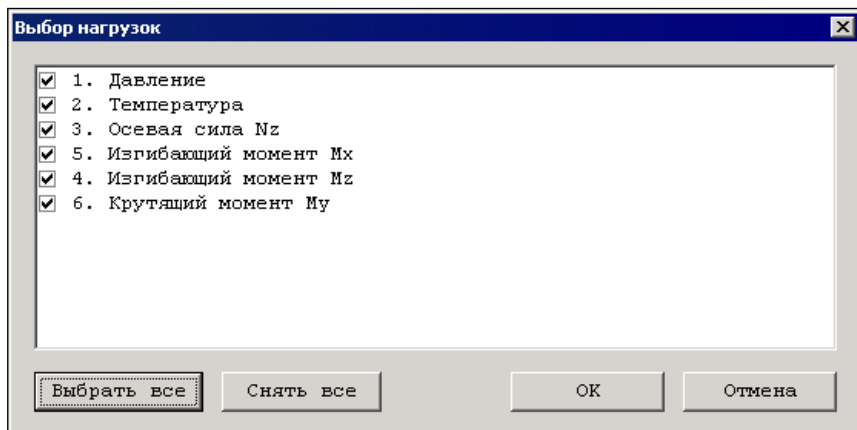


Рис. 89 Диалог выбора вариантов нагрузок перехода и компенсатора



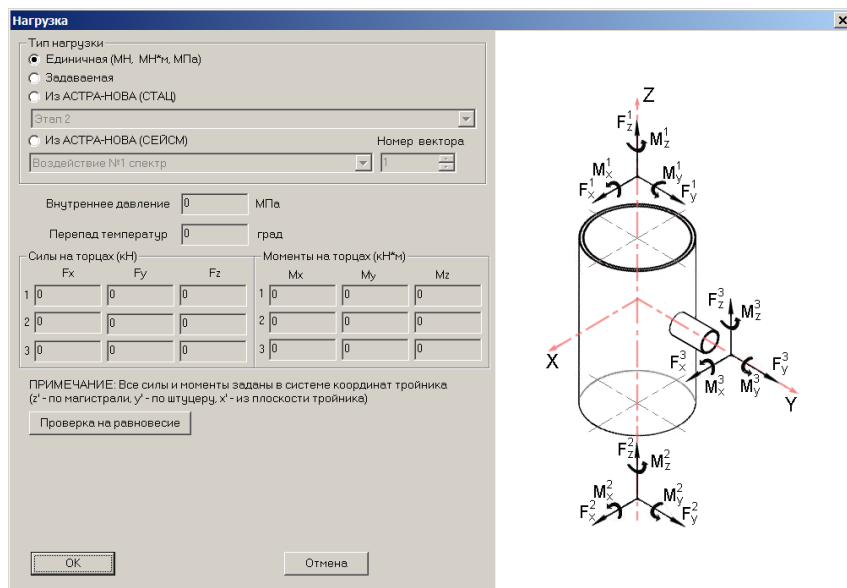
Группы решаемых задач (самоуравновешенные группы нагрузок), на которые разбивается исходная полная задача (ниже – для ортогонального тройника):

- С-С (симметрия-симметрия) – давление (с уравнивающими торцевыми осевыми силами), температура, осевая сила в штуцере, осевая сила в корпусе, изгибающий момент в корпусе в плоскости тройника;
- С-А (симметрия-антисимметрия) – изгибающий момент в штуцере в плоскости тройника;
- А-С (антисимметрия-симметрия) – изгибающий момент в штуцере из плоскости тройника, изгибающий момент в корпусе из плоскости тройника;
- А-А (антисимметрия-антисимметрия) – крутящие моменты в штуцере и в корпусе.

## Значения нагрузок (тройник)

Диалог предназначен для задания нагрузок на тройник (Рис. 90).

Рис. 90 Задание значений нагрузок для тройника



В данном диалоге можно выбрать или ввести вручную нагрузку, для которой необходимо получить результаты (компоненты перемещений и напряжений, их эквивалентные величины). Возможно использование следующих типов нагрузок:

- Единичная нагрузка;
- Задаваемая. В этом случае все силы и моменты задаются пользователем с учетом правил равновесия;
- Нагрузка, полученная из АСТРА-СТАЦ (любой из этапов расчета);
- Нагрузка, полученная из АСТРА-СЕЙСМ (задаваемая собственная форма колебаний или шаг интегрирования по времени).

$F_x^1$  – поперечная сила по X, приложенная к первому торцу магистрали;

$F_x^2$  – поперечная сила по X, приложенная ко второму торцу магистрали;

$F_x^3$  – поперечная сила по X, приложенная к штуцеру;



$F_y^1$  – поперечная сила по Y, приложенная к первому торцу магистрали;

$F_y^2$  – поперечная сила по Y, приложенная ко второму торцу магистрали;

$F_y^3$  – осевая сила, приложенная к штуцере;

$F_z^1$  – осевая сила, приложенная к первому торцу магистрали;

$F_z^2$  – осевая сила, приложенная ко второму торцу магистрали;

$F_z^3$  – поперечная сила по Z, приложенная к штуцере;

$M_x^1$  – изгибающий момент в плоскости тройника в первом торце магистрали;

$M_x^2$  – изгибающий момент в плоскости тройника во втором торце магистрали;

$M_x^3$  – изгибающий момент в плоскости тройника в штуцере;

$M_y^1$  – изгибающий момент из плоскости тройника в первом торце магистрали;

$M_y^2$  – изгибающий момент из плоскости тройника во втором торце магистрали;

$M_y^3$  – крутящий момент в штуцере;

$M_z^1$  – крутящий момент в первом торце магистрали;

$M_z^2$  – крутящий момент во втором торце магистрали;

$M_z^3$  – изгибающий момент из плоскости тройника в штуцере.

Все силы и моменты приведены в системе координат тройника, поэтому условия равновесия тройника будут следующие:

$$\begin{cases} F_x^1 + F_x^2 + F_x^3 = 0 \\ F_y^1 + F_y^2 + F_y^3 = 0 \\ F_z^1 + F_z^2 + F_z^3 = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} M_x^1 + M_x^2 + M_x^3 = 0 \\ M_y^1 + M_y^2 + M_y^3 = 0 \\ M_z^1 + M_z^2 + M_z^3 = 0 \end{cases}$$

## Значения нагрузок (отвод, косой стык)

Диалог предназначен для задания нагрузок на отвод или косой стык (Рис. 91).

Рис. 91 Выбор значений нагрузок для отвода и косого стыка

**Нагрузка**

Тип нагрузки

☐ Единичная (МН, МН\*м, МПа)

☐ Задаваемая

☒ Из АСТРА-НОВА (СТАЦ)

Этап 1 - Вес и давление в рабочем состоянии

☐ Из АСТРА-НОВА (СЕЙСМ)

Номер вектора

Воздействие №1 (угол №1) спектр

1

Внутреннее давление 8.73 МПа

Перепад температур 0 град

Силовые факторы

1 - 1

Nz' 2.3629 кН

Mx' 1.1615 кН\*м

My' 63.6577 кН\*м

Mz' 9.2592 кН\*м

ОК

Отмена

## Значения нагрузок (переход, компенсатор)

Диалог предназначен для задания нагрузок на переход или компенсатор (Рис. 92).

Рис. 92 Выбор значений нагрузок для перехода и компенсатора

**Нагрузка**

Тип нагрузки

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

Этап 1 - Вес и давление в рабочем состоянии

☐ Из АСТРА-НОВА (СЕЙСМ)

Номер вектора: 1

Внутреннее давление: 8.73 МПа

Перепад температур: 0 град

Силовые факторы

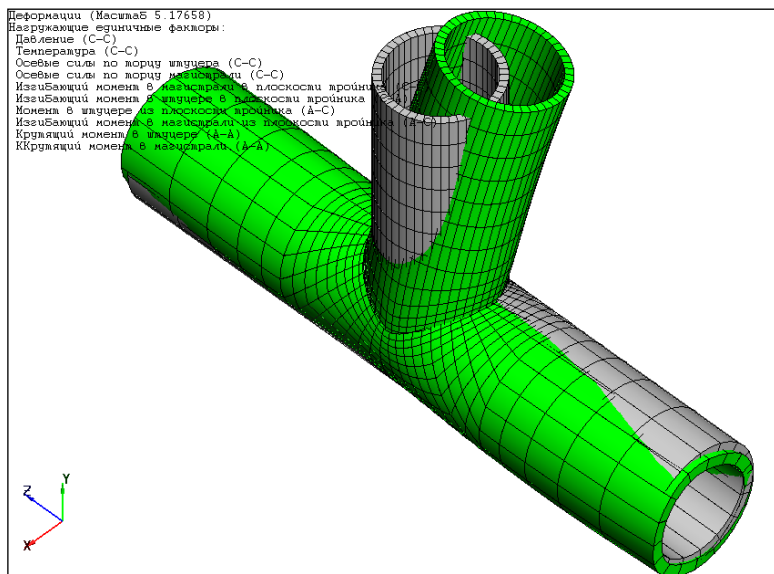
	1 - 1	2 - 2	
Nz'	0.0635	0.0635	кН
Mx'	-9.4938	4.5136	кН*м
My'	-0.1411	-0.0359	кН*м
Mz'	0.1116	0.1116	кН*м

OK Отмена

## Деформированная схема

Показ деформированной модели (Рис. 93).

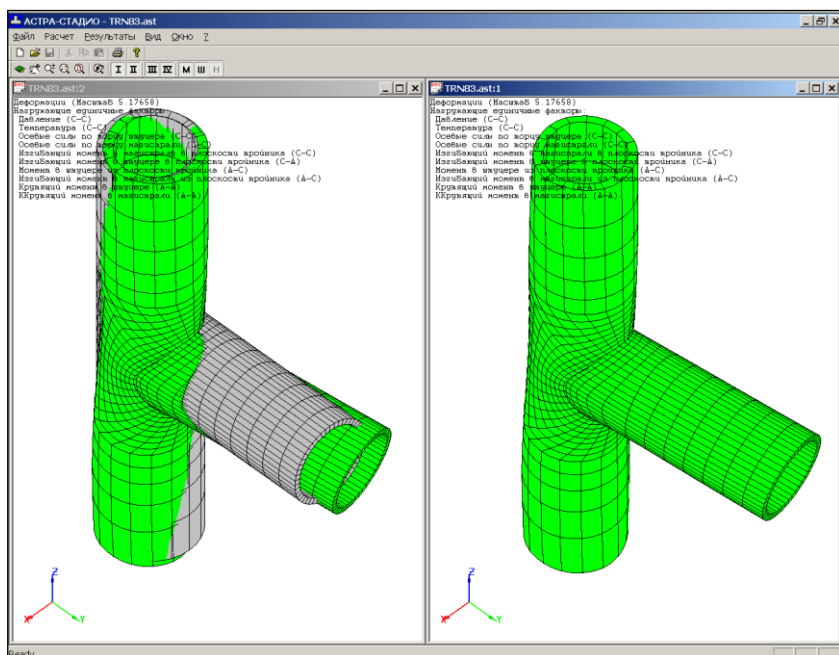
*Рис. 93 Показ деформированной модели совместно с исходной*



## Исходная схема

Поставьте флажок напротив этого пункта, чтобы был показан исходный элемент вместе с деформированным (Рис. 94).

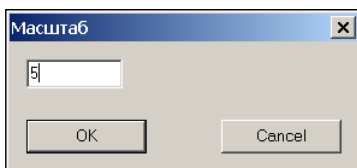
*Рис. 94 Исходная и деформированная модели*



## Масштаб

Вызов диалога для редактирования масштаба перемещений для визуализации деформированной модели (Рис. 95).

*Рис. 95 Диалог для выбора масштаба*



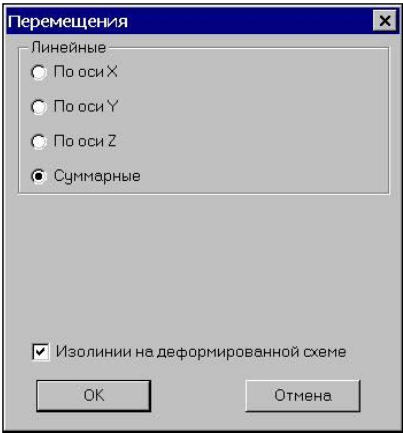
Автомасштабирование

Нажмите пункт *Автомасштабирование* для автоматического определения визуально приемлемого масштаба.

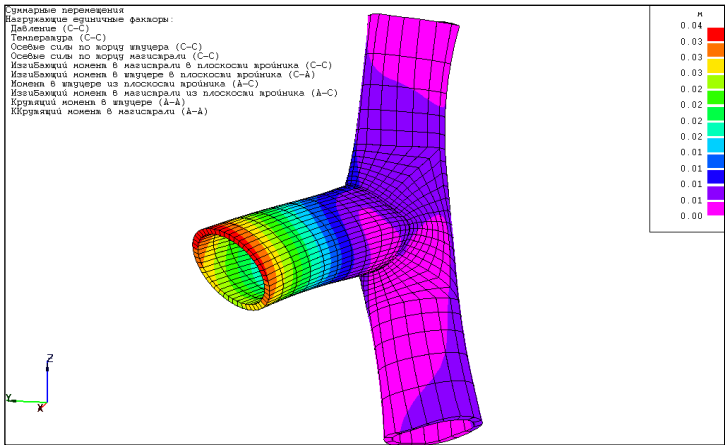
Изополя перемещений

Показ выбора компонент **перемещений** и изолинии перемещений (Рис. 96 и Рис. 97).

*Рис. 96 Диалог для выбора компонент перемещений для визуализации изолиниями*



*Рис. 97 Изолинии перемещений на деформированной модели*



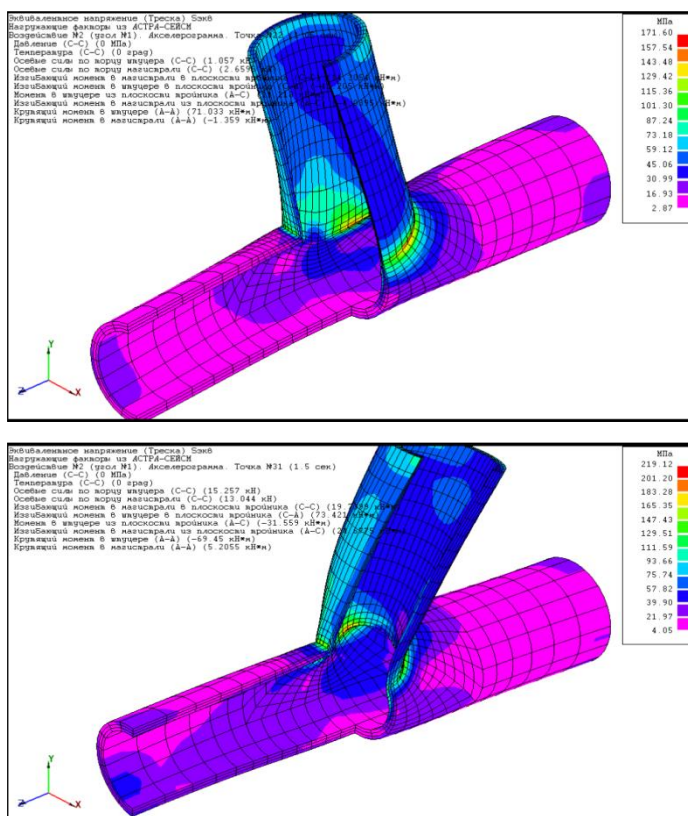
## Запись AVI-файла

Данный пункт меню предназначен для создания видеоролика и записи его в AVI-файл для результатов сейсмического расчета в случае выбора воздействия, заданного акселерограммой.

Для записи AVI-файла надо настроить вид отображаемого результата (перемещения, напряжения), выбрать в качестве нагрузки сейсмоздействие, заданное акселерограммой. При этом пункт меню *Запись AVI-файла* становится активным, его следует выбрать и указать имя формируемого видеофайла.

Для каждого момента времени (шага интегрирования) формируется кадр, содержащий изображение деформированной или напряженной модели детали. Просмотр AVI-файл осуществляется любыми доступными видеопроигрывателями (Рис. 98).

Рис. 98 Кадры видеоролика динамики НДС тройника от сейсмического воздействия, заданного акселерограммой



## Изополя деформаций

В случае проведения расчёта с учётом пластических деформаций доступен показ компонент общих, упругих и пластических деформаций (Рис. 99).

Рис. 99 Диалог для выбора компонент деформаций в случае проведения расчёта с учётом пластических деформаций

**Деформации**

- ☐ **Общие деформации**
  - ... X-компонента общей деформации
  - ... Y-компонента общей деформации
  - ... Z-компонента общей деформации
  - ... XY сдвиговая общая деформация
  - ... YZ сдвиговая общая деформация
  - ... XZ сдвиговая общая деформация
  - ... 1 главная общая деформация
  - ... 2 главная общая деформация
  - ... 3 главная общая деформация
  - ... Общая деформация Треска
  - ... Общая деформация Мизеса
- ☒ **Упругие деформации**
- ☒ **Пластические деформации**

СК для вывода компонент  
Глобальная СК

Метод приведения напряжений в точках интегрирования в узлы  
По ближайшей точке интегрирования

Способ осреднения по узлам  
Без осреднения

☒ Изолинии на деформированной схеме  
☒ Показывать исходную схему

ОК Отмена



## Изополя напряжений

Показ выбора компонент напряжений (Рис. 100 и Рис. 101).

Рис. 100 Диалог для выбора компонент напряжения в случае оболочечной модели

Напряжения (СПКЭ)

Верхняя и нижние поверхности

☒  $S_x'$ 
☐  $S_y'$ 
☐  $T_x'y'$

Главные напряжения

☐  $S_1$ 
☐  $S_3$

☐ Сэкв (Треска)
 ☐ Сэкв (Мизес)

Серединная поверхность

☐  $S_x'$ 
☐  $S_y'$ 
☐  $T_x'y'$ 
☐  $T_x'z'$ 
☐  $T_y'z'$

Главные напряжения

☐  $S_1$ 
☐  $S_2$ 
☐  $S_3$

☐ Сэкв (Треска)
 ☐ Сэкв (Мизес)

СК для вывода компонент напряжений

Локальная СК элемента

Метод приведения напряжений в точках интегрирования в узлы

По ближайшей точке интегрирования

Способ осреднения по узлам

Без осреднения

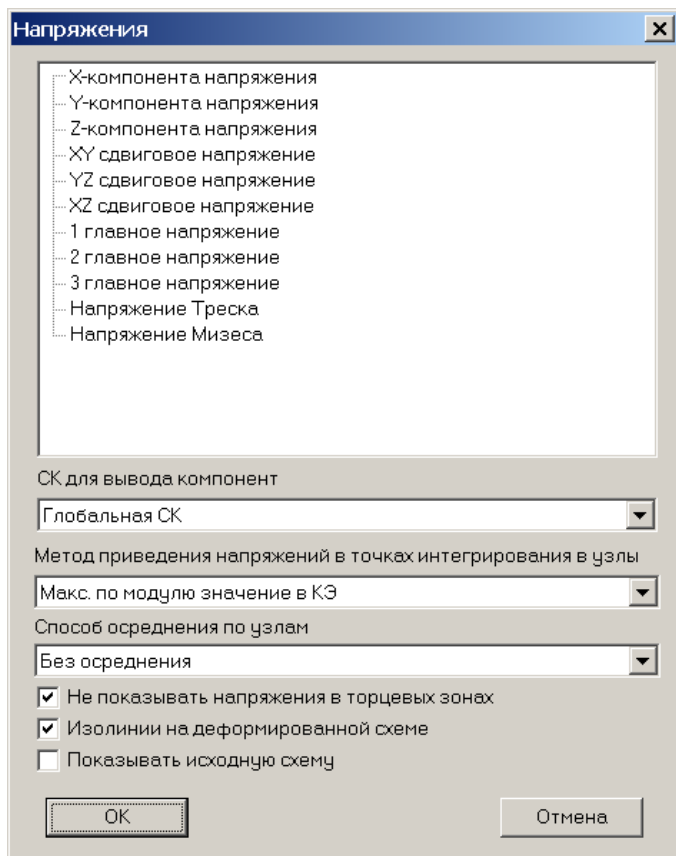
☒ Не показывать напряжения в торцевых зонах

☐ Изолинии на деформированной схеме

OK

Отмена

Рис. 101 Диалог для выбора компонент напряжения в случае объемной модели



Для СПКЭ-модели  $Sz'$  в локальной СК незначимо,  $Tx'z'$ ,  $Ty'z'$  присутствуют только на срединной поверхности, возможен просмотр напряженного состояния на срединной поверхности.

Для полных расчётных моделей и моделей тройников возможен просмотр компонент напряжений в глобальной системе координат.

Значения напряжений вычисляются не в узлах, а так, чтобы достигалась наилучшая возможная для данного количества точек точность интегрирования. В ПК АСТРА-СТАДИО используется квадратурная схема Гаусса.

Значения в точках интегрирования могут быть приведены КЭ к узлам при помощи различных, но равно нестрогих процедур усреднения.

Эти методы строятся таким образом, чтобы не пропустить экстремальные значения напряжений в точках интегрирования и дать достоверную картину распределения напряжений в рассматриваемой области (в том числе в зонах с высоким градиентом изменения напряжений).

В ПК АСТРА-СТАДИО реализованы следующие методы **приведения напряжений в точках интегрирования к узлам**:

- **Метод 1. Суммирование с весами по точкам интегрирования.** Осреднение значений в узлах на верхней и нижней поверхностях обратно-пропорционально квадрату расстояния от точек интегрирования до выбранной точки.
- **Метод 2. Выбор максимума во всем КЭ.** Выбор максимального по модулю значения для всех точек интегрирования КЭ. Полученное значение присваивается всем точкам КЭ.
- **Метод 3. По ближайшей точке интегрирования.** Напряжение в узле берётся по ближайшей точке интегрирования.

**Метод 4. Кубическая экстраполяция.** Используется кубический полином полином:  $S(x,y,z) = a + bx + cy + dz + exy + fyz + gxz + hxyz$ , где  $x,y,z$  – натуральные координаты КЭ,  $a,b,c,d,e,f,g,h$  – коэффициенты. Для определения коэффициентов кубического полинома используется 8 угловых точек интегрирования. В итоге имеем 8 уравнений с 8-ю неизвестными. Решая данную систему, получаем коэффициенты кубического полинома. Подставляем, затем, натуральные координаты узлов в данный полином, получаем искомые значения компонент напряжений в узлах. Данный способ применяется только для ИПКЭ20.

Применение **первого** метода осреднения несколько уменьшает максимальное напряжение по системе, вычисленное в узлах, но позволяет получить картину распределения напряжений, близкую к реальной.

**Второй** способ наиболее подходит для знакопостоянных напряжений (например, для визуализации нормативных оценок напряжений) и позволяют не пропустить максимальное по модулю напряжение.

После приведения напряжений к узлам можно для каждого узла применить процедуру осреднения по всем КЭ, содержащими данный узел.

Реализовано два **способа осреднения по узлам**:

- **Среднее арифметическое**
- **Максимальное по модулю значение**

Возможен **показ напряжений** во всех КЭ или за исключением КЭ торцевых зон. В торцевых зонах возможно появления “паразитических” высоких напряжений из-за закреплений некоторых узлов на торце (например, в КЭ-модели отвода).

Для повышения наглядности представления напряжений реализована возможность отображения **изолиний на деформированной схеме** (Рис. 102).

### ***Min / Max* в точках интегрирования**

Из-за примененных процедур приведения напряжений в узлы и процедур осреднения по узлам реальное минимальное и максимальное напряжение может отличаться от показанного на цветовой палитре.

Пункт *Min / Max в точках интегрирования* предназначен для того, чтобы узнать реальное вычисленное напряжение в точках интегрирования (Рис. 103).

Рис. 102 Визуализация напряжений на деформированной модели

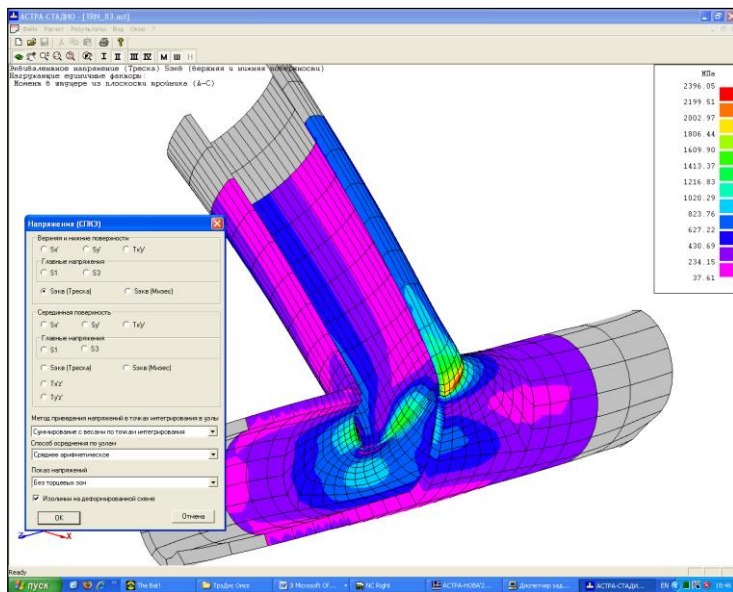
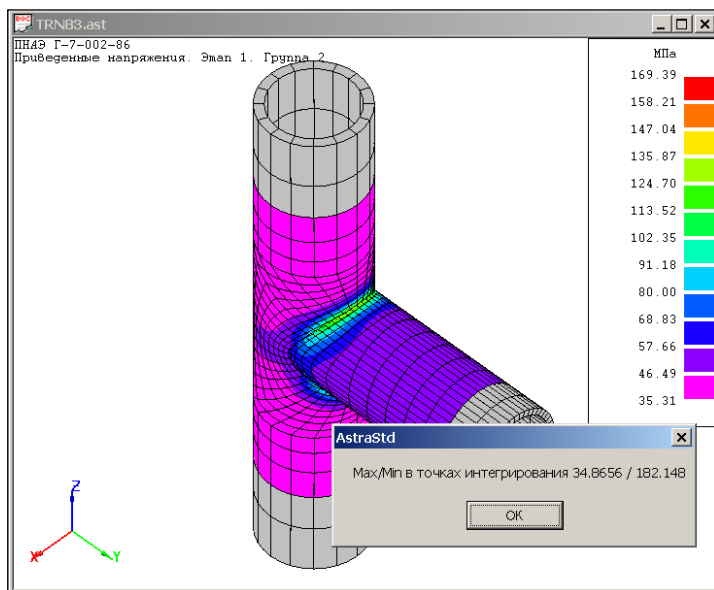


Рис. 103 Цветовая палитра и Min / Max напряжений в точках интегрирования



## Оценка прочности

Для визуализации расчетных приведенных или относительных напряжений нормативных этапов-групп при действии полной системы заданных/импортированных нагрузок.

Показ выбора этапа расчета при визуализации оценки прочности (Рис. 104).

*Рис. 104 Диалог для выбора этапа расчета при визуализации оценки прочности (приведенных или относительных напряжений)*

**Оценка прочности(ПНАЭ Г-7-002-86)**

Вид расчета  
Статика

Этап 1. Группа 2  
Этап 3. Группа 3 (размахи напряжений)  
Этап 3. Группа 4 (амплитуды напряжений)  
Испытания. Группа 2

Напряжение  
☒ Приведенное ☐ Относительное

Метод приведения напряжений в точках интегрирования в узлы  
Макс. по модулю значение в КЭ

Способ осреднения по узлам  
Без осреднения

☒ Не оценивать прочность торцевой зоны  
☒ Учет Txz и Tyz на срединной поверхности  
☐ Знаки сейсмонапряжений по наиболее значимой форме  
☐ Изолинии на деформированной схеме

OK Отмена

## Графики (от нагрузки)

После расчёта по определению предельной нагрузки доступны графики следующих величин

Максимальная главная деформация
Пластическая работа
Относительная пластическая работа
Производная относительной пластической работы

При выборе типа графика появляется окно с графиком.

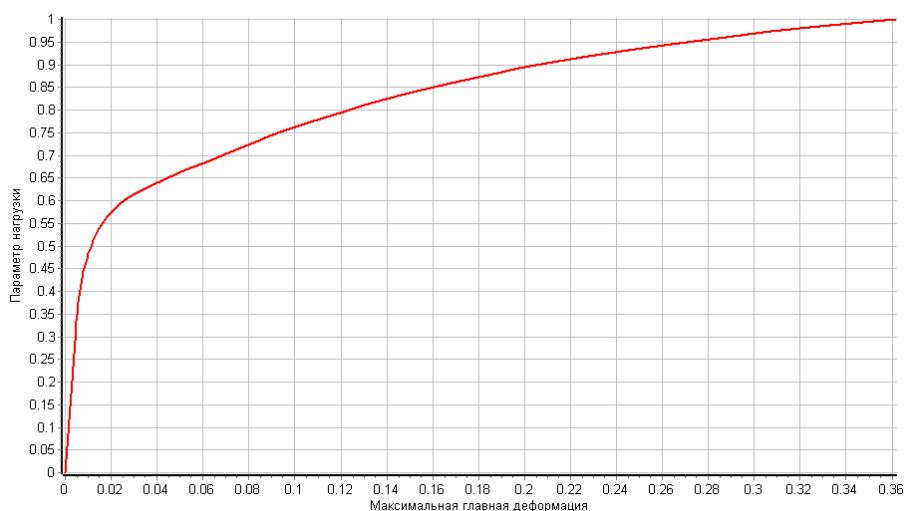
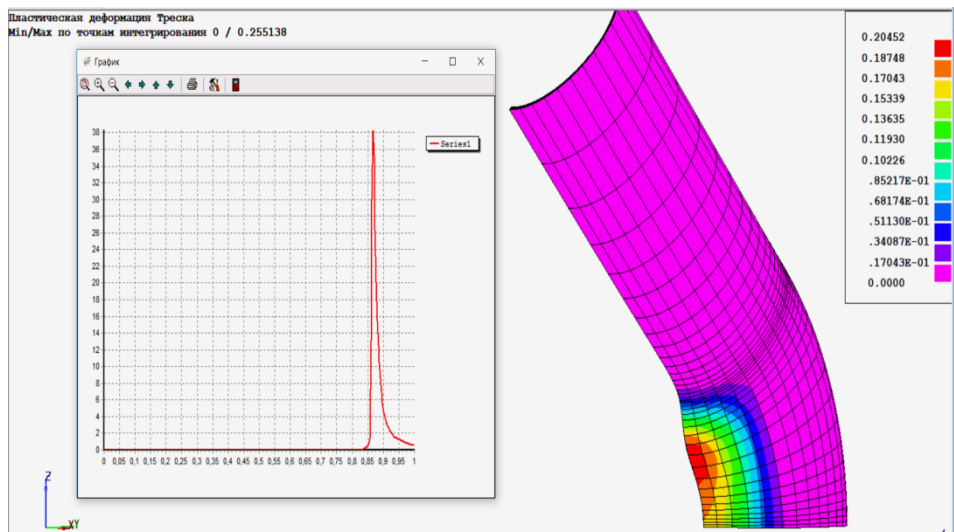
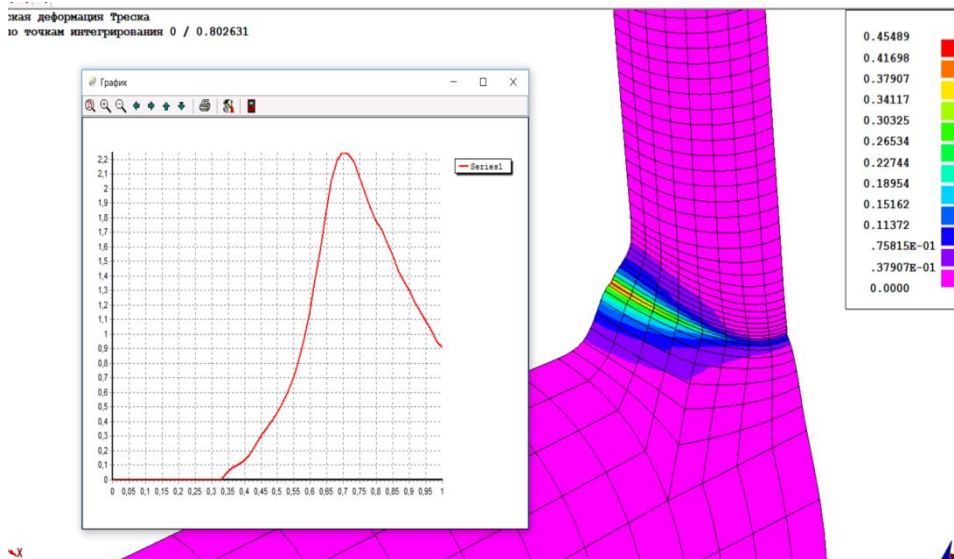


Рис. 105 Пластические деформации и графики скорости изменения удельной пластической работы



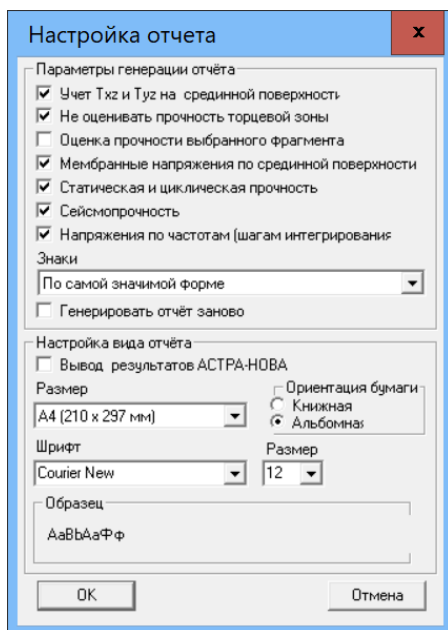


## Отчет

Для расчётов НДС и прочности и определения предельных нагрузок может быть сформирован краткий итоговый отчёт

При выборе пункта *Отчёт* после расчёта НДС и прочности появляется диалоговое окно с настройками отчёта (Рис. 106).

*Рис. 106 Диалог для настройки вида отчета*



Для выбранных Норм прочности выводятся максимальные расчетные напряжения и допускаемые напряжения для всех значимых этапов расчета (групп напряжений) (Рис. 107) для выбранного фрагмента модели. В случае, если расчетные напряжения превышают допускаемые, то соответствующая ячейка таблицы закрашивается в красный цвет и под таблицей выводится предупреждение.

Генерация отчёта может занимать продолжительное время особенно для многослойных изопараметрических расчётных моделей в случае выбора оценки сейсмической прочности. После первой генерации отчёта, он записывается в

двоичный файл результатов, и если настройки отчёта и выбранный фрагмент модели не менялись, то при последующем выборе пункта *Отчёт* сразу же показывается (без генерации). В случае выбора опции *Генерировать отчёт заново* отчёт всегда генерируется заново, даже если настройки отчёта не менялись.

- *Всегда генерировать отчёт заново* – при наличии флажка отчёт всегда генерируется заново;
- *Учёт  $T_{xz}$  и  $T_{yz}$  на срединной поверхности* – при наличии флажка при вычислении напряжений для оболочечных моделей учитываются компоненты напряжений  $\tau_{xz}$  и  $\tau_{yz}$  на срединной поверхности;
- *Не оценивать прочность торцевых зон* – при наличии флажка прочность торцевых зон (зон приложения нагрузок и кинематических краевых условий) не оценивается;
- *Оценка прочности выбранного фрагмента* – при наличии флажка оценивается прочность только выбранного фрагмента расчётной модели;
- *Мембранные напряжения по срединной поверхности* – при наличии флажка используются точки интегрирования вблизи срединной поверхности;
- *Статическая прочность* – если флажок установлен, то будет проводиться оценка статической и циклической прочности;
- *Сейсмопрочность* – если флажок установлен, то будет проводиться оценка статической и циклической прочности;
- *Знаки* – способ выбора знаков компонент суммарных сейсмических напряжений (см. Оценка сейсмопрочности).

После расчёта НДС и прочности отчёт имеет следующий вид (Рис. 107)

*Рис. 107 Пример отчета после расчёта НДС и прочности (фрагмент)*

D:\DATA\_ASTRANOVA\Examples (эталон) \EXAMPLES\АЭС-  
\TEST3\ASTD\TEST3\_тройник\_83

Оценка прочности по АСТРА-АЭС (ПНАЭ Г-7-002-86)

Вид расчёта	Мак, МПа	Доп, МПа
Этап 1. Группа 2	147.14	176.50
Этап 3. Группа 3 (размахи напряжений)	146.78	407.83
Этап 3. Группа 4 (амплитуды напряжений)	73.39	180.00
Воздействие №1 (спектр)	СЕЙСМ	370.94
	СТАЦ+СЕЙСМ	387.93
	СТАЦ-СЕЙСМ	368.43
Воздействие №2 (акселерограмма)	СЕЙСМ	369.98
	СТАЦ+СЕЙСМ	368.02
	СТАЦ-СЕЙСМ	386.10

■ Расчётное напряжение превышает допускаемое

После расчёта на определение предельной нагрузки отчёт имеет следующий вид (Рис. 108)

Рис. 108 Пример отчета после расчёта на определение предельной нагрузки

Результаты расчёта предельной нагрузки	
Критерий	Предельная нагрузка*
Двойной упругий наклон (TES) (рис. 1)	0.578075
Максимум скорости изменения относительной пластической работы (рис. 2)	0.7346

\*Предельное значение параметра нагрузки q

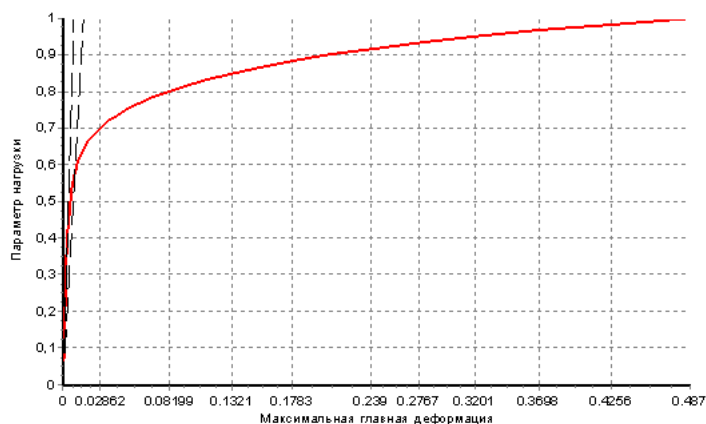


Рис. 1 Метод двойного упругого наклона

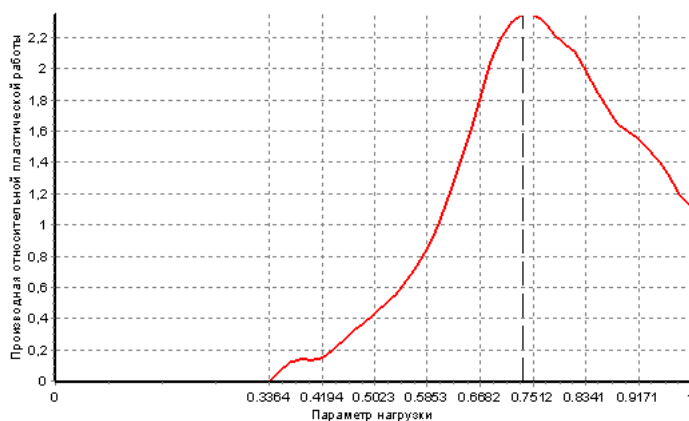
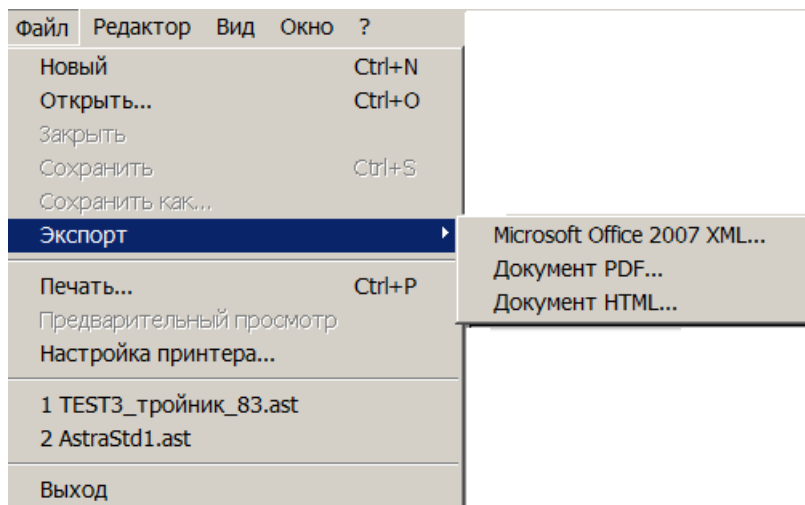
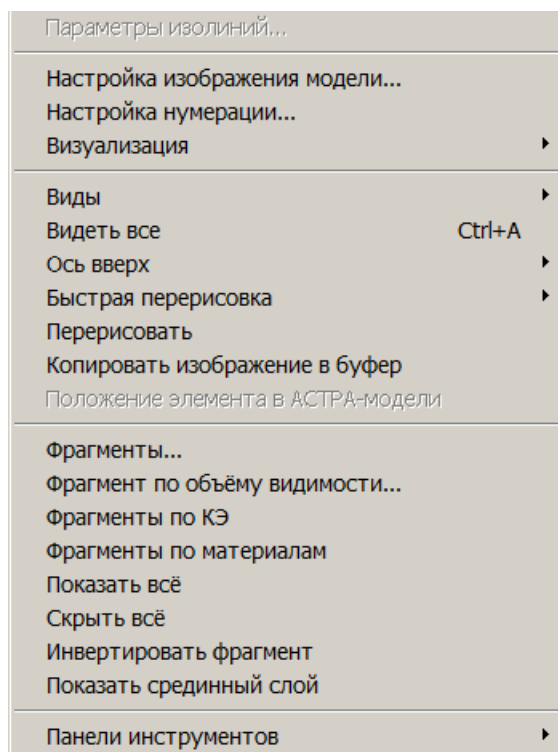


Рис. 2 Критерий максимума скорости возрастания относительной пластической работы

Сформированный отчёт может быть экспортирован в Microsoft Office, документ PDF, документ HTML. Для этого надо выбрать соответствующий пункт в меню *Файл* окна отчёта.



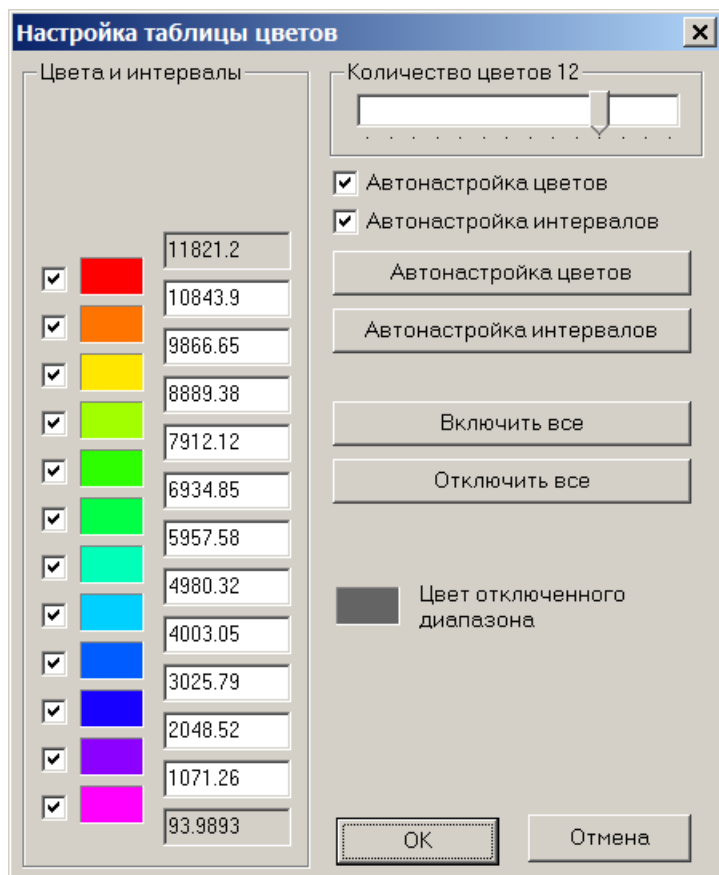
## Меню Вид



## Параметры изолиний

Показ Диалога для настройки параметров изолиний (Рис. 109).

Рис. 109 Диалог для настройки параметров изолиний



- Число цветовых градаций – от 2 до 16.

При наличии флажка *Автонастройка цветов* цвета интервалов отображаемой величины вычисляются автоматически по спектру (от фиолетового до красного цвета). При отсутствии этого флажка, Вы можете настроить цвета интервалов по своему усмотрению, нажимая левой клавишей мыши на соответствующем интервалу цвете. При этом, также, становится активной кнопка *Автонастройка цветов*, которая используется для автонастройки цветов пользователем.

При наличии флажка *Автовычисление интервалов* интервалы формируются автоматически делением интервала от минимального до максимального значения на заданное число цветовых градаций. При отсутствии этого флажка, Вы можете сами задать внутренние границы интервалов. При этом, также, становится активной

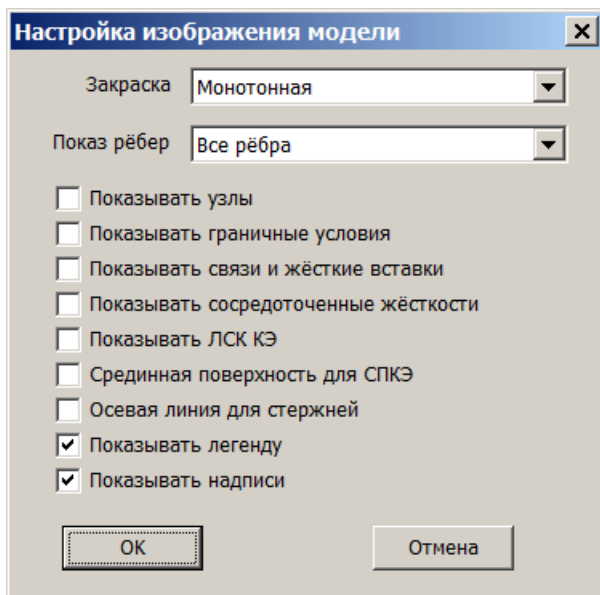
кнопка *Автонастройка интервалов*, которая используется для автонастройки интервалов пользователем.

Вы можете по выбору включать или выключать диапазоны при помощи флажков, а также кнопок *Включить все диапазоны* и *Отключить все диапазоны*.

Для настройки цвета отключенного диапазона дважды нажмите левой клавишей мыши на соответствующем цвете.



## Настройка изображения модели...

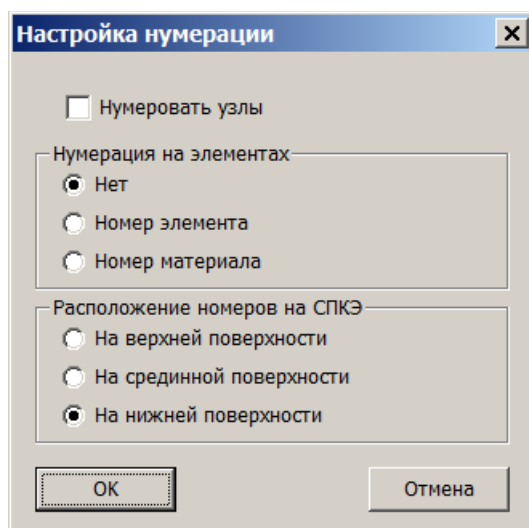


- *Закраска* – различные способы графического отображения исходной и деформированной расчетной КЭ-модели. Возможные варианты: нет закрашки, монотонная закрашка и закрашка Гуро (учёт освещённости) Наиболее реалистичный режим (Закраска Гуро) не рекомендуется для визуализации изополей перемещений и напряжений;
- *Показ рёбер* – прорисовка рёбер КЭ. Возможные варианты: не показывать рёбра, показывать все рёбра и показывать рёбра только между некомпланарными гранями КЭ;
- *Показывать узлы* - на расчетной КЭ-модели отобразить узлы в виде точек;
- *Показывать граничные условия* – схематический показ узлов с заданными кинематическими условиями;
- *Показывать связи и жёсткие связи* – схематический упругих связей и жёстких вставок между узлами;
- *Показывать сосредоточенные жёсткости* – схематический показ сосредоточенных жёсткостей;
- *Показывать ЛСК КЭ* – рисование ЛСК КЭ в средней точке КЭ;
- *Срединная поверхность для СПКЭ* – при рисовании СПКЭ используется срединной поверхность;

- *Осевая линия для стержней* – рисовать стержневые КЭ в виде осевых линий.
- *Показывать легенду*–скрыть или показать легенду (таблицу цветов) на экране
- *Показывать надписи*–скрыть или показать надписи на экране

## Настройка нумерации...

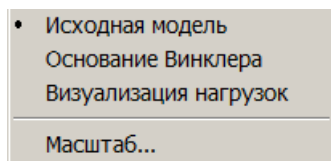
Вызов диалога для настройки нумерации модели



- *Нумеровать узлы* – поставьте галочку напротив, чтобы на расчетной КЭ-модели отобразить номера узлов.
- *Нумерация на элементах*– отображение номеров на элементах
  - *Нет*
  - *Номера элементов* – отображение номера элемента
  - *Номера материалов* – отображение номера материала
- *Расположение номеров узлов для СПКЭ*
  - *на нижней поверхности,*
  - *срединной поверхности*
  - *верхней поверхности.*

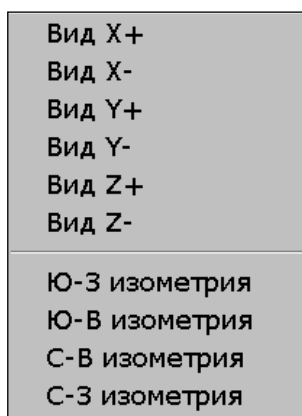
## Визуализация

Настройка вариантов показа расчётной КЭ модели



- *Исходная модель* – отрисовка исходной КЭ модели с учётом цветов материала;
- *Основание Винклера* – показ наличия основания Винклера на гранях КЭ цветом;
- *Визуализация нагрузок* – показ нагрузок для расчётного фрагмента элемента трубопровода при помощи цвета (давление, температура) и стрелок (распределённые торцевые нагрузки) ;
- *Масштаб* – настройка размеров стрелок для отображения распределённых торцевых нагрузок

## Виды



Выбор стандартных видов для модели

### **Видеть все**

Вписать изображение исходной или деформированной расчетной КЭ-модели в границы графического окна.

### **Ось вверх**

Выбор оси, направленной вверх (ось X, ось Y, ось Z).

### **Копировать изображение в буфер**

Копировать изображение графического окна в буфер обмена (в т.ч. для последующей вставки в отчет).

### **Перерисовать**

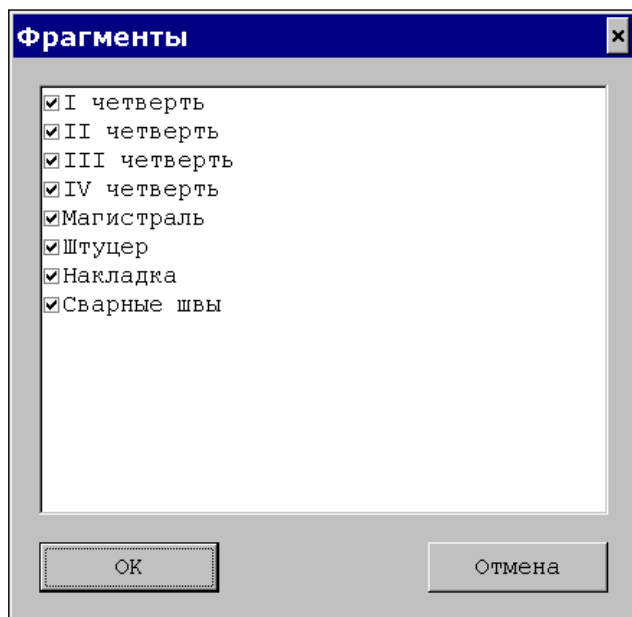
Перерисовать активное окно.

## Фрагменты...

Данный пункт меню предназначен для фрагментации модели (в целях лучшего отображения КЭ-сетки).

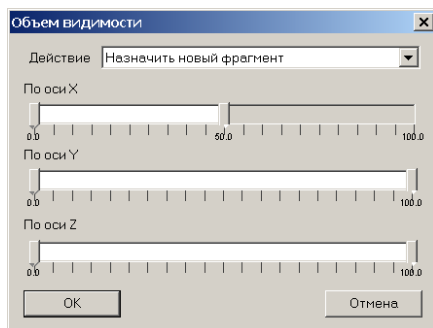
Возможны следующие способы фрагментации:

- включение/отключение четвертей модели;
- включение/отключение по номеру материала. Например для тройника фрагментация по штуцеру, магистрали, накладки для тройника.

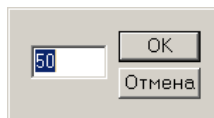


## Фрагмент по объёму видимости...

Вызов диалога для фрагментации по объёму видимости. При помощи “ползунков” устанавливается видимый объём. Значения объёма задаются в процентах от габаритов модели. Элементы содержащиеся в выбранном объёме, могут назначаться в качестве нового фрагмента, либо добавлены к существующему фрагменту, либо удалены из него.



Для точного ввода положения “ползунка” нужно нажать на нём правой клавишей мыши и в появившемся окне ввести значение.



### Фрагменты по элементам

Переключение АСТРА-СТАДИО в режим фрагментации по конечным элементам. Фрагментация (исключение выбранных КЭ из показа) осуществляется путём нажатия левой клавишей мыши на конечном элементе или “резиновым” контуром.

### Фрагменты по материалам

Переключение АСТРА-СТАДИО в режим фрагментации по материалам элементам. Фрагментация (исключение выбранных КЭ из показа) осуществляется путём нажатия левой клавишей мыши на конечном элементе или “резиновым” контуром. При этом все КЭ, материал которых совпадает с материалом выбранных КЭ, исключаются из просмотра.

### Показать всё

Показ всех КЭ.

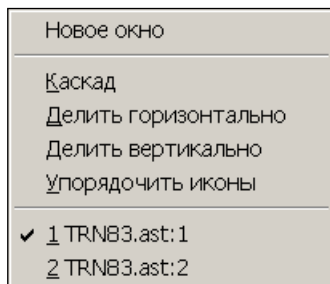
### Скрыть всё

Скрыть все КЭ

### Инвертировать фрагмент

Сделать все видимые КЭ невидимыми, и наоборот.

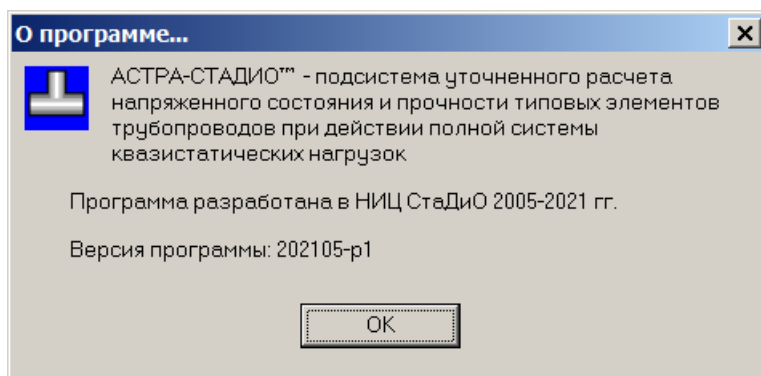
## Меню Окно



<i>Каскад</i>	Расположить открытые окна каскадом
<i>Делить горизонтально</i>	Расположить открытые окна, разделив горизонтально
<i>Делить вертикально</i>	Расположить открытые окна, разделив вертикально
<i>Упорядочить иконы</i>	Упорядочить окна, свернутые в иконки
<i>Окно 1, 2 ...</i>	Перейти в выбранное окно

## Меню Помощь

<i>Справка</i>	Вызов разделов справки
<i>О программе</i>	Просмотр информации о текущей версии программы





## Теоретическое описание

### Нормативная оценка упругих напряжений

Для всех описанных деталей-элементов трубопроводов реализовано вычисление главных и эквивалентных напряжений (по Мизесу и Треска) в точках интегрирования.

В АСТРА-СТАДИО реализована оценка статической, циклической и сейсмической прочности для всех значимых этапов расчетов по различным российским. Нормам:

- ПНАЭ Г-7-002-86,
- РД 10-249-98
- РТМ 38.001-94
- ГОСТ 32388-2013
- РД 10-400-01
- ГОСТ Р 55596-2013
- СНиП 2.05.06-85
- СП 36.13330.2012
- ГОСТ Р 55989-2014
- ГОСТ Р 55990-2014
- ГОСТ Р 55600-2013
- РД РТМ 26-01-44-78
- РД5Р.4322-86

### Эквивалентные напряжения

Для оценки расчётных напряжений в зависимости от нормативных требований используется 2 критерия

Напряжения Треска

$$\sigma_{tr} = \max(|\sigma_3 - \sigma_1|, |\sigma_2 - \sigma_1|, |\sigma_3 - \sigma_2|), \text{ где}$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения

Напряжения Мизеса

$$\sigma_{mi} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_z)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}$$

где  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  – компоненты напряжений

### **Приведенные напряжения на срединной поверхности**

Для оболочечной СПКЭ-модели для определения напряжений на срединной поверхности берётся полусумма компонент напряжений в “нижней” и “верхней” точках интегрирования по толщине. При этом при определении главных напряжений опционно могут использоваться значения касательных напряжений на срединной поверхности  $\tau_{xz}$  и  $\tau_{yz}$

В случае многослойной трёхмерной модели возможны 2 ситуации – *чётное* и *нечётное* количество слоёв КЭ по толщине.

При *чётном* количестве слоёв используются “верхние” точки интегрирования внутреннего слоя КЭ и “нижние” точки интегрирования для внешнего слоя.

Для *нечётного* количества слоёв и 2-х точек интегрирования по толщине значения компонент напряжений на срединной поверхности вычисляются как полусумма соответствующих компонент на нижней и верхних поверхностях. В случае 3-х точек интегрирования по толщине используются значения в “средних” по толщине КЭ точках интегрирования.

В случае, когда сложно выделить срединную поверхность, например при моделировании сварных соединений труб, берутся значения во всех точках интегрирования по толщине (заведомо худший случай), при этом в отчёте выводится соответствующее предупреждение.

### **Оценка прочности по группам напряжений по ПНАЭ Г-7-002-86**

#### Оценка прочности по группе 2 (статическая прочность)

Принимается, что местные мембранные и общие изгибные статические напряжения (группа 2,  $(\sigma)_2$ , ПНАЭ Г-7-002-86) соответствуют напряжениям на срединной поверхности от нагружающих факторов этапа 1 расчета на статическую прочность.

#### Оценка прочности по группе 3 (приспособляемость)

Принимается, что размахи приведенных напряжений (группа 3,  $(\sigma)_{RK}$ , ПНАЭ Г-7-002-86) соответствуют напряжениям на срединной поверхности от нагружающих факторов этапа 3 расчета на статическую и циклическую прочность.

#### Оценка прочности по группе 4 (циклическая прочность)

Принимается, что амплитуда местных напряжений с учётом концентрации (группа 4,  $(\sigma_{aF})_K$ , ПНАЭ Г-7-002-86) соответствуют половине максимального приведенного напряжения по толщине КЭ от нагружающих факторов этапа 3 расчета на статическую и длительную циклическую прочность.

## Оценка сейсмостойкости

Для оценки сейсмостойкости по линейно-спектральной методике используется суммирование модальных откликов “корень квадратный из суммы квадратов” (ККСК) без учета корреляции форм

$$R = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_{mod}} (R_k)^2}, \text{ где}$$

$R$  – суммарный сейсмический отклик (перемещения, нагрузки, усилия и напряжения) системы,

$R_k$  – модальный отклик, соответствующий  $k$ -ой собственной форме колебаний,

$N_{mod}$  – количество учитываемых форм колебаний.

Правило суммирования по формам ККСК применяется для каждой компоненты тензора сейсмических напряжений на срединной поверхности. После этого определяются эквивалентные (приведенные) сейсмические напряжения по критерию Треска или Мизеса в зависимости от используемых норм расчета.

$$\{\sigma^\Sigma\} = \{\sigma_x^\Sigma, \sigma_y^\Sigma, \sigma_z^\Sigma, \tau_{xy}^\Sigma, \tau_{xz}^\Sigma, \tau_{yz}^\Sigma\}^T - \text{накопленные сейсмонапряжения}$$

$$\sigma_x^\Sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_{mod}} (\sigma_x^\Sigma)^2}, \sigma_y^\Sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_{mod}} (\sigma_y^\Sigma)^2}, \sigma_z^\Sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_{mod}} (\sigma_z^\Sigma)^2}$$

$$\tau_{xy}^\Sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_{mod}} (\tau_{xy}^\Sigma)^2}, \tau_{xz}^\Sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_{mod}} (\tau_{xz}^\Sigma)^2}, \tau_{yz}^\Sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_{mod}} (\tau_{yz}^\Sigma)^2}$$

$$\{\sigma^0\} = \{\sigma_x^0, \sigma_y^0, \sigma_z^0, \tau_{xy}^0, \tau_{xz}^0, \tau_{yz}^0\}^T - \text{статические напряжения}$$

Для вычисления расчетных напряжений группы  $(\sigma_s)_2$  от суммарного вклада статики и сеймики рассматривается два случая: *статика + сеймика* и *статика – сеймика*. В первом случае к компонентам напряжений статики прибавляются компоненты напряжений сеймики (полученные по правилу ККСК), во втором случае – вычитаются.

$$\{\sigma^-\} = \{\sigma_x^0 - \sigma_x^\Sigma, \sigma_y^0 - \sigma_y^\Sigma, \sigma_z^0 - \sigma_z^\Sigma, \tau_{xy}^0 - \tau_{xy}^\Sigma, \tau_{xz}^0 - \tau_{xz}^\Sigma, \tau_{yz}^0 - \tau_{yz}^\Sigma\}^T$$

$$\{\sigma^+\} = \{\sigma_x^0 + \sigma_x^\Sigma, \sigma_y^0 + \sigma_y^\Sigma, \sigma_z^0 + \sigma_z^\Sigma, \tau_{xy}^0 + \tau_{xy}^\Sigma, \tau_{xz}^0 + \tau_{xz}^\Sigma, \tau_{yz}^0 + \tau_{yz}^\Sigma\}^T$$

Далее определяются эквивалентные напряжения и выбирается наихудший вариант.

Знаки компонент суммарных сейсмических напряжений опционно выбираются либо всегда положительными, либо совпадают со знаками компонент напряжений по форме с наибольшим вкладом в суммарные сейсмонапряжения.

Опционно доступен также вариант поиска худшей комбинации знаков.

$$\{\sigma^{\pm}\} = \{\sigma_x^0 \pm \sigma_x^{\Sigma}, \sigma_y^0 \pm \sigma_y^{\Sigma}, \sigma_z^0 \pm \sigma_z^{\Sigma}, \tau_{xy}^0 \pm \tau_{xy}^{\Sigma}, \tau_{xz}^0 \pm \tau_{xz}^{\Sigma}, \tau_{yz}^0 \pm \tau_{yz}^{\Sigma}\}^T$$

Для каждой точки интегрирования происходит перебор  $2^6 = 64$  комбинации знаков, затем определяется максимальное эквивалентное напряжение и выбирается наихудший вариант.

Для оценки сейсмостойкости в случае задания воздействия в виде акселерограммы, рассчитываются значения *статика* + *сейсмика* и *статика* – *сейсмика*, где сейсмические компоненты напряжений берутся для каждой точки интегрирования по времени. Вычисляются эквивалентные напряжения для каждого момента времени и выбирается максимальное значение за всё время интегрирования.

### Трёхмерные упругопластические расчёты элементов трубопровода

Виды упругопластического КЭ-анализа:

- расчет НДС с учётом пластических деформаций,
- расчет НДС с учётом автофретирования,
- определение предельной нагрузки по критериям статической прочности.

Упругопластические расчёты реализованы для следующих видов деталей:

- Прямая труба.
- Тройник.
- Отвод.
- Сварное соединение труб (сварной шов).

В зависимости от выбранного вида нагрузок используются следующие модели деталей:

- Фрагмент детали (для давления).
- Полная модель детали (для произвольной нагрузки).

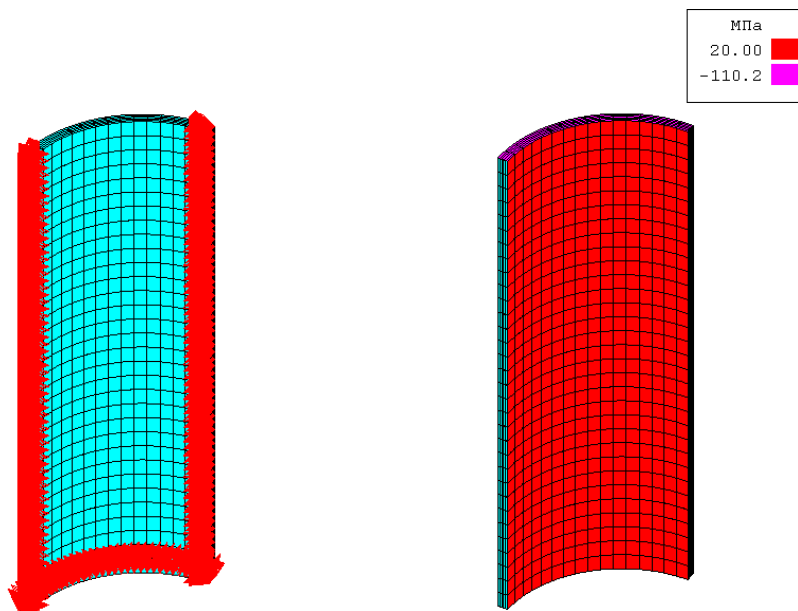
## Трехмерный упругопластический расчёт МКЭ прямой трубы

В качестве нагрузок используются внутреннее давление и компенсирующие осевые силы на торцах

В силу симметричности нагрузки в качестве расчётной модели рассматривается четверть трубы (

Рис. 110) На узлы, лежащие в плоскостях симметрии, накладываются следующие кинематические граничные условия: на плоскости  $X = 0$  условие  $U_x = 0$ , на плоскости  $Y = 0$  условие  $U_y = 0$ , на плоскости  $Z = 0$  условие  $U_z = 0$ .

*Рис. 110 Расчётная модель трубы. Граничные условия и нагрузка (20 МПа – внутреннее давление, -100,2 МПа – торцевое растягивающее напряжение)*



## Трехмерный упругопластический расчёт МКЭ отвода

Виды нагрузок:

- Внутреннее давление и компенсирующие осевые силы на торцах отвода.
- Произвольная нагрузка (внутреннее давление, торцевые силы и моменты).

В зависимости от выбранного вида нагрузок используются следующие модели отвода

- Четверть отвода (для давления).
- Полная модель отвода (для произвольной нагрузки).

### *Четверть отвода*

На узлы, расположенные на плоскостях  $X = 0$  и  $Z = 0$ , наложены условия плоскостной симметрии – на плоскости  $Z = 0$  наложено кинематическое условия  $U_Z = 0$ , на плоскости  $X = 0$  запрещено перемещение по оси  $X$ .

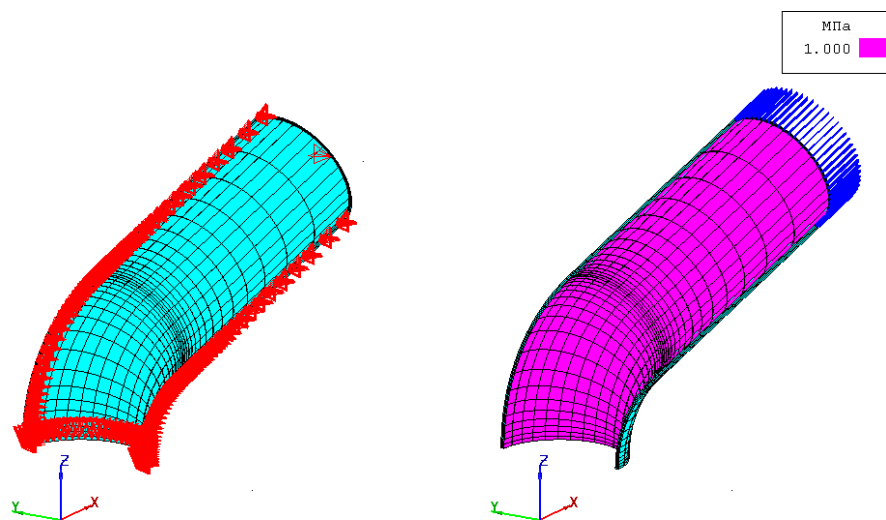
Для ограничения перемещения отвода по оси  $Y$  возможно 2 варианта:

- на узел посередине свободного торца отвода на внутренней поверхности наложено условие  $U_Y = 0$  (см. Рис. 111),
- на свободный торец отвода накладывается основание Винклера по трём направлениям  $X, Y, Z$ . Значение жёсткостей Винклера

вычисляется как  $k_{win} = C_{win} \frac{EF}{L + \frac{1}{2} R \alpha}$ , где  $C_{win}$ -коэффициент,

задаваемый пользователем,  $L$  – длина прямой части отвода,  $R$  – радиус отвода,  $\alpha$  - угол раскрытия отвода (в радианах)

*Рис. 111 Расчётная модель отвода (четверть). Граничные условия и нагрузка (1 МПа – внутреннее давление, синие линии – торцевое растягивающее напряжение)*



### *Полная модель отвода*

#### *Варианты закрепления*

- Консольная схема закрепления.
- Основание Винклера на торцах.

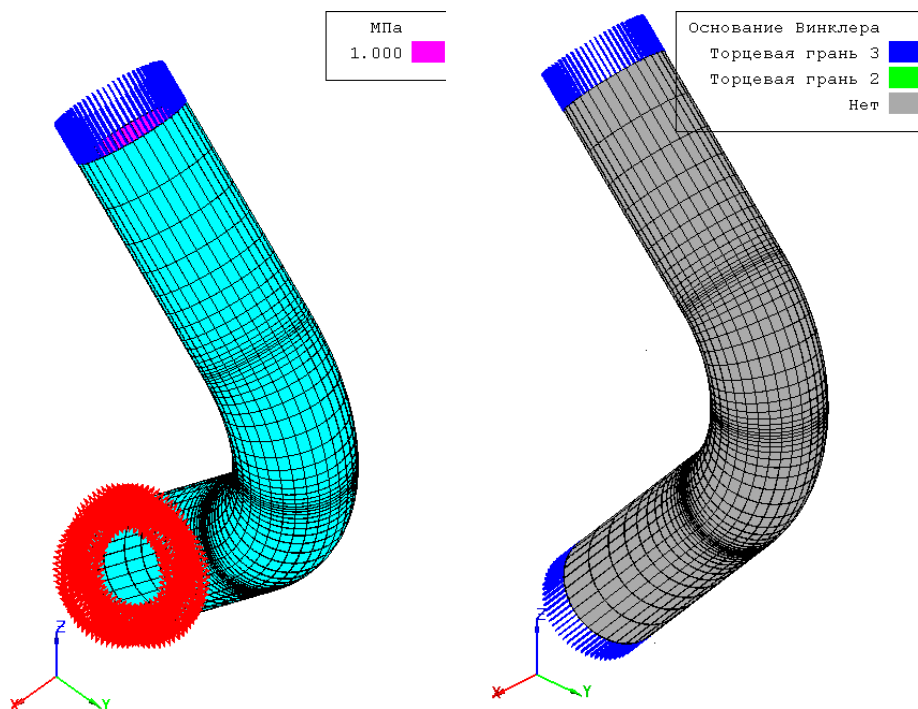
#### *Консольная схема*

При консольной схеме закрепления один из торцов отвода жёстко закрепляется по трём направлениям при помощи кинематических граничных условий. Торцевая распределённая нагрузка прикладывается к незакреплённому торцу отвода.

#### *Основание Винклера на торцах*

В таком варианте закрепления торцевые нагрузки прикладываются к обоим торцам отвода. Поскольку отсутствуют кинематические граничные условия, матрица системы становится плохо обусловленной. Для увеличения числа обусловленности матрицы на торцы отвода накладываются дополнительные не жёсткие закрепления в виде распределённых жёсткостей (основания Винклера) на обоих торцах отвода

*Рис. 112 Расчётная полная модель отвода (четверть). Граничные условия и нагрузка*



### Трёхмерный упругопластический расчёт МКЭ тройника

Виды нагрузок:

- Внутреннее давление и компенсирующие осевые силы на торцах магистрали и штуцера.
- Произвольная нагрузка (внутреннее давление, торцевые силы и моменты).

В зависимости от выбранного вида нагрузок используются следующие модели тройника:

- Четверть тройника (для давления).
- Полная модель тройника (для произвольной нагрузки).

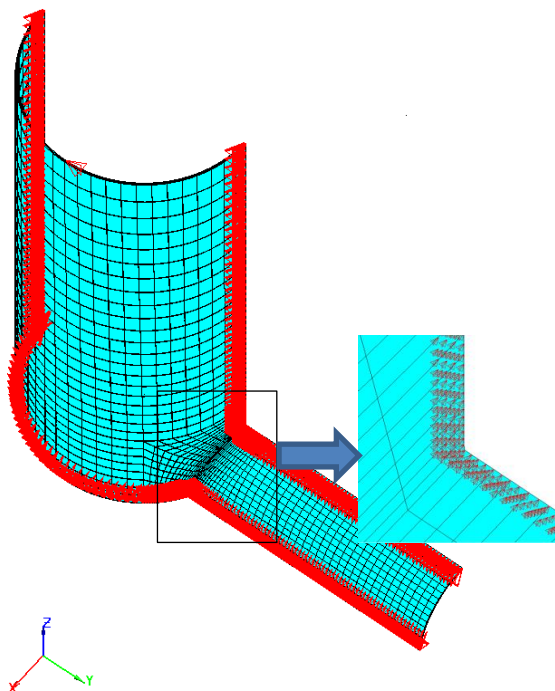
#### *Четверть тройника*

На узлы, расположенные на плоскостях  $X = 0$  и  $Z = 0$ , наложены условия плоскостной симметрии – на плоскости  $Z = 0$  наложено кинематическое условия  $U_Z = 0$ , на плоскости  $X = 0$  запрещено перемещение по оси  $X$ . Для



ограничения перемещения тройника по оси  $Y$  на узел посередине торца магистрали на внутренней поверхности наложено условие  $U_Y = 0$  (см.Рис. 113).

*Рис. 113 Расчётная модель тройника (четверть)*



*Полная модель тройникового соединения*

Варианты закрепления:

- Консольная схема закрепления.
- Заделка со свободным радиальным направлением.
- Основание Винклера на торцах.
- Сосредоточенные жёсткости на торцах.

#### *Консольная схема*

При консольной схеме закрепления один из торцов магистрали жёстко закрепляется по трём направлениям при помощи кинематических граничных условий. Торцевая распределённая нагрузка прикладывается к незакреплённому торцу штуцера и свободному торцу магистрали.

### *Заделка со свободным радиальным направлением*

При такой схеме закрепления один из торцов магистрали закрепляется по оси  $Z$  при помощи кинематических граничных условий. На том же торце задаётся основание Винклера с жёсткостью по касательному направлению. Торцевая распределённая нагрузка прикладывается к незакреплённому торцу штуцера и свободному торцу магистрали.

#### *Основание Винклера на торцах (Сосредоточенные жёсткости на торцах)*

В таких вариантах закрепления торцевые нагрузки прикладываются к обоим торцам магистрали и торцу штуцера. Поскольку отсутствуют кинематические граничные условия, матрица системы становится плохо обусловленной. Для увеличения числа обусловленности матрицы на торцы тройника накладываются дополнительные не жёсткие закрепления в виде сосредоточенных или распределённых жёсткостей (основания Винклера) на обоих торцах магистралей

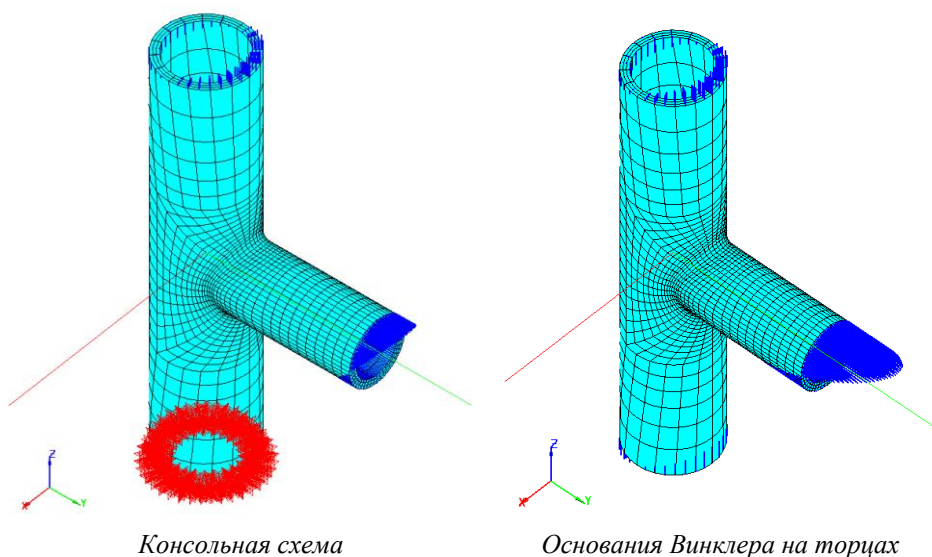
Варианты приложения нагрузок:

- Без учёта поперечных сил.
- С учётом поперечных сил.

В виду малости вклада поперечных сил в напряжённо деформированное состояние возможен отказ от учета поперечных сил по опции *Без учёта поперечных сил*.

В случае учёта поперечных сил на торцы тройника дополнительно прикладываются поперечные силы и соответствующие компенсирующие моменты из-за переноса поперечных сил на торцы.

*Рис. 114 Полная расчётная модель тройника. Распределённая нагрузка (моменты в штуцере и магистрали)*



## Общие конечноэлементные подходы

### Основные соотношения МКЭ

Используются следующие термины и обозначения

$\{q\} = \{q_x, q_y, q_z\}^T$  – вектор перемещений в глобальной системе координат  $x, y, z$ ;  
 $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}\}^T$  – вектор компонент деформаций в системе координат  $x, y, z$ ;  
 $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}\}^T$  – вектор компонент напряжений в системе координат  $x, y, z$ ,

Деформации в точке связаны с перемещениями соотношением Коши

$$\{\varepsilon\} = [L]\{q\}$$

где  $[L]$  – дифференциальный матричный оператор

$$[L]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix}$$

Напряжения связаны с деформациями соотношением Коши

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}$$

где  $[D]$  – матрица упругих постоянных

Перемещения в каждой точке конечного элемента определяются через узловые перемещения при помощи функции формы  $N_i = N_i(\xi, \eta, \zeta)$  или  $N_i = N_i(L_1, L_2, L_3, \zeta)$  следующим образом

$$\{q\} = \sum_{i=1}^N N_i \{q_i\}$$

где  $\{q_i\}$ - вектор узловых перемещений  $i$ -го узла,  $\xi, \eta, \zeta$  – криволинейный координаты,  $L_1, L_2, L_3$ -натуральные координаты ( $L_1 + L_2 + L_3 = 1$ )

$$\{q_i\} = \begin{Bmatrix} q_{x_i} \\ q_{y_i} \\ q_{z_i} \end{Bmatrix}$$

Таким образом:

$$\{\varepsilon\} = \sum_e [L] N_i \{q_i\} \text{ или}$$

$$\{\varepsilon\} = \sum_{i=1}^n [B_i] \{q_i\}$$

где  $[B_i] = [L]N_i$ - матрица деформаций  $i$ -го узла

или в матричной форме

$$\{\varepsilon\} = [B] \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_N \end{Bmatrix}$$

где  $[B]$  – матрица деформаций,  $[B] = [[B_1][B_2] \dots [B_n]]$ . Матрица деформаций  $[B]$  состоит из  $n$  блоков ( $n$  – количество узлов КЭ)

### МКЭ для задач линейной статики

Для задач линейной статики определяющей системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) будет:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

где:

$$[K] = \sum_{e=1}^L [k_e]$$

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_N \end{Bmatrix}$$

$[K]$  – глобальная матрица жесткости размерностью  $N \times N$ ;

$\{u\}$  – вектор узловых перемещений;

$L$  – общее количество конечных элементов ансамбля;

$N$  – общее количество степеней свободы ансамбля;

$[k_e]$  – матрица жесткости элемента;

$\{F\}$  – вектор узловой нагрузки;

Матрица жёсткости элемента  $[k_e]$  определяется следующим образом

$$[k_e] = \iiint_V [B]^T [D] [B] dV$$

## Семейство пространственных оболочечных, пластинчатых и мембранных КЭ суперпараметрического типа (СПКЭ)

Для аппроксимации оболочечных подсистем малой и средней толщины, постоянной или переменной, наиболее эффективны оболочечные КЭ суперпараметрического типа (СПКЭ). Поле перемещений внутри СПКЭ по осям  $X, Y, Z - u, v, w$  соответственно, – однозначно определяется аналогичными компонентами узловых перемещений ( $u_b, v_b, w_b$ ) и двумя углами поворота ( $\alpha, \beta$ ) узлового вектора нормали  $Z' = \{V_{3i}\}$  относительно двух взаимно перпендикулярных к нему направлений  $y'$  и  $x'$ :

$$\begin{Bmatrix} U \\ V \\ W \end{Bmatrix} = [N] \begin{Bmatrix} \{q\}_1^e \\ \vdots \\ \{q\}_{NPL}^e \end{Bmatrix}, \quad \{q\}_i^e = \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \\ W_i \\ \alpha_i \\ \beta_i \end{Bmatrix},$$

где: матрица формы  $[N]$  имеет вид  $[N] = [[N_1] \dots [N_{NPL}]]$ .

$$[N_i] = N'_i \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & | & 0,5\zeta h_i(\bar{V}_{1i})_x & | & -0,5\zeta h_i(\bar{V}_{2i})_x \\ 0 & 1 & 0 & | & 0,5\zeta h_i(\bar{V}_{1i})_y & | & -0,5\zeta h_i(\bar{V}_{2i})_y \\ 0 & 0 & 1 & | & 0,5\zeta h_i(\bar{V}_{1i})_z & | & -0,5\zeta h_i(\bar{V}_{2i})_z \end{bmatrix}$$

$(V_{1i})$  – проекции единичного вектора, по направлению совпадающего с  $X'$  на оси  $X, Y, Z$ ;

$(V_{2i})$  – то же для  $Y'$ ,  $\zeta$  – координата по толщине  $\zeta \in [-I, I]$  – толщина СПКЭ по  $i$ -ой нормали.

Для вычисления коэффициентов матрицы  $[B']$ , связывающей узловые перемещения  $\{q^e\}$  с компонентами деформация  $\{\varepsilon\}$  в локальной системе координат  $X', Y', Z'$ :

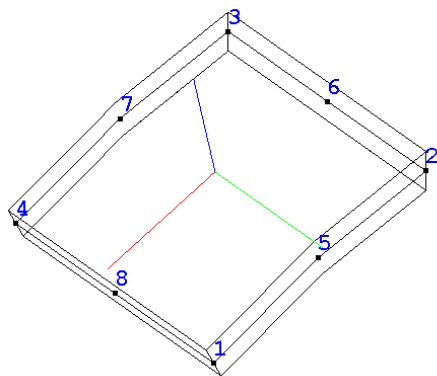
применяется процедура, описанная в [26].

В АСТРА-СТАДИО используются 2 типа СПКЭ (Рис. 115):

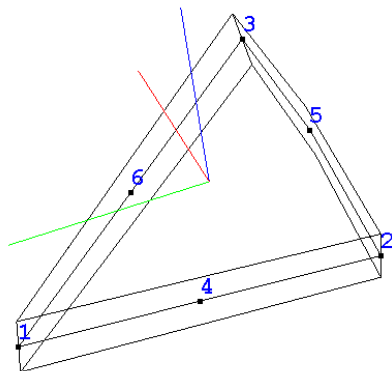
- **СПКЭ8** – оболочечный четырёхугольный 8-ми узловой КЭ с промежуточными узлами суперпараметрического семейства (Рис. 115, а);

- **СПКЭ6** – оболочечный четырёхугольный 8-ми узловой КЭ с промежуточными узлами суперпараметрического семейства (Рис. 115, б);

Рис. 115 Локальная нумерация узлов СПКЭ



а) СПКЭ8



б) СПКЭ6

Функции формы  $N_i$  для **СПКЭ8**

$$N'_1 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta)(\xi + \eta - 1)$$

$$N'_3 = \frac{-1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta)(\xi + \eta + 1)$$

$$N'_5 = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 + \eta)$$

$$N'_7 = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 - \eta)$$

$$N'_2 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta)(\eta - \xi - 1)$$

$$N'_4 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta)(\xi - \eta - 1)$$

$$N'_6 = \frac{1}{2}(1 - \eta^2)(1 - \xi)$$

$$N'_8 = \frac{1}{2}(1 - \eta^2)(1 + \xi)$$

Функции формы  $N_i$  для **СПКЭ6**

$$N'_1 = L_1(2L_1 - 1); N'_2 = L_2(2L_2 - 1); N'_3 = L_3(2L_3 - 1)$$

$$N'_4 = 4L_1L_2; N'_5 = 4L_2L_3; N'_6 = 4L_3L_1$$

где введено обозначение  $L_3 = 1 - L_1 - L_2$

Матрица упругих постоянных  $[D']$  для изотропных **СПКЭ** строится на основе трёхмерного закона Гука в предположении  $\sigma_z = 0$ .

$$[D'] = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{E\nu}{1-\nu^2} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 & 0 & 0 \\ & & G & 0 & 0 \\ \text{симм.} & & & \frac{G}{K} & 0 \\ & & & & \frac{G}{K} \end{bmatrix}$$

где:  $E$  – модуль упругости,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $G$  – модуль сдвига,  $K = 1,2$  – коэффициент “формы”, улучшающий аппроксимацию сдвиговых деформаций по толщине СПКЭ.

Для весьма тонкостенных пластин и оболочек с целью улучшения обусловленности матрицы жёсткости  $[K']$  проводится коррекция сдвиговых коэффициентов матрицы  $[D']$ :

$$D_{44}^{*1} = \beta^* \frac{G}{K}; D_{55}^{*1} = \frac{G}{K};$$

корректирующий множитель  $\beta^*$  принимается равным [12], [13]:

$$\beta^* = \min\{1, (20h/L)^2\},$$

где:  $h$ ,  $L$  – характерные (средние по КЭ) толщина и размер в плане СПКЭ.

Подынтегральная матрица  $[C]_f$  принимает вид:

$$[C]_f = \begin{bmatrix} C_{fx} & 0 & 0 \\ 0 & C_{fy} & 0 \\ 0 & 0 & C_{fz} \end{bmatrix},$$

где:  $C_{fx}$ ,  $C_{fy}$ ,  $C_{fz}$  – коэффициент постели винклеровского основания в направлении глобальных осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

При задании коэффициентов постели,  $C_{fx}$ ,  $C_{fy}$ ,  $C_{fz}$  в местной системе координат матрица  $[C]_f$  преобразуется к виду:

$$[C_f] = [\cos(x', x)]^T \begin{bmatrix} C_{fx} & 0 & 0 \\ 0 & C_{fy} & 0 \\ 0 & 0 & C_{fz} \end{bmatrix} [\cos(x', x)]$$



Вектор температурных (начальных) деформаций  $\{\varepsilon_\theta\}$  формируется в следующем виде:

$$\{\varepsilon_\theta\} = \{\alpha_1\theta, \alpha_2\theta, 0, 0, 0\}^T$$

где:  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты температурного расширения материала в направлении осей ортотропии 1 и 2,

$$\theta = (\theta^+ + \theta^-)/2 + \zeta(\theta^+ - \theta^-)/2$$

– температура, линейно распределенная по толщине. Для изотропного материала  $\alpha_1, \alpha_2 = \alpha$  в общем случае ортотропного материала  $\{\varepsilon_\theta\} = [T] \{\varepsilon_\theta\}$ .

Коэффициенты матриц СПКЭ вычисляются по формулам(3.3) с использованием квадратур Гаусса в криволинейных координатах ( $\xi, \eta, \zeta \in [-1, 1]$ ) для  $\square$ ;  $L_1, L_2, L_3 \in [0, 1]$  и  $\zeta$  для  $\Delta$ ):

$$[k] = \sum_{j=1}^J W_j ([k(\xi_j, \eta_j, \zeta_1)] + [k(\xi_j, \eta_j, -\zeta_1)])$$

где:  $j = 1, 2, \dots, J$  точки интегрирования,  $\xi_j, \eta_j, \zeta_j$  ( $L_1, L_2, L_3$ ) – криволинейные координаты точек интегрирования,  $W_j$  – весовые коэффициенты,  $\zeta_1 = 0,5773503$  (см. 3.4).

Установлено [6], [13] что для СПКЭ наилучшим является равномерное и умеренное (на  $1 \div 2$  единицы) понижение точности квадратур при вычислении матриц (3.3) по сравнению со схемой, которая обеспечивает точное вычисление объема (площади поверхности) и воспроизводит в основном характер изменения подынтегральных матриц в элементе. Исходя из положения, порядок интегрирования для матриц  $[m]^e, [k_f]^e, [p]^e$  рекомендуется брать на  $1 \div 2$  единицы больше, чем для других матриц.

С целью экономии машинного времени и памяти при вычислениях учитывается симметричность матриц  $[k]^e, [k_f]^e, [m]^e, [c]^e$ , независимость коэффициента матриц  $[N], [B]$  и др. от координаты  $\xi$ .

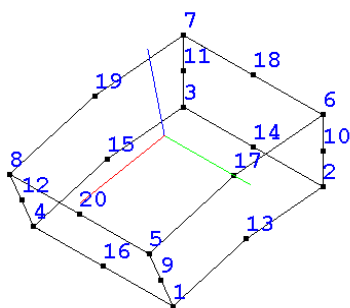
### Семейство изопараметрических трёхмерных КЭ (ИПКЭ) твёрдого тела

Трёхмерные изопараметрические КЭ (ИПКЭ) следует использовать лишь там, где адекватная аппроксимация фрагментов с помощью СПКЭ невозможна – в массивных узлах, толстостенных многослойных подсистемах, зонах пересечения толстостенных оболочек.

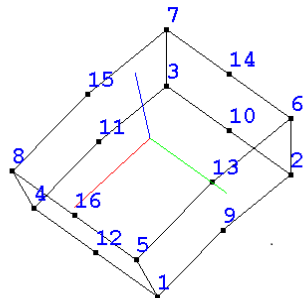
В АСТРА-СТАДИО используются 4 типа ИПКЭ (Рис. 116)

- **ИПКЭ20** – трехмерный, шестигранный четырехугольный в “плане”, 20-ти узловой КЭ с промежуточными узлами, изопараметрического семейства (Рис. 116, а);
- **ИПКЭ16** – трехмерный, шестигранный четырехугольный в “плане”, линейный по толщине 16-узеловой КЭ с промежуточными узлами, изопараметрического семейства Рис. 116, б);
- **ИПКЭ15** – трехмерный, пятигранный треугольный в “плане”, 15-узеловой КЭ с промежуточными узлами, изопараметрического семейства (Рис. 116, в);
- **ИПКЭ12** – трехмерный, пятигранный треугольный в “плане”, линейный по толщине 12-узеловой КЭ с промежуточными узлами, изопараметрического семейства (Рис. 116, г);

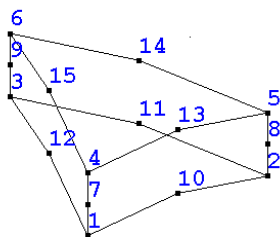
Рис. 116 Локальная нумерация узлов ИПКЭ



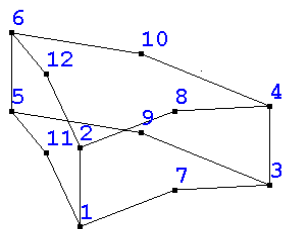
а) ИПКЭ20



б) ИПКЭ16



в) ИПКЭ15



г) ИПКЭ12

Функции формы  $N_i$  для **ИПКЭ20**

Угловые узлы:  $N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi_0)(1 + \eta_0)(1 + \zeta_0)(\xi_0 + \eta_0 + \zeta_0 - 2)$

Промежуточные узлы на ребрах:

$$\xi_i = 0, \eta_i = \pm 1, \zeta_i = \pm 1: N_i = \frac{1}{4}(1 - \xi^2)(1 + \eta_0)(1 + \zeta_0)$$

$$\eta_i = 0, \xi_i = \pm 1, \zeta_i = \pm 1: N_i = \frac{1}{4}(1 - \eta^2)(1 + \xi_0)(1 + \zeta_0)$$

$$\zeta_i = 0, \xi_i = \pm 1, \eta_i = \pm 1: N_i = \frac{1}{4}(1 - \zeta^2)(1 + \xi_0)(1 + \eta_0)$$

где введено обозначение  $\xi_0 = \xi_i \xi, \eta_0 = \eta_i \eta, \zeta_0 = \zeta_i \zeta$

*Функции формы  $N_i$  для ИПКЭ16*

$$N_{2i-1} = N'_i \frac{1 - \zeta}{2}, N_{2i} = N'_i \frac{1 + \zeta}{2}, 1 \leq i \leq 8$$

где  $N'_i$  - функции формы оболочечного четырёхугольного элемента

*Функции формы  $N_i$  для ИПКЭ15*

Угловые узлы

$$N_1 = \frac{1}{2}L_1(2L_1 - 1)(1 - \zeta) - \frac{1}{2}L_1(1 - \zeta^2); N_2 = \frac{1}{2}L_2(2L_2 - 1)(1 - \zeta) - \frac{1}{2}L_2(1 - \zeta^2);$$

$$N_3 = \frac{1}{2}L_3(2L_3 - 1)(1 - \zeta) - \frac{1}{2}L_3(1 - \zeta^2)$$

$$N_4 = \frac{1}{2}L_1(2L_1 - 1)(1 + \zeta) - \frac{1}{2}L_1(1 - \zeta^2); N_5 = \frac{1}{2}L_2(2L_2 - 1)(1 + \zeta) - \frac{1}{2}L_2(1 - \zeta^2);$$

$$N_6 = \frac{1}{2}L_3(2L_3 - 1)(1 + \zeta) - \frac{1}{2}L_3(1 - \zeta^2)$$

Промежуточные узлы (на сторонах “прямоугольников”)

$$N_7 = L_1(1 - \zeta^2); N_8 = L_2(1 - \zeta^2); N_9 = L_3(1 - \zeta^2)$$

Промежуточные узлы (на сторонах “треугольников”)

$$N_{10} = 2L_1L_2(1 - \zeta); N_{11} = 2L_2L_3(1 - \zeta); N_{12} = 2L_1L_3(1 - \zeta)$$

$$N_{13} = 2L_1L_2(1 + \zeta); N_{14} = 2L_2L_3(1 + \zeta); N_{15} = 2L_1L_3(1 + \zeta)$$

*Функции формы  $N_i$  для ИПКЭ12*

$$N_{2i-1} = N'_i \frac{1-\zeta}{2}, N_{2i} = N'_i \frac{1+\zeta}{2}, 1 \leq i \leq 6$$

В качестве базовых для **ИПКЭ16** и **ИПКЭ12** используются **ИПКЭ**, являющиеся аналогами соответствующих **СПКЭ** с тем отличием, что узлы расположены парно на “нижней” и “верхней” поверхностях (их число  $NPL = 2 \cdot NPL$ ), а число степеней свободы в каждом из них равно 3 ( $u_i, v_i, w_i$  по  $x, y, z$ ).

Матрицы формы  $[N]$  состоит из  $NPL$  подматриц  $[N] = [[N_I], \dots, [N_{NPL}]]$  каждая из которых имеет вид:

$$[N_i] = N_i \begin{bmatrix} \frac{1-\zeta}{2} & 0 & 0 & \frac{1+\zeta}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1-\zeta}{2} & 0 & 0 & \frac{1+\zeta}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\zeta}{2} & 0 & 0 & \frac{1+\zeta}{2} \end{bmatrix}$$

где:  $N_i = N_i^e(\xi, \eta)$  или  $N_i = N_i^e(L_1, L_2, L_3)$  – функции формы соответствующих элементов поверхности [26]

При учёте всех компонент напряжений и деформаций матрица  $[B']$  определяется также для локальной системы координат  $\mathbf{x}', \mathbf{y}', \mathbf{z}'$ , что при известном удорожании процедуры позволяет получать напряжения в более информативной, по сравнению с глобальной, системе координат. Матрица  $[D']$  имеет следующий вид [26].

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ & \text{симм.} & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}$$

Вектор температурных деформаций формируется в виде:

$$\{\varepsilon_\theta\} = [T][\alpha_1\theta, \alpha_2\theta, \alpha_3\theta, 0, 0, 0].$$

В отличие от СПКЭ у ИПКЭ нежелательно понижение квадратур по сравнению с обеспечивающими точное вычисление объемов для объемных интегралов и площадей для поверхностных интегралов [26].

### Учёт кинематических граничных условий

Учёт однородных (нулевых) и неоднородных кинематических граничных условий – заданных перемещений группы узлов – проводится путём обнуления внедиагональных коэффициентов соответствующих строк и столбцов матрицы  $[K]$  и видоизменения матрицы нагрузок  $[F] = [\{F\}_I \dots \{F\}_{NVF}]$ .

## Стационарная задача теплопроводности

Уравнение стационарной теплопроводности в матричной форме МКЭ имеет вид:

$$[K]\{\theta\} = \{Q\}, \quad (2)$$

где:  $[K]$  – матрица теплопроводности, аналог матрицы линейной жесткости

$$[K] = \sum_e \iiint_V [B']^T [K][B'] dV \quad (3)$$

$[B']$  – матрица, определяющая температурные градиенты в КЭ через узловые температуры  $\{\theta\}$ ,

$$[K] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix}$$

$k_x, k_y, k_z$  – коэффициенты теплопроводности по трем произвольным, взаимно ортогональным направлениям;

$\{Q\}$  – вектор подводимого к узлам тепла,

$$\{Q\} = \{Q\}_V + \{Q\}_S + \{Q\}_L$$

$$\{Q\}_V = \sum_e \{q\}_V^e = \sum_e \iiint_V [N]^T \{q\}_V dV \quad (4)$$

$$\{Q\}_S = \sum_e \{q\}_S^e = \sum_e \iint_S [N]^T \{q\}_S dS,$$

$\{Q\}_V$  – вектор подвода тепла, распределенного по объему,

$\{Q\}_S$  – то же, но по поверхности,

$\{Q\}_L$  – концентрированный подвод тепла в узловых точках.

Задачи теплопроводности решаются для систем, аппроксимируемых трехмерными изопараметрическими КЭ;

Учитываются все практически значимые граничные условия.

Граничные условия первого рода  $\theta = \theta_i$  моделируются по аналогии с заданными перемещениями в задачах статики

Условия второго рода:

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} = q_s$$

соответствует нагруженной поверхностями силами  $q_s$  границе в задачах статики ( $q_s = 0$  – свободная поверхность, условие непроницаемости).

Условия третьего рода (конвекция)

$$q_s = h(\theta_1 - \theta),$$

где:  $h$  – постоянная конвекции,  $\theta_1$  – температура (заданная) среды. Процедура сводится к добавлению матрицы аналога матрицы присоединенной жесткости:

$$[K] = \sum_e \iint_S [N]^T h [N] \quad (5)$$

к матрице теплопроводности  $[K]$ , а вектора

$$\{Q\} = \sum_e \iint_S h^e [N]^T dS \{\theta_1\}^e \quad (6)$$

– к вектору теплового потока. Здесь  $[N]$  – функция (вектор-строка) формы,  $\{\theta\}^e$  – вектор узловых значений температуры внешней среды.

### Решение СЛАУ

Решение системы линейных уравнений в программе выполняется следующими методами:

- 1) **Прямой (MUMPS)** – эффективный многофронтальный прямой решатель СЛАУ (**M**Ultifrontal **M**assively **P**arallel sparse direct **S**olver). Требователен по оперативной памяти, но время счёта значительно сокращается по сравнению с прямым профильным методом факторизации.
- 2) **Прямой (PARDISO)** – **рекомендуемый** прямой решатель СЛАУ (Parallel Direct Solver) из библиотеки Intel Math Kernel Library (Intel MKL).

Требователен по оперативной памяти, но время счёта значительно сокращается по сравнению с прямым профильным методом факторизации. Данный прямой метод, разработанный специально для архитектуры SMP (symmetric multiprocessing), можно охарактеризовать, как исключительно эффективный. К существенным достоинством метода следует отнести высокую производительность и масштабируемость.

- 3) **Метод сопряжённых градиентов** – итерационный метод из известного открытого математического пакета PETSc (Portable Extensible Toolkit for Scientific Computation – разработка Argonne National Laboratory/MCS division, США).

Для итерационного метода доступны следующие предобуславливатели:

- Последовательная верхняя релаксация (рекомендуется для объемных моделей с ИПКЭ).
- Неполная факторизация Холецкого (рекомендуется для оболочечных моделей с СПКЭ).

### Расчёт с учетом пластических деформаций

#### *Основные соотношения теории пластичности*

Для нелинейных материалов выражение для полных деформаций, следуя гипотезе аддитивности малых упругих и пластических деформаций, имеет вид:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{el}\} + \{\varepsilon_{pl}\}$$

где:

- $\{\varepsilon\}$  – вектор общих деформаций;
- $\{\varepsilon_{el}\}$  – вектор упругих деформаций;
- $\{\varepsilon_{pl}\}$  – вектор пластических деформаций;

В теории пластического течения постулируется и подтверждается экспериментально, что пластическое течение начинается, когда напряжения находятся на поверхности текучести:

$$F(\{\sigma\}, H) = 0 \quad (7)$$

Связь между малыми приращениями пластических деформаций и напряжений устанавливается в виде *ассоциированного закона течения*:

$$\{d\varepsilon_{pl}\} = d\lambda \cdot \nabla_{\sigma} F(\{\sigma\}, H) \quad (8)$$

где  $d\lambda$  – пластический мультипликатор,  $F$  – функция текучести



$$\nabla_{\sigma} F = \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma_1}, \frac{\partial F}{\partial \sigma_2}, \dots, \frac{\partial F}{\partial \sigma_6} \right\}^T - \text{градиент функции } F.$$

Другими словами, по ассоциированному закону течения приращения пластических деформаций перпендикулярны поверхности текучести.

Для описания поведения материала в области пластичности имеется несколько опций, показанных ниже.

- *Билинейное изотропное упрочнение* (Bilinear Isotropic Hardening, BISO) использует критерий пластичности фон Мизеса совместно с предположением об изотропном деформационном упрочнении.
- *Мультилинейное изотропное упрочнение* (Multilinear Isotropic Hardening, MISO) похоже на опцию билинейного изотропного упрочнения, за исключением того, что вместо билинейной кривой используется полилинейная кривая.

Рис. 117. Билинейная диаграмма деформирования

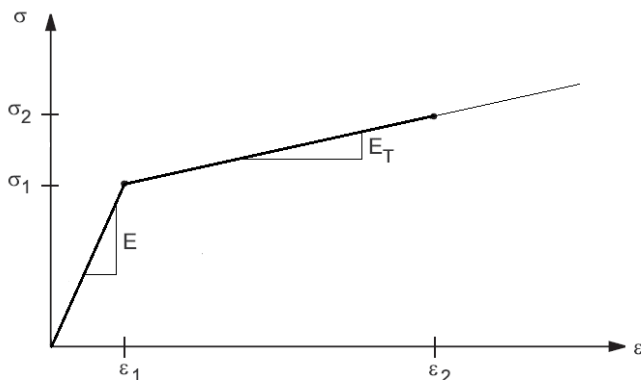
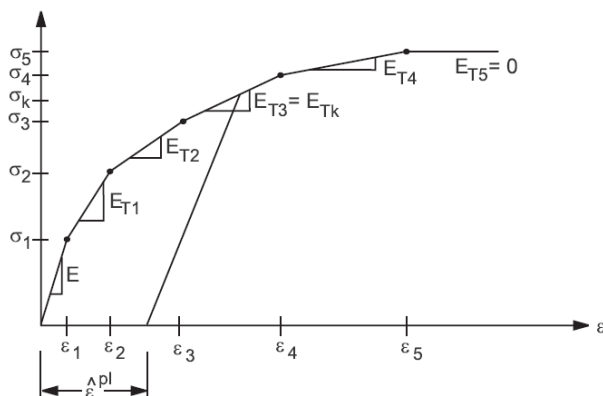


Рис. 118. Мультилинейная (реальная) диаграмма деформирования



Для условия текучести Мизеса и случая отсутствия упрочнения уравнение поверхности пластичности имеет вид:

$$F(\{\sigma\}) = \sigma_e - \sigma_T = 0$$

где  $\sigma_T$  - предел текучести материала,  $\sigma_e$  – эквивалентное напряжение.

Эквивалентные напряжения по Мизесу вычисляются по формуле:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 3\sigma_4^2 + 3\sigma_5^2 + 3\sigma_6^2}$$

Или в терминах девиаторов напряжений

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2}s_1^2 + \frac{3}{2}s_2^2 + \frac{3}{2}s_3^2 + 3s_4^2 + 3s_5^2 + 3s_6^2}$$

$$s_1 = \sigma_1 - \sigma_0, s_2 = \sigma_2 - \sigma_0, s_3 = \sigma_3 - \sigma_0, s_4 = \sigma_4, s_5 = \sigma_5, s_6 = \sigma_6$$

где  $\sigma_0$  - гидростатическое напряжение.  $\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$

Градиент поверхности пластичности для критерия Мизеса

$$\nabla_{\sigma} F = \left\{ \frac{3s_1}{2\sigma_e}, \frac{3s_2}{2\sigma_e}, \frac{3s_3}{2\sigma_e}, \frac{3s_4}{\sigma_e}, \frac{3s_5}{\sigma_e}, \frac{3s_6}{\sigma_e} \right\}^T$$

При изотропном упрочнении предполагается, что поверхность пластичности может равномерно по всем направлениям расширяться. Уравнение поверхности пластичности имеет вид

$$F(\{\sigma\}, H) = \sigma_e - \sigma_T - H = 0$$

где  $H$  – параметр изотропного упрочнения.

$$dH = d\lambda \cdot h_c$$

где параметр  $h_c$  связан с модулем упругости  $E$  и тангенциальным модулем упругости  $E_T$  материала соотношением:

$$h_c = \frac{EE_T}{E - E_T}$$

Для определения пластических деформаций при достигнутом уровне напряжений  $\{\sigma\}$  и упрочнении  $H$  относительно неизвестных  $\{d\sigma\}$ ,  $d\lambda$ ,  $dH$  решается нелинейная система уравнений

$$\begin{cases} \{d\sigma\} - [D]\{d\varepsilon\} + d\lambda[D]\nabla_{\sigma}F(\{\sigma\} + \{d\sigma\}, H + dH) = 0 \\ F(\{\sigma\} + \{d\sigma\}, H + dH) = 0 \\ dH = d\lambda \cdot h_c \end{cases} \quad (9)$$

где  $[D]$  – матрица упругих постоянных.

Решение данной системы осуществляется итерационно методом Ньютона. Якобиан имеет следующий вид:

$$J = \begin{bmatrix} [I] + d\lambda[D]\nabla_{\sigma\sigma}^2 F & [D]\nabla_{\sigma} F & 0 \\ (\nabla_{\sigma} F)^T & 0 & -1 \\ 0 & -h_c & 1 \end{bmatrix}$$

где  $\nabla_{\sigma\sigma}^2 F$  матрица вторых производных

$$\nabla_{\sigma\sigma}^2 F = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\nabla_{\sigma} F)_1}{\partial\sigma_1} & \dots & \frac{\partial(\nabla_{\sigma} F)_6}{\partial\sigma_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial(\nabla_{\sigma} F)_1}{\partial\sigma_6} & \dots & \frac{\partial(\nabla_{\sigma} F)_6}{\partial\sigma_6} \end{bmatrix}$$

Для критерия Мизеса:

$$\nabla_{\sigma\sigma}^2 F = \begin{bmatrix} [B_{11}] & [B_{12}] \\ [B_{21}] & [B_{22}] \end{bmatrix}$$

где

$$\begin{aligned} [B_{11}]: b_{ij} &= \begin{cases} \frac{-1/2 - (\nabla_{\sigma} F)_i (\nabla_{\sigma} F)_j}{\sigma_e}; i = 1,3; j = 1,3; i \neq j \\ \frac{1 - (\nabla_{\sigma} F)_i^2}{\sigma_e}; i = 1,3; j = 1,3; i = j \end{cases} \\ [B_{12}]: b_{ij} &= \frac{-(\nabla_{\sigma} F)_i (\nabla_{\sigma} F)_j}{\sigma_e}; i = 1,3; j = 4,6; \\ [B_{21}]: b_{ij} &= \frac{-(\nabla_{\sigma} F)_i (\nabla_{\sigma} F)_j}{\sigma_e}; i = 4,6; j = 1,3; \\ [B_{22}]: b_{ij} &= \begin{cases} \frac{-(\nabla_{\sigma} F)_i (\nabla_{\sigma} F)_j}{\sigma_e}; i = 4,6; j = 4,6; i \neq j \\ \frac{3 - (\nabla_{\sigma} F)_i^2}{\sigma_e}; i = 4,6; j = 4,6; i = j \end{cases} \end{aligned}$$

### **Упругопластическая матрица для изотропного упрочнения**

Продифференцируем условие пластичности (7)

$$dF = (\nabla_{\sigma} F)^T \{d\sigma\} + \frac{\partial F}{\partial H} dH = 0$$

С учётом третьего уравнения из (9)

$$dF = \{\nabla_{\sigma} F\}^T \{d\sigma\} - h_c \cdot d\lambda = 0 \quad (10)$$

Домножим первое уравнение системы уравнений (9) на  $(\nabla_{\sigma} F)^T$  и с учётом (10) получим

$$d\lambda \cdot h_c - (\nabla_{\sigma} F)^T [D] \{d\varepsilon\} + d\lambda \cdot (\nabla_{\sigma} F)^T [D] \nabla_{\sigma} F = 0$$

Отсюда

$$d\lambda = \frac{(\nabla_{\sigma} F)^T [D] \{d\varepsilon\}}{(\nabla_{\sigma} F)^T [D] \nabla_{\sigma} F + h_c}$$

Подставляем в выражение для  $\{d\sigma\}$

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\varepsilon\} - \frac{(\nabla_{\sigma} F)^T [D] \{d\varepsilon\} \nabla_{\sigma} F}{(\nabla_{\sigma} F)^T [D] \nabla_{\sigma} F + h_c}$$

или

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\varepsilon\} - \frac{\nabla_{\sigma} F (\nabla_{\sigma} F)^T [D] \{d\varepsilon\}}{(\nabla_{\sigma} F)^T [D] \nabla_{\sigma} F + h_c}$$

введём обозначение

$$[D_{ep}] = [D] - \frac{\nabla_{\sigma} F (\nabla_{\sigma} F)^T [D]}{(\nabla_{\sigma} F)^T [D] \nabla_{\sigma} F + h_c} \quad (11)$$

То есть в пластической области приращения напряжений будут связаны с приращениями деформаций по формуле

$$\{d\sigma\} = [D_{ep}]\{d\varepsilon\} \quad (12)$$

Матрица касательной жёсткости элемента определяется как

$$[k_T] = \iiint_V [B]^T [D_{ep}] [B] dV$$

Матрица касательной жёсткости системы

$$[K_T] = \sum_{e=1}^L [k_T]_e$$

Соотношение (12) верно для малых приращений деформаций, отсюда вытекает способ решения нелинейной задачи статики – пошаговое нагружение и решение системы на каждом шаге нагружения.

### **Метод Ньютона для решения системы нелинейных уравнений (в точке интегрирования КЭ)**

Для решения нелинейной системы (9) в каждой точке интегрирования с пластическими деформациями используется метод Ньютона.

Пусть дана система нелинейных уравнений

$$f(\{x\}) = 0 \quad (13)$$

где  $f$  – нелинейная вектор-функция размерности  $n$

Для решения системы **Ошибка! Источник ссылки не найден.** используется следующий итерационный процесс

$$\begin{aligned} \{x\}_{i+1} &= \{x\}_i + \{dx\}_n \\ [J]_i \cdot \{dx\}_i &= -f(\{x\}_i) \end{aligned}$$

где  $[J]$  – якобиан функции  $f$ .

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

### **Метод Ньютона-Рафсона решения системы нелинейных уравнений**

Метод Ньютона-Рафсона для решения системы нелинейных уравнений заключается в следующем:

$$[K_T]_i \{\Delta u\}_i = \{F\} - \{F^{nr}\}_i \quad (14)$$

$$\{u\}_{i+1} = \{u\}_i + \{\Delta u\}_i \quad (15)$$

где:

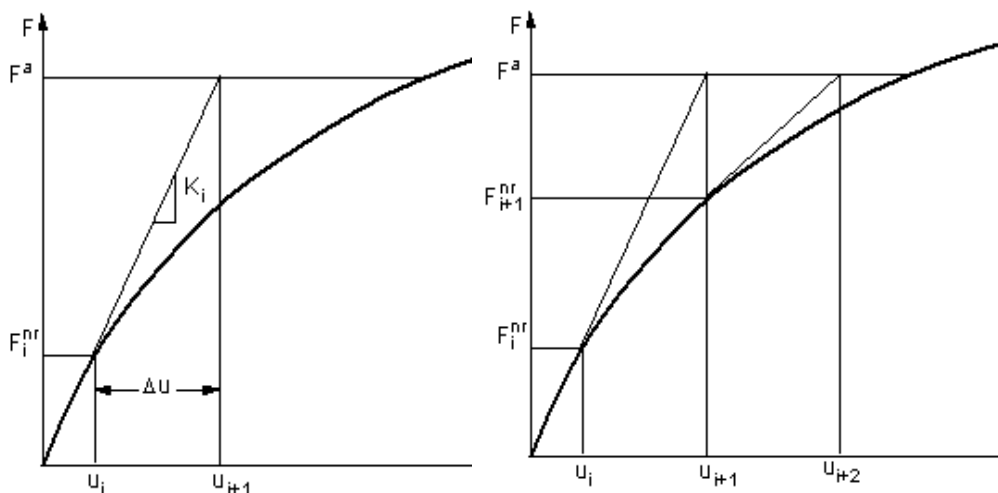
$[K_T]_i$  – матрица касательной жёсткости

$i$  – номер текущей итерации;

$\{F\}$ — вектор внешних сил,  
 $\{F^{nr}\}_i$ — вектор внутренних сил.

Рис. 119 иллюстрируют определение значений матрицы  $[K_T]_i$  и вектора  $\{F^{nr}\}_i$ .

Рис. 119 Геометрическая интерпретация итерационного метода Ньютона-Рафсона



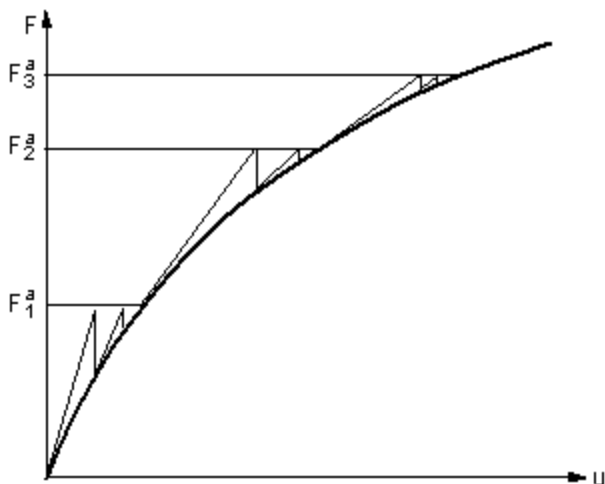
Для задач с учётом пластичности материала нагрузка  $\{F\}$  задаётся пошагово (Рис. 120):

$$[K_T]_{n,i} \{\Delta u\}_i = \{F\}_n - \{F^{nr}\}_{n,i} \quad (16)$$

где:

$[K_T]_{n,i}$ —матрица касательной жёсткости для  $n$ -го шага по времени и  $i$ -ой итерации;  
 $\{F\}_n$ — полный вектор приложенной нагрузки на  $n$ -ом шаге по времени;  
 $\{F^{nr}\}_{n,i}$ — вектор внутренних сил на  $n$ -ом шаге по времени и  $i$ -ой итерации.

Рис. 120 Геометрическая интерпретация шагово-итерационного (инкрементного) метода Ньютона-Рафсона



Если матрица жесткости обновляется на каждой итерации, то речь идет о полном методе Ньютона-Рафсона. В случае, когда матрица жёсткости строится только в начале каждой итерации по времени метод называется модифицированным методом Ньютона-Рафсона.

Сходимость достигается при условии:

$$\|\{R\}\| < \varepsilon_R R_{ref} \quad (17)$$

$$\|\{\Delta u_i\}\| < \varepsilon_u u_{ref} \quad (18)$$

где:  $\{R\} = \{F\} - \{F^{nr}\}$ .

### Расчёт НДС с учётом автофретирования

1. Проводится расчёт с учётом пластических деформаций.
2. Полученные пластические деформации используются в качестве начальных деформаций для последующего линейно-упругого расчёта.



### ***Определение предельной пластической нагрузки по критериям статической прочности***

Для деталей трубопроводов, таких как трубы, отводы и тройники, а также сосудов давления в литературе вводится понятие «пластической предельной нагрузки» (plastic load) [63-68]. Это нагрузка, при которой в детали возникают интенсивные пластические деформации (gross plastic deformation), охватывающие всю толщину стенки. Данное определение было предложено в статье Gerdeen J.C. 1979 г. [63].

Важно понимать, что предельная пластическая нагрузка, определенная таким образом, не является действительной предельной нагрузкой на конструкцию (т.е. наибольшей нагрузкой, при которой удовлетворяются условия равновесия для внешних и внутренних сил и происходит разрушение детали при испытаниях) [64] и на практике может быть существенно ниже. Применение подхода оценки прочности по предельной пластической нагрузке позволяет несколько повысить несущую способность детали при допущении работы материала в области умеренных пластических деформаций, характеризующихся малыми скоростями.

Для определения предельной пластической нагрузки по данным натурного или численного эксперимента для детали строится кривая, отражающая зависимость между нагрузкой (параметром нагрузки при сложном нагружении) и характерным параметром деформации (например, максимальная пластическая деформация). Предельная нагрузка определяется геометрическим способом исходя из вида построенной кривой.

Основные способы определения предельной пластической нагрузки, описанные в литературе:

- метод двойного упругого наклона (twice elastic slope (TES) criterion);
- метод пересечения касательных (tangent-intersection (TI) criterion);
- критерий пластической работы (plastic work (PW) criterion);
- критерий максимума скорости изменения относительной пластической работы.

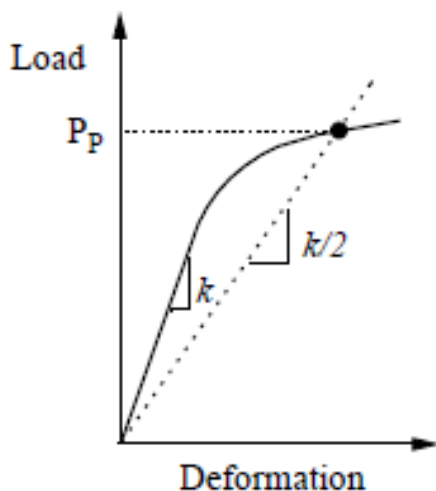
В текущей версии АСТРА-СТАДИО реализованы два критерия:

- метод двойного упругого наклона, который наиболее распространен и рекомендован рядом западных нормативных документов таких, как ASME [65] и EN [66];
- критерий максимума скорости изменения относительной пластической работы.

*Метод двойного упругого наклона (twice elastic slope)*

Строится график зависимости параметра нагрузки от параметра деформации (например, максимальная главная деформация в детали). Определяется наклон касательной к графику в начале (в упругой части). Строится так называемая предельная линия (collapse limit line) под углом вдвое большим угла упругой касательной. Предельная пластическая нагрузка определяется пересечением предельной линии и кривой нагрузка-деформация (Рис. 121). В качестве деформационного параметра для построения графика обычно выбирают линейную деформацию (эквивалентную, наибольшую главную или компоненту деформации) или характерное перемещение какой-нибудь точки детали.

Рис. 121. Критерий двойного упругого наклона



*Критерий максимума скорости изменения относительной пластической работы*

Предложен в работах Скопинского В.Н. и др. [65,66]. Методика кратко описана ниже.

Работа пластических деформаций определяется как

$$W_p = \sum_{N_{ep}} \int_{V_e} \bar{W}_p dV,$$

где удельная работа пластических деформаций

$$\bar{W}_p = \int \sigma_i d\varepsilon_{pi}$$

$\sigma_i$  – интенсивность напряжений,  $\varepsilon_{pi}$  – интенсивность пластических деформаций,  $N_{ep}$  – количество элементов в пластической области,  $V_e$  – объем конечного элемента,  $V$  – полный объем детали. Аналогично определяется полная работа  $W$ .

Вводится отношение пластической работы к полной – относительная пластическая работа

$$C_p = \frac{W_p}{W}$$

Предельная пластическая нагрузка  $q_{lim}$  определяется как нагрузка, соответствующая максимуму скорости возрастания относительной пластической работы:

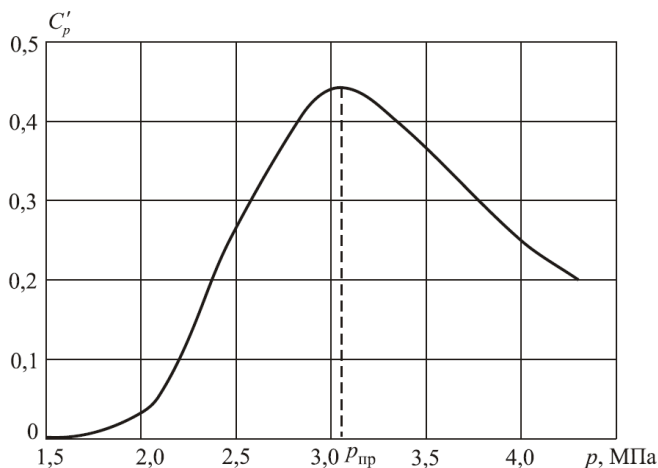
$$q_{lim} = argmax_q \frac{dC_p}{dq}$$

где  $q$  – параметр нагрузки.

На Рис. 122 показан пример зависимости скорости изменения относительной пластической работы от внутреннего давления, построенный для тонкостенного тройника [65].

Основное преимущество подхода в том, что он не содержит проблем, связанных с неоднозначностью выбора деформационного параметра или точек для построения касательных, которые характерны для других применяемых на практике методов (критерии двойного упругого наклона, пересечения касательных и пластической работы).

*Рис. 122 Критерий максимума скорости изменения относительной пластической работы*



## Литература

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002–86. М., Энергоатомиздат, 1989 г.
2. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. РД 10-249–98 (с Изменениями №1 РДИ 10-413(249)–01 от 13.07.2001). М., 2001 г.
3. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов. РТМ 38.001–94. М., 1995 г.
4. Нормы расчета на прочность трубопроводов тепловых сетей. РД 10-400–01. М., 2001 г.
5. Магистральные трубопроводы. СНиП 2.05.06–85. М., 1985 г.
6. Расчет трубопроводных систем атомных электростанций на прочность. РТМ 108.020.01–75. М., 1975 г.
7. ASME Boiler & Pressure Vessel Code. Section III. NB–3630.
8. Выбор упругих опор для трубопроводов тепловых и атомных электростанций. РТМ 24.038.12–72. М., 1972 г.
9. Руководство по расчету и конструированию тройников технологических трубопроводов. М., Гидропроект, 1984 г.
10. Руководство по обоснованию прочности трубопроводов АЭС (3 редакция). М., АЭП, НИЦ СтаДиО, 1991 г.

11. Пружины винтовые цилиндрические для подвесок трубопроводов ТЭС и АЭС. Конструкция, размеры и технические требования. ОСТ 108.764.01–80, НПО ЦКТИ, 1981 г.

12. Детали и сборочные единицы из сталей аустенитного класса для трубопроводов АЭС ДН=14-325мм. Типы, конструкция и размеры. ОСТ 24.125.01–89 - ОСТ 24.125.26–89. М., 1991 г.

13. Детали и сборочные единицы из сталей перлитного класса для трубопроводов АЭС ДН=16-720мм. Типы, конструкция и размеры. ОСТ 24.125.30–89 - ОСТ 24.125.57–89. М., 1991 г.

14. Подвески трубопроводов ТЭС и АЭС. Пружины винтовые цилиндрические. Конструкция и размеры. ОСТ 24.125.109–01, НПО ЦКТИ, 2001 г.

15. Комплекс программ СТАДИО (версии 6.10/99/2001/2003/2005/2007/2009/2011). Решение методами конечных элементов и суперэлементов линейных и нелинейных задач теории поля, статики, устойчивости, динамики, механики разрушения и оптимизации пространственных комбинированных систем. Общее описание, верификационный отчет, инструкции пользователя. М., НИЦ СтаДиО. 1993–2011 гг.

16. “Семейство” программных комплексов АСТРА-2001 (Windows-версия). Подуточненного расчета напряженного состояния и прочности типовых трубопроводов при действии полной системы квазистационарных нагрузок. АСТРА-СТАДИО. М., НИЦ СтаДиО, 2001 г.

17. “Семейство” программных комплексов АСТРА-НОВА’2011(Windows-версия). Автоматизированное проектирование и расчеты трубопроводных систем на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с российскими нормативными требованиями. Общее описание. М., НИЦ СтаДиО, 1999–2011 гг.

18. Комплекс программ АСТРА-АЭС. Версия АСТРА-АЭС 6.1. Верификационный отчет. М., НИЦ СтаДиО, 1992–1995 гг.

19. Комплекс программ АСТРА-АЭС. Версия АСТРА-АЭС'2009. Верификационный отчет (4 тома). М., НИЦ СтаДиО, 2009–2011 гг.

20. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей. Под ред. А.А.Николаева. М., 1965 г.

21. Зверьков Б.В., Костовецкий Д.Л. и др. Расчет и конструирование трубопроводов. Справочное пособие. Ленинград. Машиностроение. 1979 г.

22. Айнбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. М., Недра, 1982 г.

23. Самарин А.А. Вибрации трубопроводов энергетических трубопроводов и методы их устранения. М., Энергия, 1979 г.

24. Магалиф В.Я., Шапиро Е.Е. Программа расчета прочности и жесткости трубопроводов (СТАРТ). Межотраслевой фонд алгоритмов и программ автоматизированных систем в строительстве. М., ЦНИИПРОЕКТ, 1986 г., вып. 1-225-1.

25. Compaq Visual Fortran Version 6.6 Copyright © 1997–2005, Compaq Equipment Corporation.

26. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. Мир, 1975, 539 с.

27. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М., Стройиздат, 1982 г.

28. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. М., Мир, 1976, 464 с.

29. Парлетт Б. Симметричная проблема собственных значений. Численные методы. М., Мир, 1983 г.

30. Белостоцкий А.М. Модификация и применение численных методов к расчетам плитно-оболочечных систем на сейсмические воздействия. В кн. “Динамические характеристики и колебания элементов энергетического оборудования”. М., Наука, 1980 г., стр. 41–58.

31. Белостоцкий А.М. Упругий расчет сварных и штампованных тройников на произвольные статические нагрузки. – Сб. научных трудов ВНИПИнефть: “Автоматизированное проектирование трубопроводных систем нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств”, ЦНИИТЭнефтехим, М, 1982 г., с. 121–131.

32. Белостоцкий А.М., Малявин В.П., Дикарев А.И. и др. Экспериментальные и численные исследования напряженного состояния тройниковых соединений при действии моментных нагрузок. - Сб.трудов МИСИ им.В.В.Куйбышева, 1982 г., № 188, с. 35–49.

33. Белостоцкий А.М., Головин В.В., Фрадкин Б.В. Исследование напряженного состояния и разработка инженерной методики расчета на прочность тройниковых соединений при действии полной системы квазистатических нагрузок. – “Вопросы атомной науки и техники”. Серия: Физика и техника ядерных реакторов, 1985 г., вып. 6, с. 76–83.

34. Белостоцкий А.М., Головин В.В., Фрадкин Б.В. Методика расчета напряженного состояния тройниковых соединений труб при комплексном нагружении.- Сб. научных трудов Гидропроекта, 1985, вып.100, с.83–93.

35. Белостоцкий А.М., Вашуров Е.А., Воронова Г.А., Якубович Н.И. Автоматизированный расчет на прочность трубопроводных систем с учетом динамических воздействий. – “Вопросы атомной науки и техники”. Серия: Физика и техника ядерных реакторов, 1985 г., вып. 6, с. 33–38.

36. Белостоцкий А.М., Кириллов А.П., Прудовский А.М. и др. Изучение вибрации трубопроводов сброса пара на АЭС и оценки их долговечности. Тяжелое машиностроение, М., 1990 г., № 10, с. 28–31.

37. Белостоцкий А.М. Пространственное напряженное состояние ортогональных тройниковых соединений различных типов при комплексном нагружении, Материалы семинара кафедры сопротивления материалов Российского университета дружбы народов. Исследование пространственных систем. М., 1996 г., с. 55–60.

38. Белостоцкий А.М. Численное моделирование комплексного напряженно-деформированного состояния конструкций и сооружений

энергетических объектов”. Гидротехническое строительство”, 1999 г., № 8, с. 45–54.

39. Белостоцкий А.М., Белый М.В., Пичугин Д.В. Численное исследование алгоритма расчета упругих систем при учете контактного трения. – Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. Сб. научных трудов МГСУ, М, 1999 г., с. 68–78.

40. Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л. “Семейство” программ АСТРА-НОВА для автоматизированных нормативно регламентированных расчетов на прочность трубопроводных систем атомных и тепловых установок и нефтехимических производств. Труды XVIII Международной конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов”. BEM&FEM-2000, С-Петербург, 2000 г., с. 72–76.

41. Белостоцкий А.М., Белый М.В. Суперэлементные алгоритмы решения пространственных нелинейных статических и динамических задач большой размерности. Реализация в программном комплексе СТАДИО и опыт расчетных исследований. Труды XVIII Международной конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов”. BEM&FEM-2000, С-Петербург, 2000 г., с. 65–69.

42. Белостоцкий А.М., Белый М.В., Рассказов Л.Н., Желанкин В.Г. Численное моделирование пространственного напряженно-деформированного состояния систем “сооружение-основание” с учетом нелинейных реологических свойств грунтов. – Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. Сб. научных трудов МГСУ, М, 2001 г., с. 22–29.

43. Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л. “Семейство” программ АСТРА-НОВА для автоматизированных нормативных расчетов на прочность трубопроводных систем различного назначения. САПР и Графика, 2002 г., № 8, с. 12–16.

44. Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л. АСТРА-НОВА’2003: Автоматизированные расчеты на прочность трубопроводных систем различного назначения. САПР и Графика, 2003 г., № 4, с. 8–12.

45. Белостоцкий А.М., Пеньковой С.Б. Конечноэлементное моделирование НДС ёмкостного оборудования АЭС. Сб. научн. трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2005 г., с. 71–83.

46. Потапенко А.Л. Визуализация расчетных моделей и результатов расчетов в пре- и постпроцессорных модулях программных комплексов. Сб. научн. трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2005 г., с. 397–408.

47. Потапенко А.Л. Интеграция расчетных комплексов с САПР и другими программными комплексами. Сб. научн. трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2005 г., с. 408–420.

48. Белостоцкий А.М., Воронова Г.А., Потапенко А.Л., Клепец О.Ю. Современные численные методы и САПР-технологии в прочностных расчётах

трубопроводных систем. Программный комплекс АСТРА-НОВА’2005. Труды XXI Международной конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов”. BEM&FEM-2005 г., С-Петербург, 2006 г., с. 65–69.

49. Белостоцкий А.М., Пеньковой С.Б. Численное моделирование напряженного состояния и оценка прочности тройниковых соединений трубопроводов АЭУ. Сб. научн. трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2006 г., с. 285–292.

50. Белостоцкий А.М. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и нормативная оценка прочности трубопроводных систем: достижения, проблемы и перспективы. “Машиностроение и инженерное образование”, 2006 г., № 9, с. 111–119.

51. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Потапенко А.Л. Методы динамического синтеза подконструкций в задачах моделирования сложных инженерных систем. “Строительная механика и расчет сооружений”, 2006 г., № 6, с. 45–51.

52. Белостоцкий А.М., Потапенко А.Л., Клепец О.Ю. Реализация и верификация алгоритма Крейга-Бемптона в программных комплексах СТАДИО и АСТРА-НОВА. Труды XXII Международной конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов”. BEM&FEM-2007 г., С-Петербург, 2007 г., с. 65–69.

53. Белостоцкий А.М., Потапенко А.Л. Программно-алгоритмическая разработка и верификация подсистемы уточненного конечноэлементного моделирования деталей трубопроводов (АСТРА-СТАДИО). Сб. научн. трудов МГСУ “Вопросы прикладной математики и вычислительной механики”, М., 2008 г., № 11, с. 185–192

54. CEN TC 107 (Draft Standart 12/96): Design, Calculation & Installation for Pre-insulated Bonded Pipes for District Heating.

55. Стальные трубопроводы с заводской теплоизоляции. Руководство НПО “Стройполимер” по проектированию и монтажу. М., 2002 г.

56. Бородавкин П.П., Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство), М., Недра, 1982 г.

57. Стальные трубопроводы с заводской теплогидроизоляцией. М., НПО “Стройполимер”, 2002 г.

58. Гайан Р. Приведение матриц жесткости и массы.- Ракетная техника и космонавтика, 1965 г., т.3, № 2, с. 277–278.

59. Craig R.R., Jr., Bampton M.C.C. Coupling of substructures for dynamic analysis - AIAA Journal, 1968, vol. 6, No. 7, p. 1313–1319.

60. Benfield W.A., Hruda R.F. Vibration analysis of structures by component mode substitution. - AIAA Journal J., 1976, vol. 9, p. 1255–1261.

61. MacNeal R.H. A hybrid method of component mode synthesis. - Computers and structures, 1971, vol. 4, p. 591–601.

62. Hurty W.C. Dynamic analysis of structural systems using component modes. – AIAA Journal., 1984, vol. 4, p. 733–738.



63. 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.

64. Li H., Mackenzie D. Characterising gross plastic deformation in design by analysis. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 82, 2005.

65. Вожова Н.В. Определение предельного давления в пересекающихся цилиндрических оболочках на основе упругопластического анализа. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. МГИИ – 2011 г.

66. 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.

67. Save M. Experimental verification of plastic limit analysis of torispherical and toriconical heads // Pressure vessel piping: design and analysis, Vol. 1. New York: ASME; 1972. P. 382–416.

68. Muscat M., Mackenzie D., Hamilton R. A work criterion for plastic collapse // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2003. Vol. 80. No. 1. P. 49–58.

69. ASME. Boiler and pressure vessel code section VIII. New York: American Society for Mechanical Engineers; 2004.

70. EN 13445. Unfired pressure vessels—Part 3: design. European Committee for Standardisation (CEN); 2002.

71. Трубопроводы судовые. Методика расчетов на статическую малоцикловую прочность. РД5Р.4322-86, М., 1986 г.

72. Фланцевые соединения судовых трубопроводов и систем. Методика и нормы расчёта на прочность и плотность. РД5Р.5137-73, М., 1973 г.

73. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{(раб)} < 2,2$  МПа (22кгс/кв. см),  $t \leq 300$  °С. Тройники сварные равнопроходные. ОСТ 34-10-510-90 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г.

74. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{(раб)} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв. см),  $t \leq 300$  °С. Тройники сварные переходные. ОСТ 34-10-511-90 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г.

75. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{(раб)} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв. см),  $t \leq 300$  °С. Тройники сварные равнопроходные с накладкой. ОСТ 34-10-512-90 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г.

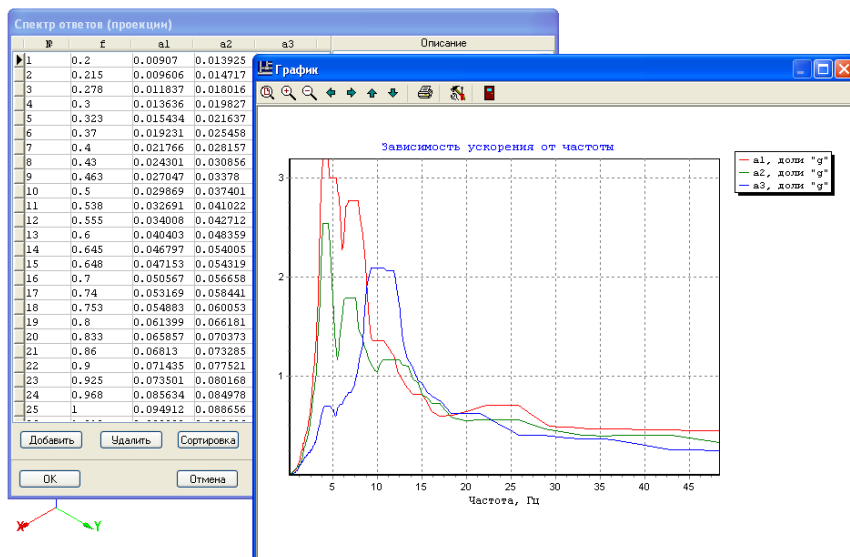
76. Детали и сборочные единицы трубопроводов АС  $P_{(раб)} < 2,2$  МПа (22 кгс/кв. см),  $t \leq 300$  °С. Тройники сварные переходные с накладкой. ОСТ 34-10-513-90 (с Изменениями N 1, 2). М., 1990 г

## Пример использования АСТРА-СТАДИО в составе АСТРА-НОВА

На Рис. 123 – Рис. 130 показаны фрагменты уточненного расчета напряженного состояния и сейсмоч прочности тяжело нагруженного неравнопроходного ортогонального сварного тройникового соединения реальной трубопроводной системы АЭУ (Нормы ПНАЭ Г-7-002-86).

Незначительное снижение максимальных напряжений группы  $(\sigma_s)_2$  (с 377,05 МПа до 352,76 МПа), зафиксированное в уточненном расчете по АСТРА-СТАДИО (по сравнению с результатом АСТРА-СЕЙСМ), носит “индивидуальный характер” и, конечно же, не позволяет распространить этот вывод на другие случаи.

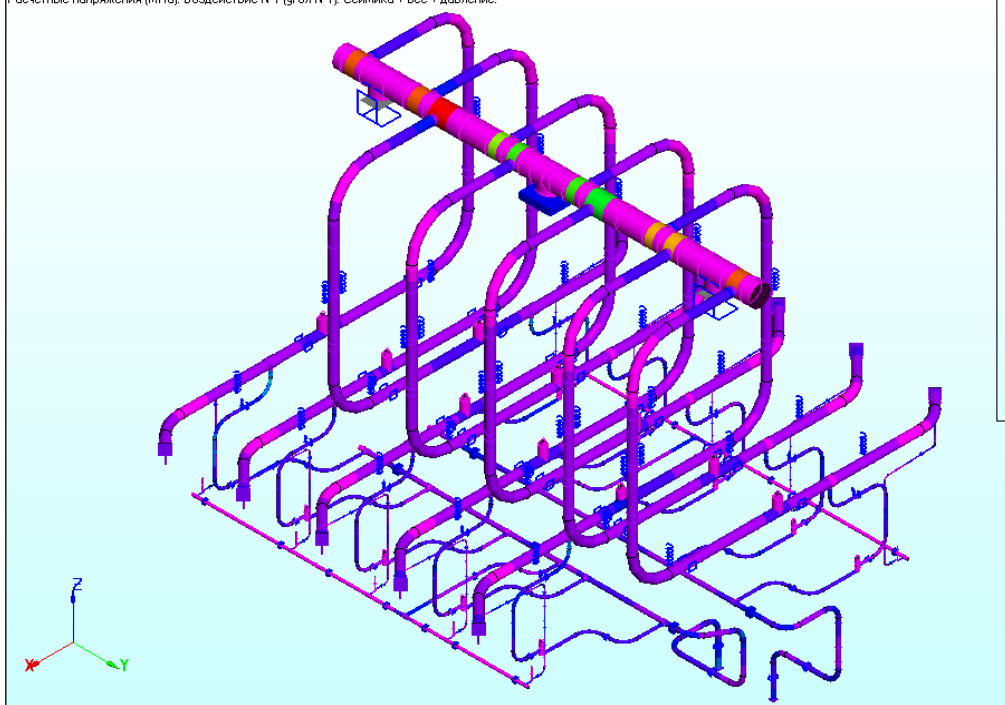
Рис. 123 АСТРА-СЕЙСМ. Расчетный трехкомпонентный спектр ответа



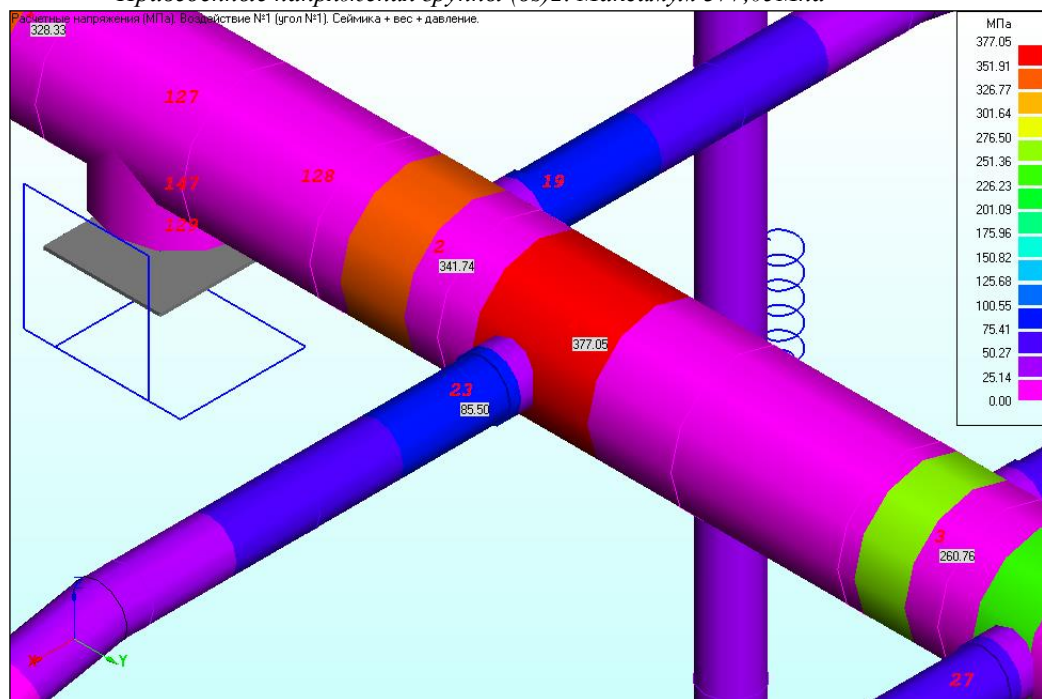
*Рис. 124 АСТРА-СЕЙСМ. Модель трубопроводной системы.  
Статика±Сейсмика.*

*Приведенные напряжения группы  $(\sigma_s)_2$ . Максимум 377,05Мпа*

Расчетные напряжения (МПа). Воздействие НР1 (угол НР1). Сейсмика + вес + давление.

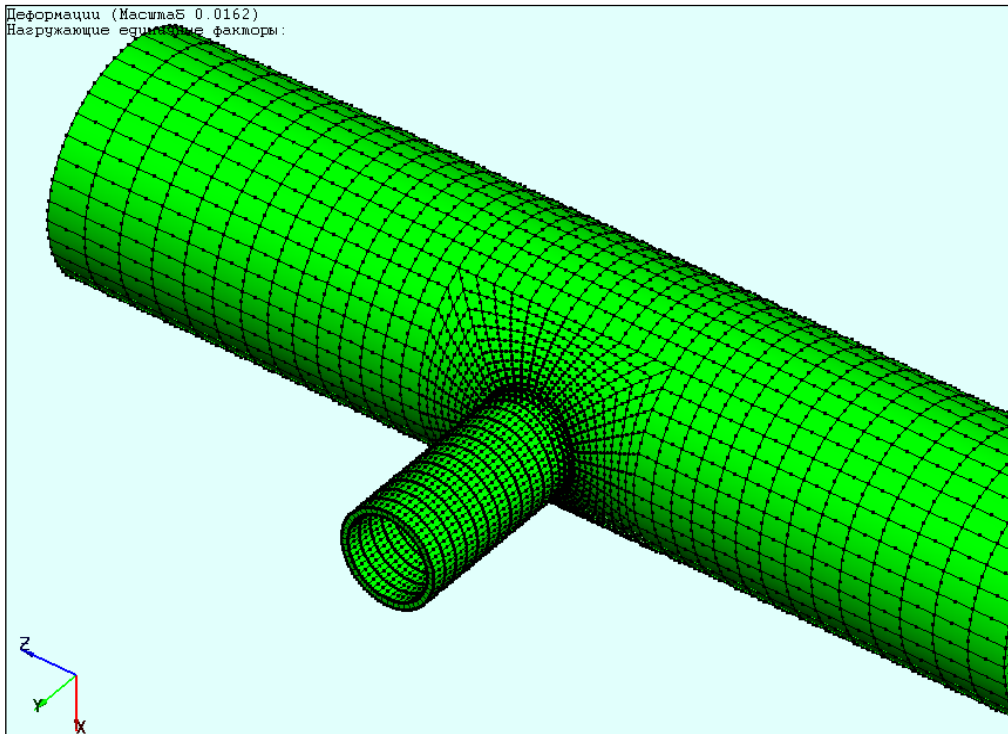


*Рис. 125 АСТРА-СЕЙСМ. Зона тройника №3. Статика±Сейсмика.  
Приведенные напряжения группы (σs)2. Максимум 377,05Мпа*



*Рис. 126 АСТРА-СТАДИО. Оболочечная КЭ-модель тройника. Общий вид*

Деформации (Масштаб 0.0162)  
Нагружающие единичные факторы:



*Рис. 127 АСТРА-СТАДИО. Оболочечная КЭ-модель тройника. Зона пересечения оболочек*

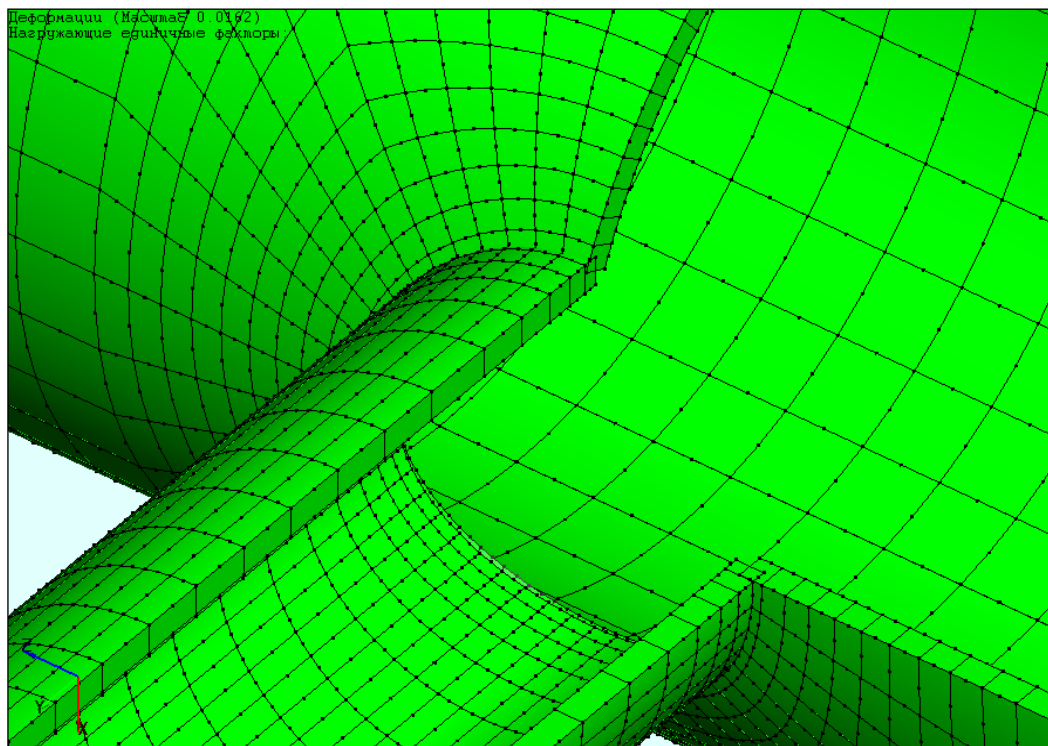


Рис. 128 АСТРА-СТАДИО. Оболочечная КЭ-модель тройника №3. Сейсмика. Приведенные напряжения группы ( $\sigma$ )2. Максимум 348,81МПа (387,13МПа)

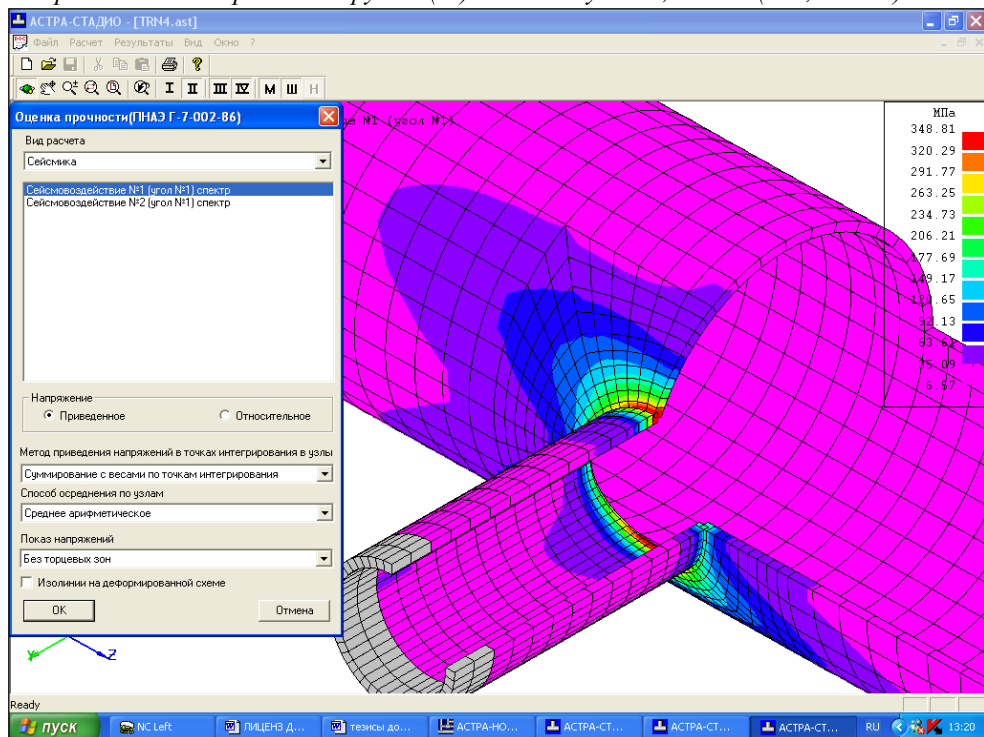


Рис. 129 АСТРА-СТАДИО. Оболочечная КЭ-модель тройника №3.  
Статика+Сейсмика. Приведенные напряжения группы  $(\sigma_s)_2$ .  
Максимум 352,76МПа (377,05МПа – по АСТРА-СЕЙСМ)

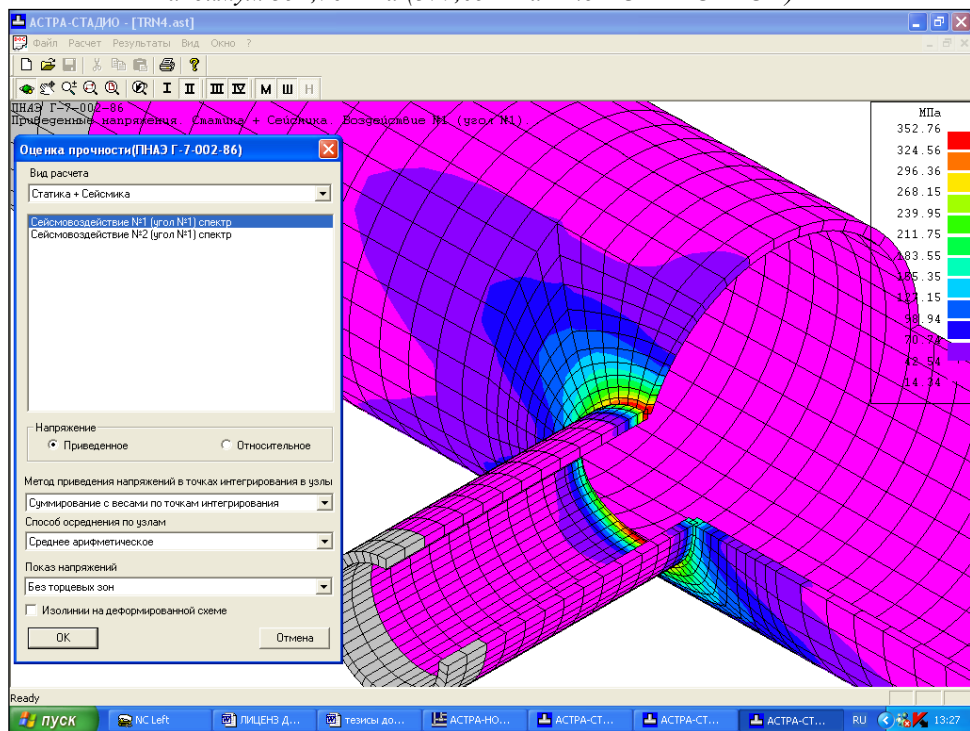




Рис. 130 АСТРА-СТАДИО. Оболочечная КЭ-модель тройника №3. Статика-Сейсмика. Приведенные напряжения группы ( $\sigma$ )<sub>2</sub>. Максимум 351,55МПа (377,05МПа – по АСТРА-СЕЙСМ)

