



**Нормативная оценка прочности деталей
трубопроводов с существенно неоднородным НДС
(на примере тройниковых соединений).**

Как преодолеть ограничения и дать реальную оценку?

А.М. Белостоцкий, А.Л. Потапенко, А.А. Аул, К.И. Островский,...

ЗАО НИЦ СтаДиО, Москва



АСТРА-НОВА 2017

НИЦ СТАДИО

АЭС ПНЭ Г-7-002-86	ТЭС РА10-249-98		
НЕФТЕХИМ РТМ 38.001-94 ГОСТ 32388-2013	ТЕПЛОСЕТЬ РА10-400-01 ГОСТ Р 55596-2013	МАГИСТР СНИП 2.05.06-85 СП 34.13330.2012 ГОСТ Р 55289-2014 ГОСТ Р 55290-2014	СВД РАРТМ 26-01-44-78 ГОСТ Р 55600-2013

WWW.STADYO.RU

НИЦ СТАДИО

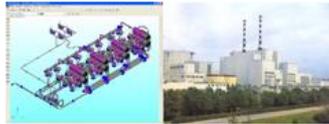
АСТРА-СТАДИО 2017

WWW.STADYO.RU

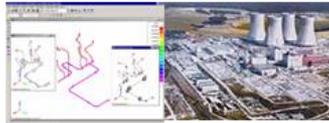


Комплекс программ **АСТРА-НОВА'2017™** для автоматизированных расчетов трубопроводных систем и деталей по выбору основных размеров, на статическую и циклическую прочность, на сейсмические воздействия, вибропрочность и неустановившиеся динамические процессы в соответствии с российскими нормативными требованиями.

Скачать актуальный релиз.



АСТРА-АЭС™ (аттестационный паспорт Ростехнадзора № 292 от 14.04.2011, рег. № 614 от 16.09.2009) – ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.



АСТРА-ТЭС™ (сертификат соответствия № RA.RU.АБ86.Н01034 от 13.07.2017) – РД 10-249-98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды



АСТРА-НЕФТЕХИМ™ (сертификат соответствия № RA.RU.АБ86.Н01034 от 13.07.2017) – РТМ 38.001-94. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов. ГОСТ 32388-2013 Трубопроводы

http://www.stadyo.ru/programs/astra-nova/istoki-i-... | Информационная система "..." | Яндекс.Карты — подробная к... | Истоки и история развития | Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д.18, офис 810 | Поиск по сайту

+7 (499) 706-88-10 | stadyo@stadyo.ru | 125040, Москва, ул. 3-я Ямского Поля, д.18, офис 810

комплексы | Наука и образование | Загрузки | Контакты

Главная | О компании | Программные комплексы | Наука и образование | Загрузки | Контакты

Программные комплексы. Общее описание

Программный комплекс СТАДИО

Программный комплекс АСТРА-НОВА

- Истоки и история развития
- Актуальный релиз АСТРА-НОВА
- Верификация, аттестация, сертификация
- Нормы и публикации
- Перспективы - современный взгляд
- Пользователи

Истоки и история развития

Главная > Программные комплексы > Программный комплекс АСТРА-НОВА > Истоки и история развития

Усаживайтесь удобнее, вас ожидает увлекательная, почти невероятная история происхождения и развития программного комплекса **АСТРА-НОВА**. Мы напишем ее не сразу, урывками и по частично уже стершимся воспоминаниям. И, быть может, кто-то из вас напомнит нам повороты судьбы и важные детали этой истории — будем благодарны.

Глава 1. Начало. «Когда б вы знали, из какого сора растут стихи, не ведая стыда...»

Вспышка памяти, «картина маслом» — 1976 год, высотка «Гидропроекта» им. С.Я. Жука на Соколе, кабинет главного инженера, длинный стол, во главе которого ведет заседание хозяин, матерый и заслуженный Израиль Львович Сапир (заметим в скобках с благодарностью — без него меня не «распределили» бы в Гидропроект после окончания МЭИ, когда не брали другие). По одну его руку — дремлющий импозантный мужчина начальственного вида (как выяснилось, зам. главного инженера института по атомной тематике, Владимир Семенович Конев), по другую —

понятное дело, в неформальной обстановке. Перечислим некоторые энги и новообразования, а также приемы и навыки. Освоив их (или пытаясь в **СтаДиО**-толпе и сойти за своего.

произвольной группе сотрудников числом более одного;

тупе программеров (см. ниже);

каждому сотруднику, вне зависимости от пола, желательно, с ленинской

внимание сотрудника к директору;

приветствие-призыв, содержащий оценку;

е сотруднику о способе выхода из затруднительного положения;

какое от истины, однажды в сердцах брошенное утверждение;

ветского, московского) прочиста – давняя присказка, ни в коей мере новых перспектив;

невнятный набор разноречивых требований истоки которых теряются



Модули **АСТРА-НОВА**'2017

АСТРА-ДЕТАЛЬ

Основные размеры деталей

ПРЕ-АСТРА
АСТРА-СТАЦ
ПОСТ-АСТРА

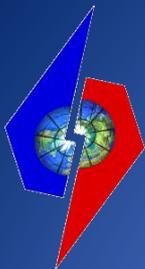
Препроцессор
Статика и циклика
Постпроцессор

АСТРА-ФОРМ
АСТРА-СЕЙСМ
АСТРА-ВИБР
АСТРА-ДИН

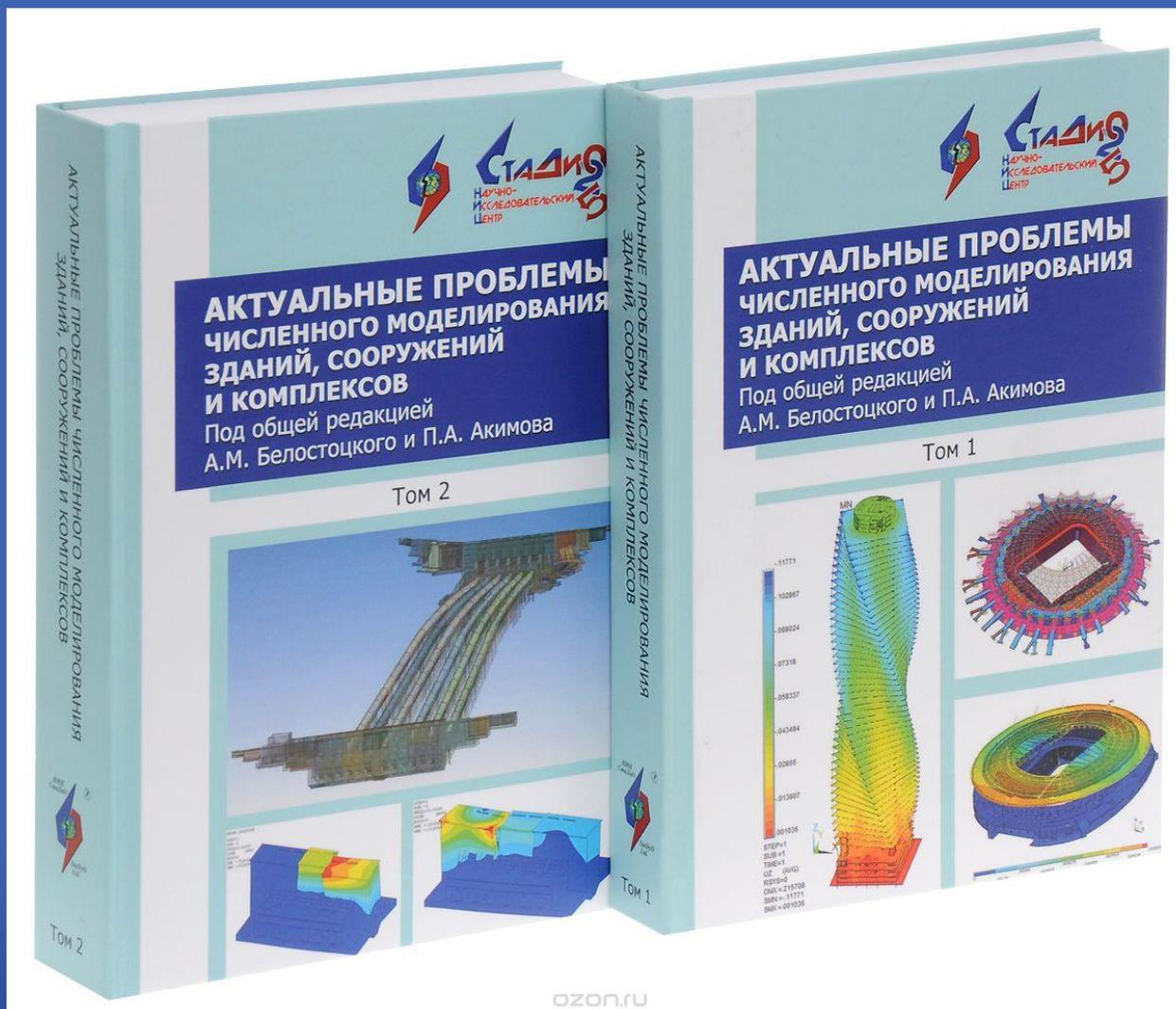
Собственные частоты/формы
Сейсмика (ЛСТ и акселерограммы)
Вибрация
Динамика

АСТРА-СТАДИО

температурные поля,
НДС и прочность деталей,
упругопластический расчет
(уточненный расчет МКЭ)



Этапы большого пути. Славная история **АСТРА-НОВА**





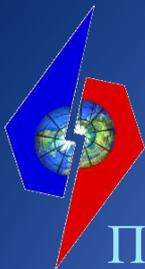
Этапы большого пути.

Славная история **АСТРА-НОВА**

Корневой “системообразующий” комплекс **АСТРА-АЭС** ведет свою историю с **1976 -1977 гг.**, де-факто был стандартом советской атомной энергетики и, укрепив свои позиции, остается таковым в “постсоветской”.

Накоплен многолетний и многогранный опыт широкого внедрения комплекса и его использования в расчетных исследованиях трубопроводных систем, важных для безопасности Курской, Смоленской, Ленинградской, Билибинской, Кольской, Запорожской, Нововоронежской, Балаковской, Волгодонской, Армянской, Белоярской и Игналинской АЭС, АЭС “Козлодуй” и “Белене” (Болгария), “Пакш” (Венгрия), “Ловиза” (Финляндия), “Бушер” (Иран), “Куданкулам” (Индия), “Тяньвань” (Китай), “Аккую” (Турция) и проектов АС нового поколения.

Имеются положительные референции специалистов ведущих зарубежных фирм Siemens AG (Германия), EDF (Франция) и Westinghouse (США).



Этапы большого пути. Славная история **АСТРА-НОВА**

Первая *неатомная* отраслевая ветвь –

АСТРА-ТЭС – «выросла» в **1989 г.**,

следующая –

АСТРА-НЕФТЕХИМ – в **1994 г.**,

далее –

АСТРА-ТЕПЛОСЕТЬ – в **2001 г.**,

затем –

АСТРА-МАГИСТР – в **2002 г.**

и наконец –

АСТРА-СВД – в **2015 г.**

и... это ещё не конец –

АСТРА-СУДПРОМ – в **2018 г.**

Университетские версии **АСТРА-НОВА** широко используются в процессе обучения, практики, дипломных работ и исследований студентов, аспирантов, докторантов и преподавателей рядом ведущих ВУЗов:

МГСУ (МИСИ), МЭИ (ТУ), РУДН, Академия нефти и газа им. Губкина, Нижегородский, Пермский, Иркутский, Уфимский, Орловский и Ивано-Франковский технические университеты, ряд других.



Подсистема программного комплекса прочностных расчетов трубопроводных систем **АСТРА-СТАДИО**

Обеспечивает уточненный расчет по пространственно-оболочечным и объемным схемам МКЭ температурного и НДС состояния, прочности и сейсмостойкости тяжело нагруженных элементов-деталей трубопроводов:

- *тройников ортогональных радиальных сварных, с накладками и штампованных, не ортогональных;*
- *отводов (гибов, колен) гнутых, крутоизогнутых, штампованных и секторных с учетом эллиптичности, разностенности (переменной толщины сечения) и примыкающих прямых труб;*
- *переходников концентрических и с эксцентриситетом;*
- *линзовых и сильфонных компенсаторов осевых, угловых и сдвиговых (многоволновых с учетом примыкающих прямых труб);*
- *косых стыков;*
- *сварных соединений (в объемной КЭ-постановке)*

Подсистема аккумулирует мировой и собственный 40-летний опыт разработчиков по анализу сложного пространственного распределения перемещений, деформаций и напряжений в деталях, определяющих прочность всей трубопроводной системы, оборудовании, строительных конструкциях и сооружениях.



Перспективы развития – современный взгляд

Грядущий облик программного комплекса — и **АСТРА-НОВА** не исключение - формируется сегодня. Два мощных источника и стимула — внутренняя потребность в саморазвитии (стоящий на месте обречен) и запросы практики.

«Общетрубопроводные» темы, требующие наукоемких разработок:

1. **Нормативные оценки прочности в зонах-деталях с существенно неоднородным НДС и локальными зонами пластичности (много говорено, а воз и ныне...).** Наше движение в последние годы: автофретированные детали (трубы, отводы,..) трубопроводов высокого давления и предельные нагрузки для тройниковых соединений и иных деталей с существенно неоднородным НДС (энергетические критерии скорости изменения удельной пластической работы).

2. Учет ползучести/релаксации в высокотемпературных трубопроводах – «пещерный» уровень середины прошлого столетия.

3. Подземные и наземные трубопроводы, адекватный учет взаимодействия с массивом грунта.

4. Подводные трубопроводы (на шельфе, переходы через проливы, заливы, озера и реки), специфичные воздействия и взаимодействия



Перспективы развития – современный взгляд

Грядущий облик программного комплекса — и **АСТРА-НОВА** не исключение - формируется сегодня. Два мощных источника и стимула — внутренняя потребность в саморазвитии (стоящий на месте обречен) и запросы практики.

«Общетрубопроводные» темы, требующие наукоемких разработок:

5. «Традиционные» и специальные опоры, чувствительность результатов к характеристикам и алгоритмам.

6. Разрыв между некоторыми «циркулярами» и возможностью их грамотного выполнения (например, учет неплатформенных схем сейсмического возбуждения, в т.ч., различие перемещений в опорных точках) в проектной практике.

7. Расчеты на вибропрочность. Куча белых пятен, неизбежная привязка к натурным измерениям, выводящая проблему из проектной стадии....

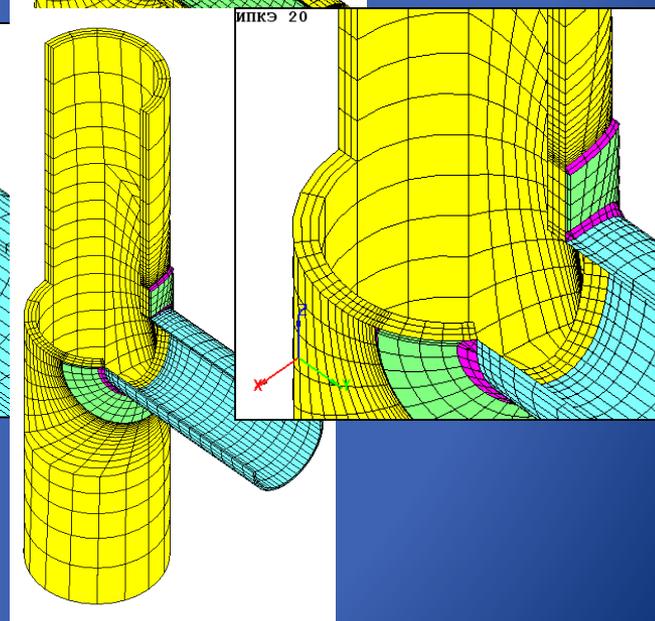
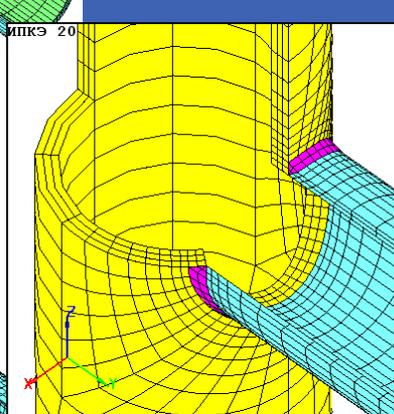
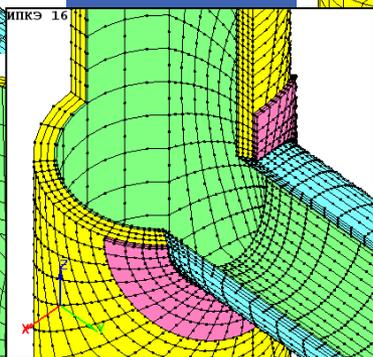
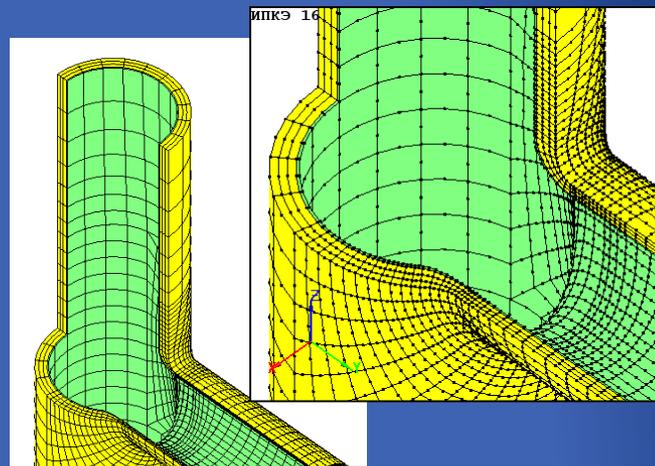
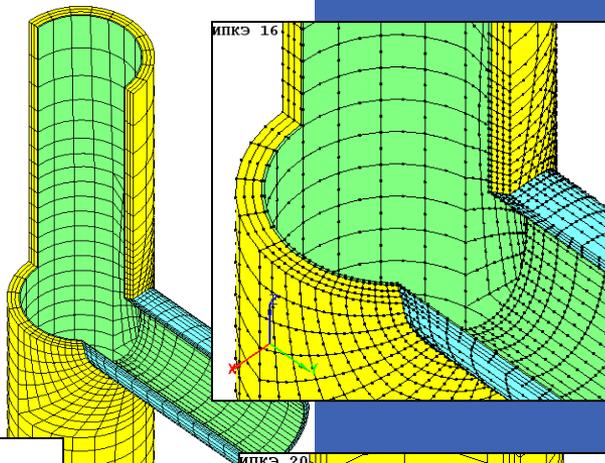
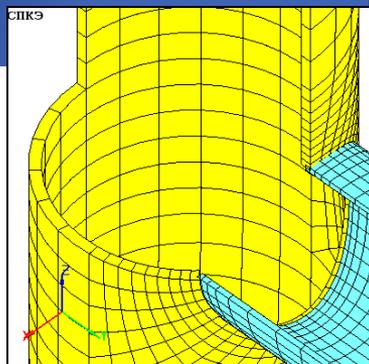
8. Пуск-наладка, реконструкция, мониторинг, экспертиза — особенности...

9. Продление ресурса — формальность-отписка (сейчас — почти повсеместно) или серьезная НИР?



АСТРА-СТАДИО

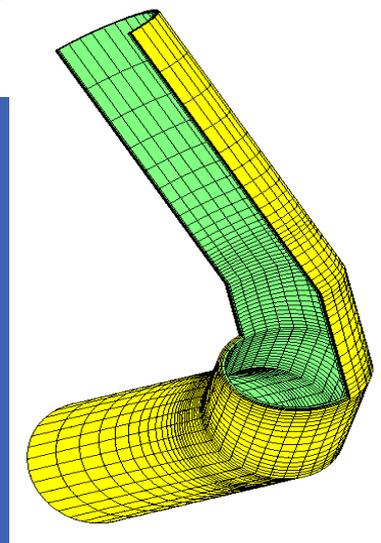
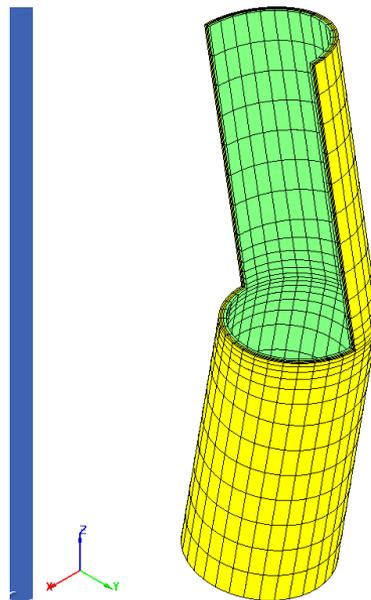
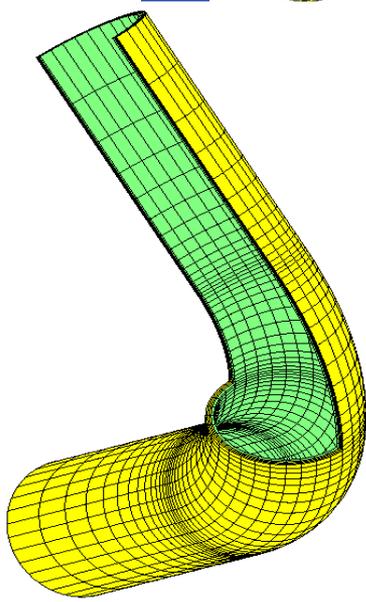
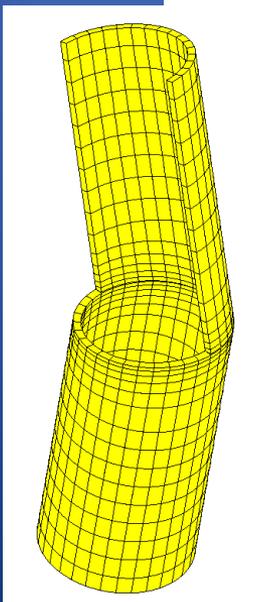
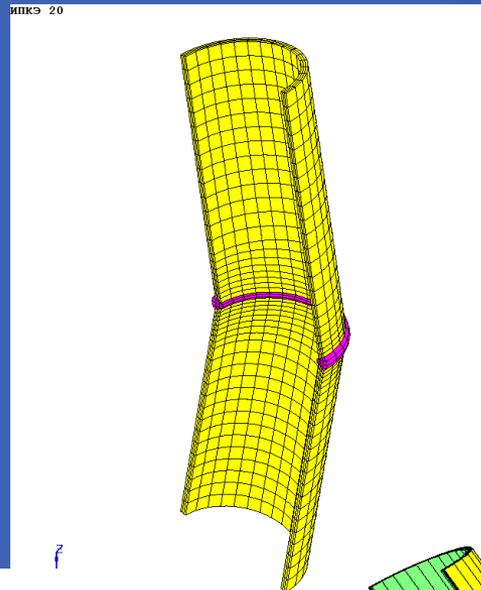
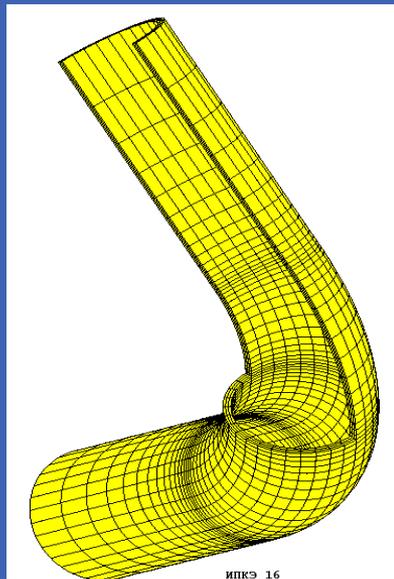
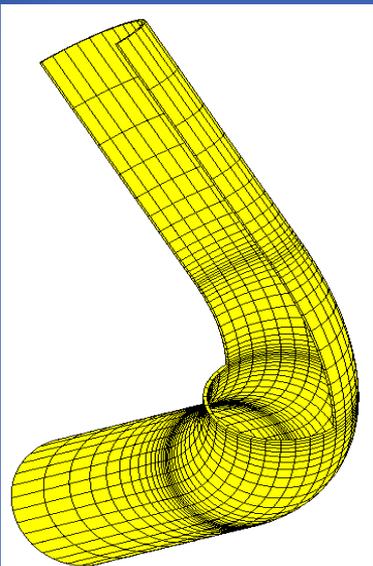
Расчетные КЭ-модели тройников.





АСТРА-СТАДИО.

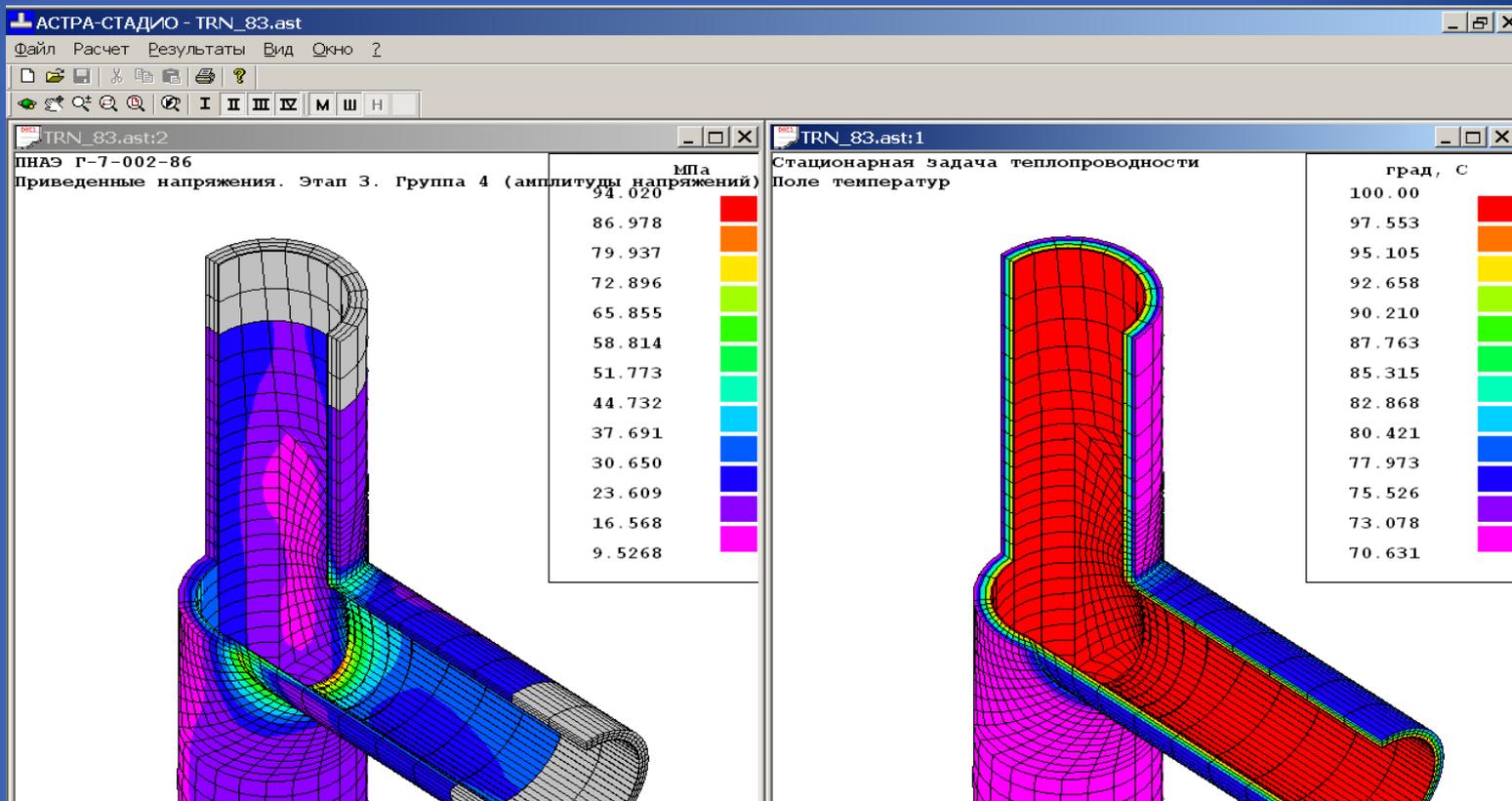
Расчетные КЭ-модели отводов и косых стыков.





АСТРА-СТАДИО

Представление результатов.



TRN_83.txt

Оценка прочности (ПНАЭ Г-7-002-86).

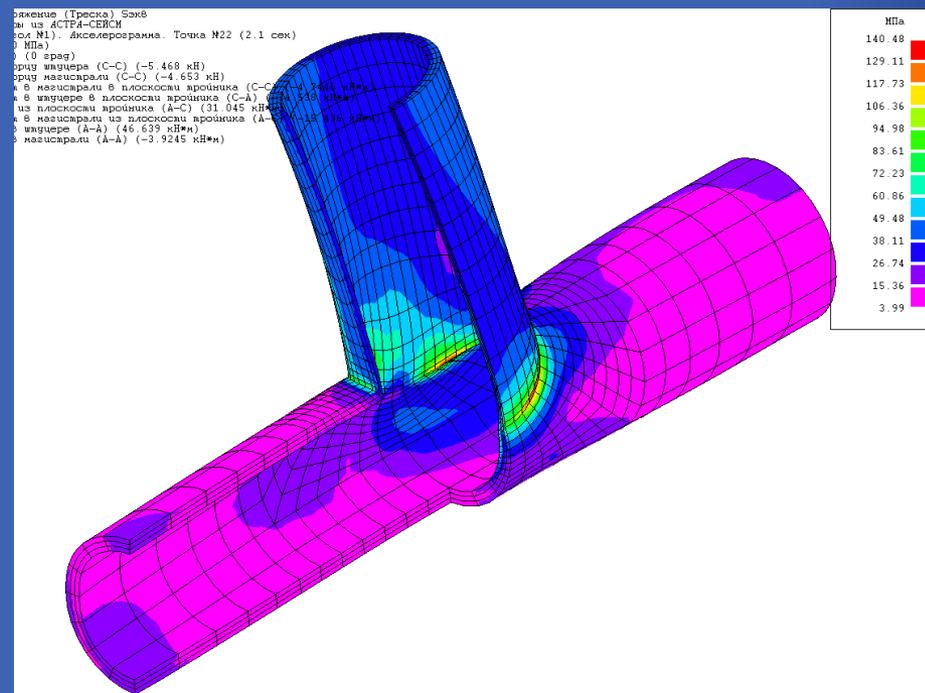
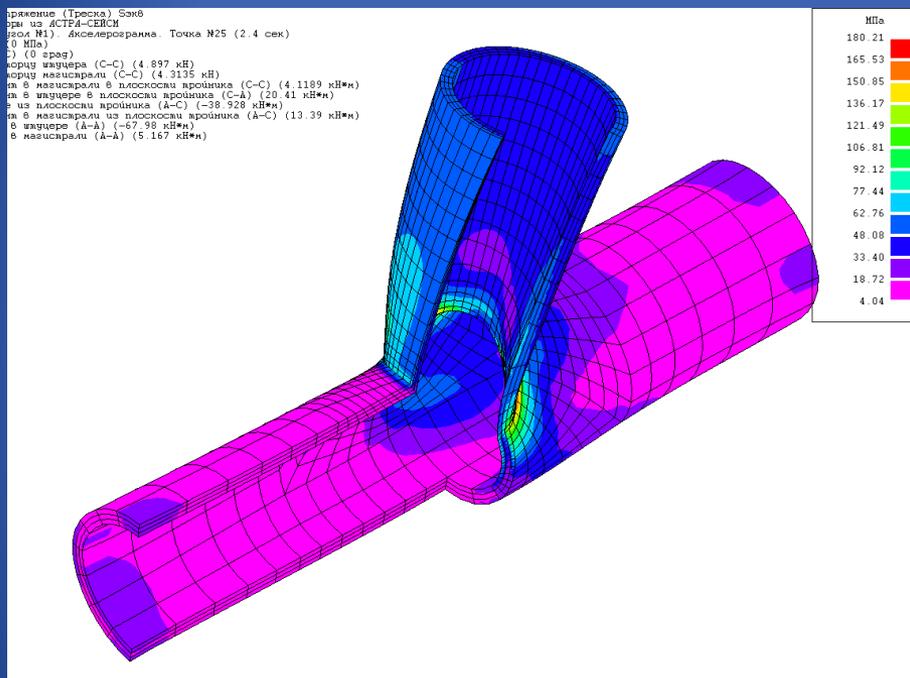
Вид расчета	Max (МПа)	Доп. (МПа)	Прев.
Этап 1. Группа 2	122.51	176.50	
Этап 3. Группа 3 (размахи напряжений)	119.25	407.83	
Этап 3. Группа 4 (амплитуды напряжений)	124.32	180.00	

ПРИМЕЧАНИЕ: Прочность торцевых зон не оценивается.

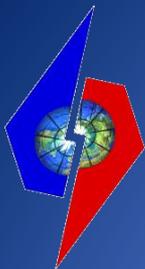


АСТРА-СТАДИО

Представление результатов



Кадры видеоролика динамики НДС тройника
от сейсмического воздействия, заданного акселерограммой

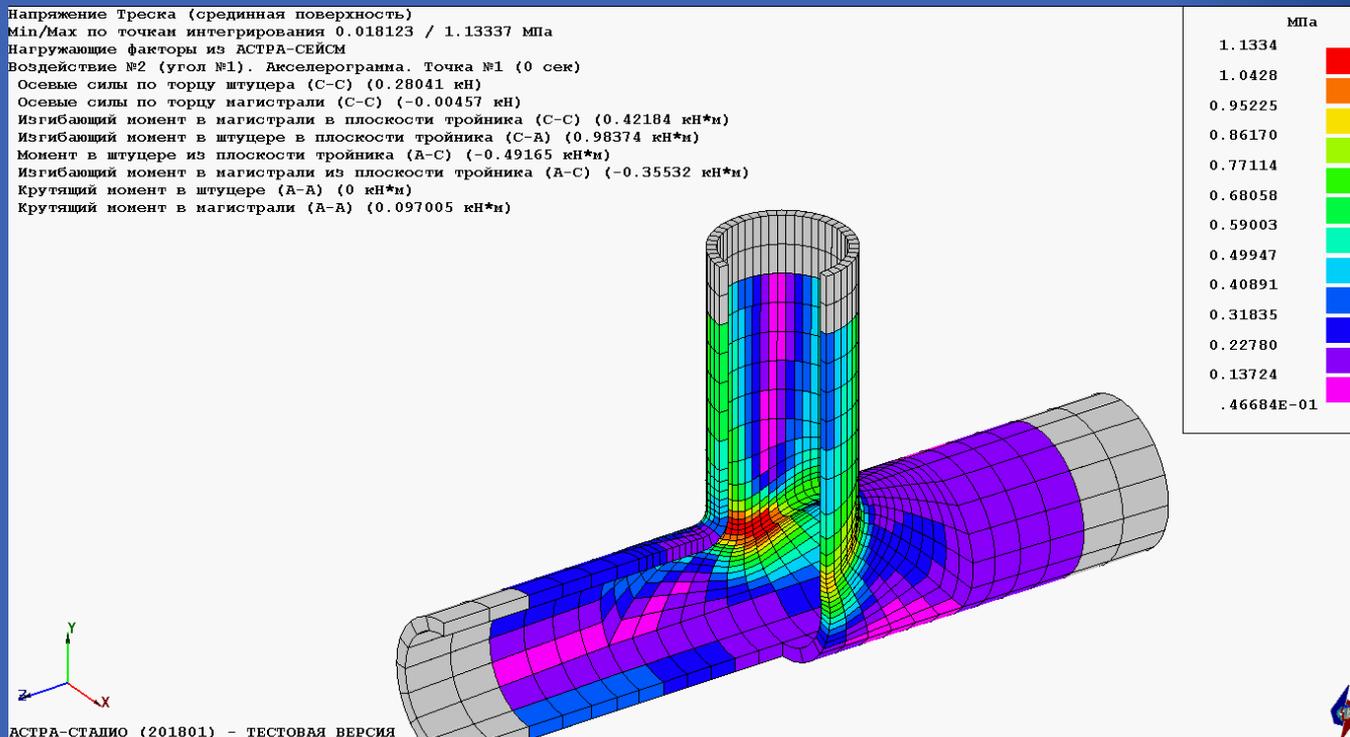


АСТРА-СТАДИО

Представление результатов Анимация результатов расчёта

- анимация доступна для всех визуализируемых результатов расчёта

- ВОЗМОЖНА запись анимации в видеофайл

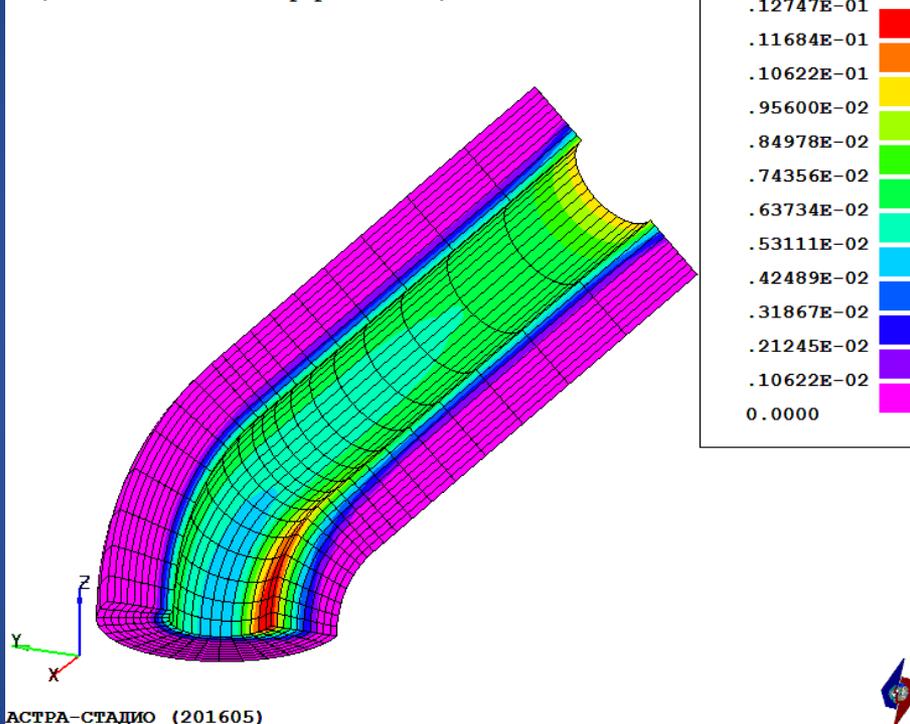




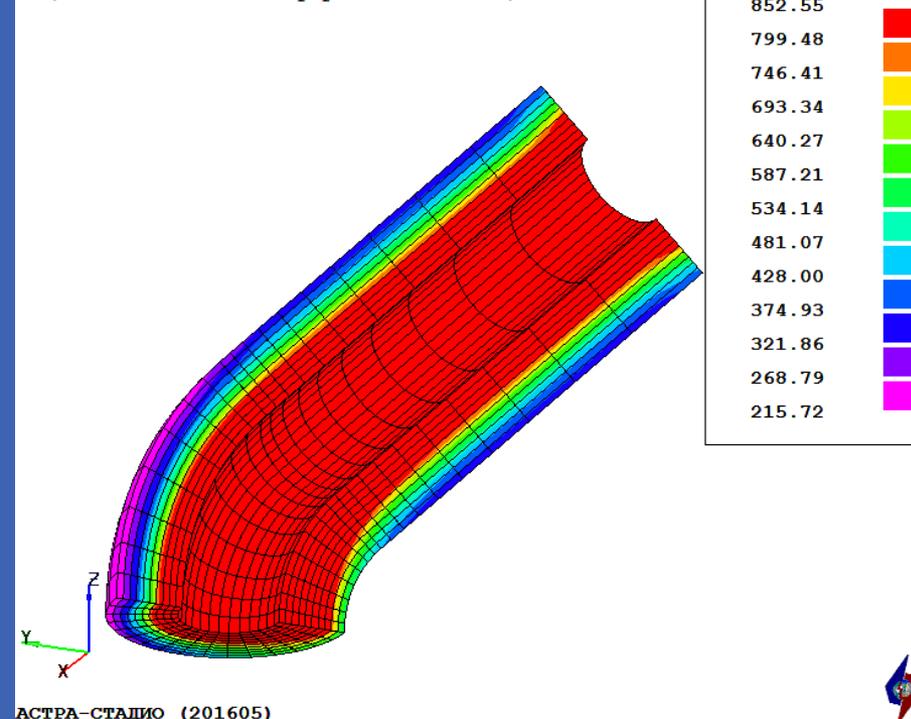
АСТРА-СТАДИО

Упругопластические расчеты

Пластическая деформация Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 0 / 0.0127467



Общее напряжение Мизеса
Min/Max по точкам интегрирования 215.72 / 852.552 МПа

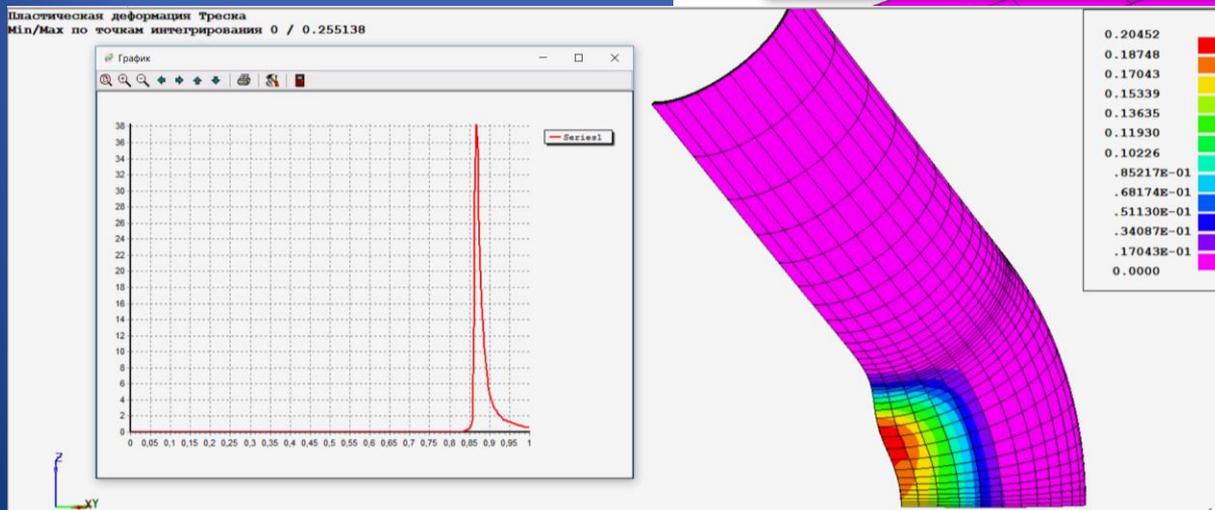
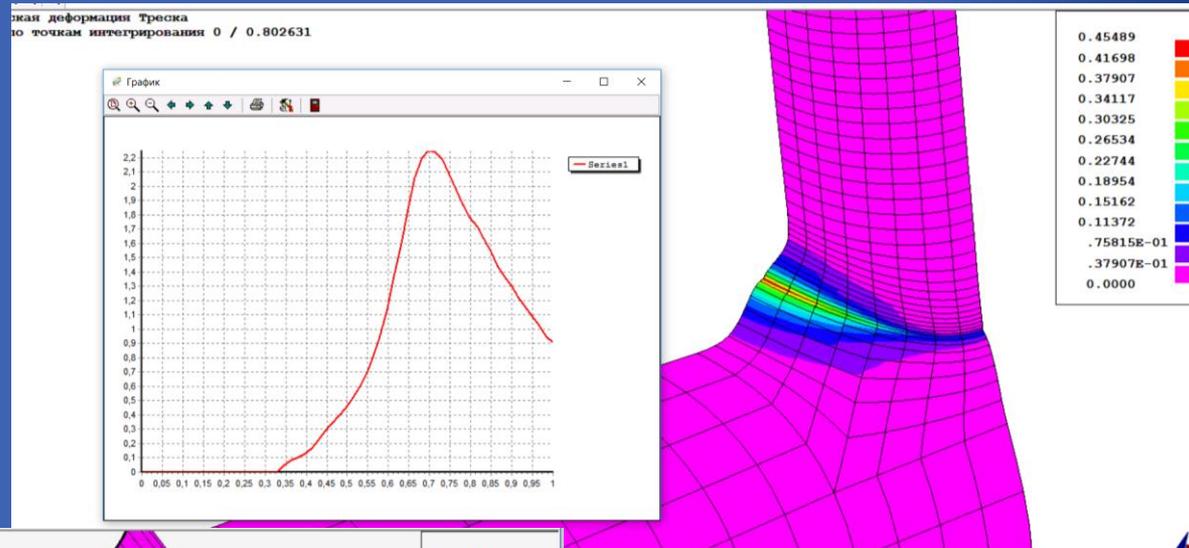


Пластические деформации и эквивалентные напряжения
при давлении автофретирования **АСТРА-СВД**



АСТРА-СТАДИО

Упругопластические расчеты

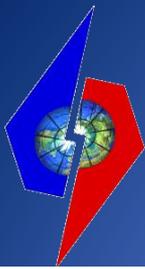


*Энергетический критерий статической прочности - предельной нагрузки.
Пластические деформации и графики скорости изменения удельной пластической работы*



Критерии предельных пластических нагрузок в сосудах давления/тройниках. История вопроса

- **Нормативные подходы**
- **Упруго-пластический расчет. Локальные критерии**
 - Метод двойного упругого наклона (ASME, 1974)
 - Метод пересечения касательных (Save, 1972)
 -
- **Упруго-пластический расчет. Интегральные критерии**
 - Критерий пластической работы (Gerdeen, 1979)
 - Критерий максимума скорости возрастания относительной пластической работы (Скопинский В.Н., 2011)
 -



Критерии предельных пластических нагрузок в сосудах давления/тройниках. История вопроса

Steel and Composite Structures, Vol. 22, No. 6 (2016) 1391-1415
DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/scs.2016.22.6.1391>

1391

Evaluation of limit load analysis for pressure vessels – Part I: Linear and nonlinear methods

Evaluation of limit load analysis for pressure vessels – Part I: Linear and nonlinear methods

Xiaohui Chen ^{*1,2}, Bingjun Gao ^{3a} and Xingang Wang ^{**1b}

¹ School of Control Engineering, Northeastern University, Qinhuangdao, 066004, China

² College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, 066004, China

³ School of Chemical Engineering and Technology, Hebei University of Technology, Tianjin, 300000, China

(Received May 20, 2016, Revised November 02, 2016, Accepted November 29, 2016)

Table 5 Numerical solution of limit load

Methods	Limit load/MPa
Experimental result	4.72/5.05
Stress classification	3.50
m_{α}^T Stress classification	5.52
Twice elastic slope criterion	5.26
Triplex elastic slope criterion	5.49
Quintuple elastic slope criterion	5.63
Fifteenfold elastic slope criterion	5.89
Tangent intersection criterion	6.23
Triplex δ criterion	5.56
Zero curvature criterion	6.68
1% equivalent plastic strain criterion	5.85
0.2% residual strain criterion	5.57
5% maximum principal strain criterion	6.45
Linear deformation criterion	5.24
Twice elastic deformation criterion	5.72
ultimate strength criterion	7.10
Plastic work criterion	6.10
Plastic modulus criterion	6.34
Divergence point	7.62

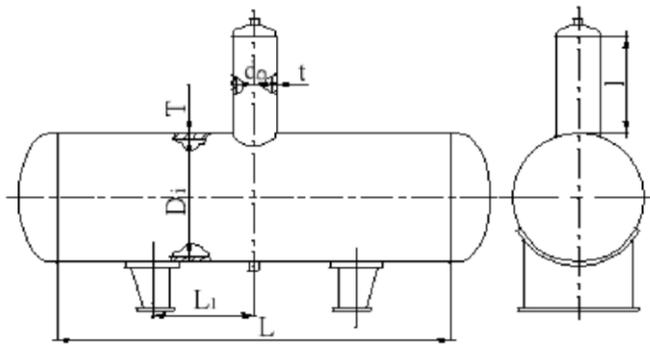


Fig. 10 Schematic diagram of cylinder with nozzle



Нормативные формулы (ПНАЭ Г-7-002-86)

Предельное давление для прямой трубы:

$$p = \frac{2[\sigma]t}{D - t}$$

D – наружный диаметр;

t – толщина стенки;

$[\sigma]$ – допускаемое;

Предельное давление для тройника:

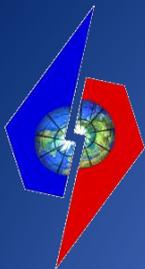
$$p = \frac{2\varphi[\sigma]t}{D - t}$$

коэффициент снижения прочности:

$$\varphi = \frac{2}{\frac{d}{\sqrt{D_m \cdot t}} + 1.75}$$

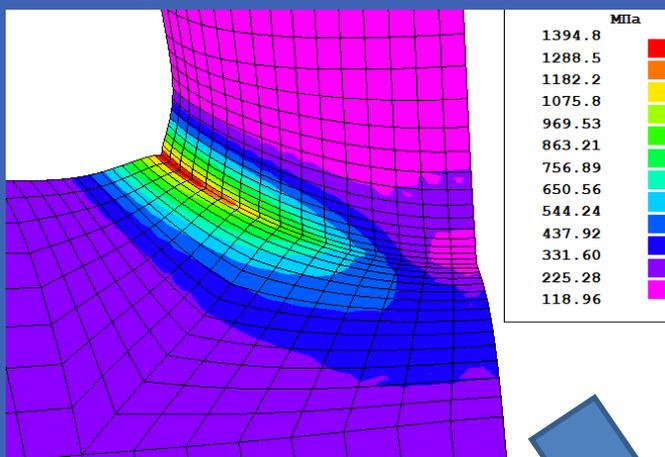
средний диаметр $D_m = D - t$

d – диаметр штуцера



Реализация оценки статической прочности по ПНАЭ Г-7-002-86 в АСТРА-СТАДИО

Максимальные упругие напряжения на
срединной поверхности



Допускаемые напряжения

$$[\sigma] = \min \{ R_m^T / n_m; R_{p0,2}^T / n_{0,2}; R_{mt}^T / n_{mt} \}.$$

Оценка прочности. Предельные нагрузки

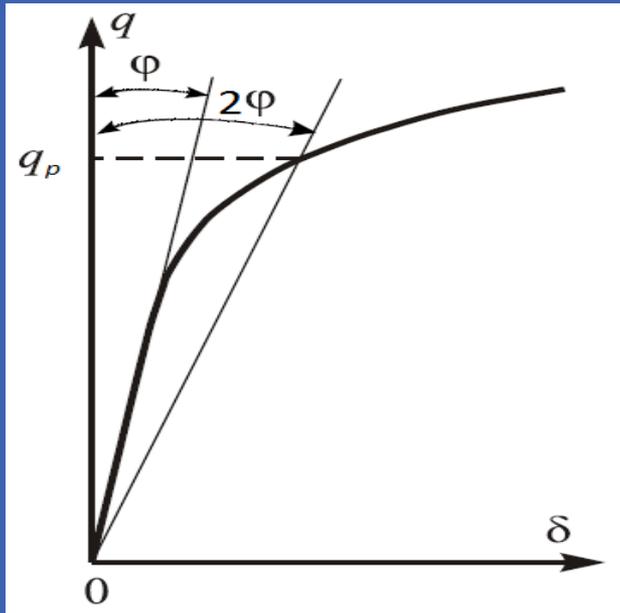
Оценка прочности ПНАЭ Г-7-002-86.

Вид расчёта	Max, МПа	Доп., МПа	Прев.
Этап 1. Группа 2	1367.51	294.15	Есть
Этап 3. Группа 3 (размахи напряжений)	1367.51	678.80	Есть
Этап 3. Группа 4 (амплитуды напряжений)	764.24	100.00	Есть

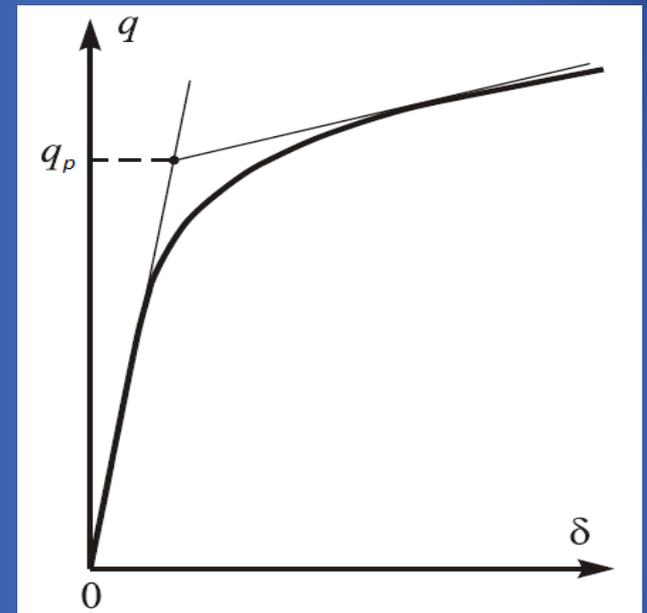


Локальные критерии

Метод двойного упругого наклона (TES)¹



Метод пересечения касательных (TI)²



δ – деформационный параметр (согласованное с нагрузкой перемещение, максимальная главная деформация, интенсивность деформации, ...);

q – параметр нагрузки;

q_p – предельная пластическая нагрузка.

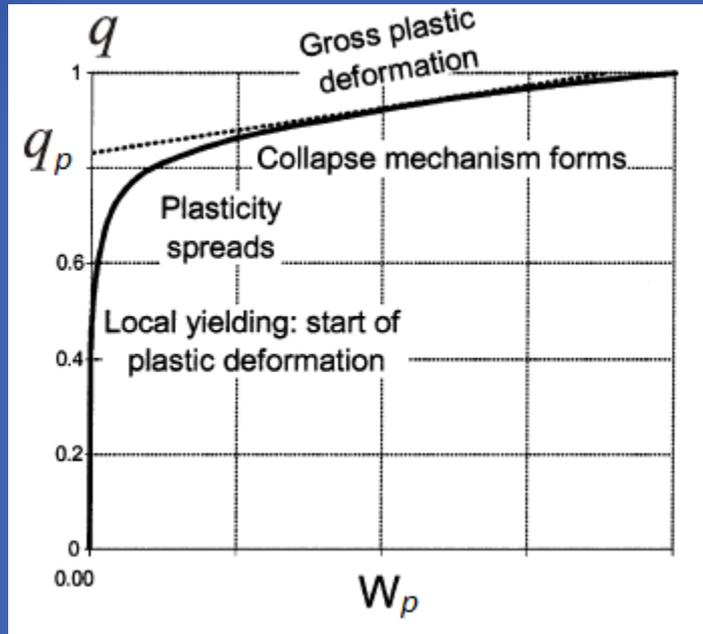
¹ASME (1974), ASME Boiler and Pressure Vessel Code; Section III. Division 1 Par. 1430, American Society Mechanical Engineers, New York, NY, USA.

²Save, M. (1972), “Experimental verification of plastic limit analysis of torispherical and toriconical heads”, *Press. Vessel Pip. Des. Anal. I*, ASME, 1, 382-416.

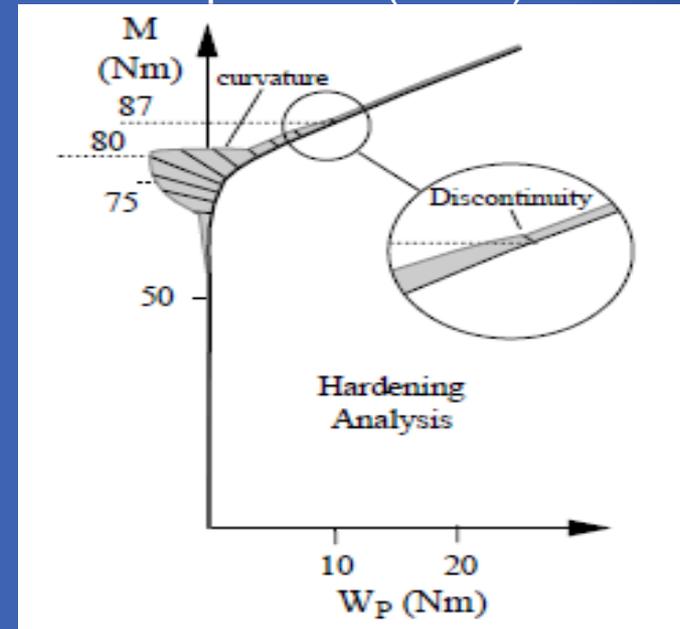


Интегральные (энергетические) критерии

Критерий пластической работы¹



Критерий кривизны пластической работы (PWC)²



W_p – пластическая работа;
 q – параметр нагрузки;
 q_p – предельная пластическая нагрузка.

¹Gerdeen, J.C. (1979), "A critical evaluation of plastic behavior data and a united definition of plastic loads for pressure components", WRC Bulletin 254.

² Li H., Mackenzie D. Characterising gross plastic deformation in design by analysis. // International Journal of Pressure Vessel and Piping. 2005. Vol. 82. No. 10. P. 777–786.



Критерий максимума скорости изменения относительной пластической работы

Относительная пластическая работа $C_p = \frac{W_p}{W}$

W_p – пластическая работа;

W_e – упругая работа;

$W = W_p + W_e$ – полная работа.

Предельная пластическая нагрузка $q_p = \operatorname{argmax}_q \frac{dC_p}{dq}$

Характерный вид зависимости C_p' - q

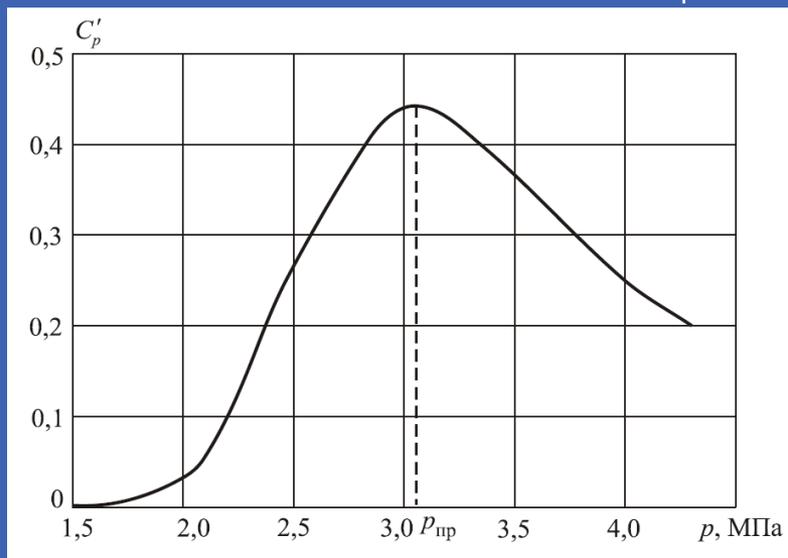
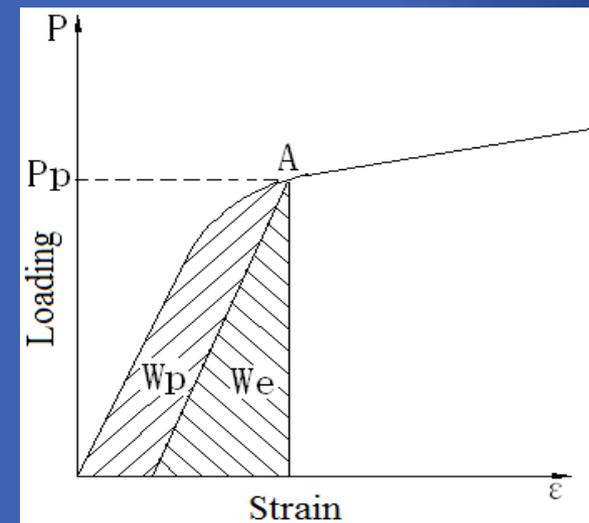


График «нагрузка-деформация»



$$W_p = \sum_{Nep} \int_{V_e} \bar{W}_p dV$$

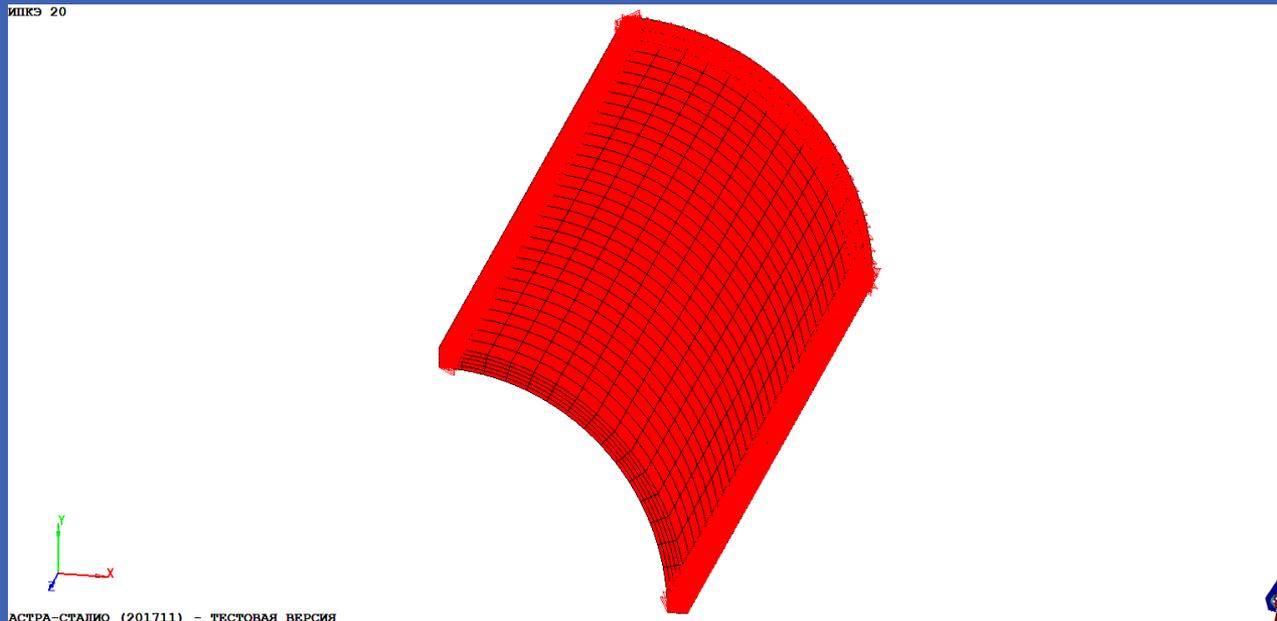
$$\bar{W}_p = \int \sigma_i d\varepsilon_{pi}$$

В.Н. Скопинский, Н. А. Берков, Н. В. Вожева. Новый критерий определения предельной нагрузки в сосудах давления с патрубками на основе упругопластического анализа. // Машиностроение и инженерное образование. - 2011. - № 3. - С. 50-57.



Прямая труба под внутренним давлением

Объемная КЭ-модель (*АСТРА-СТАДИО*)



АСТРА-СТАДИО (201711) - ТЕСТОВАЯ ВЕРСИЯ

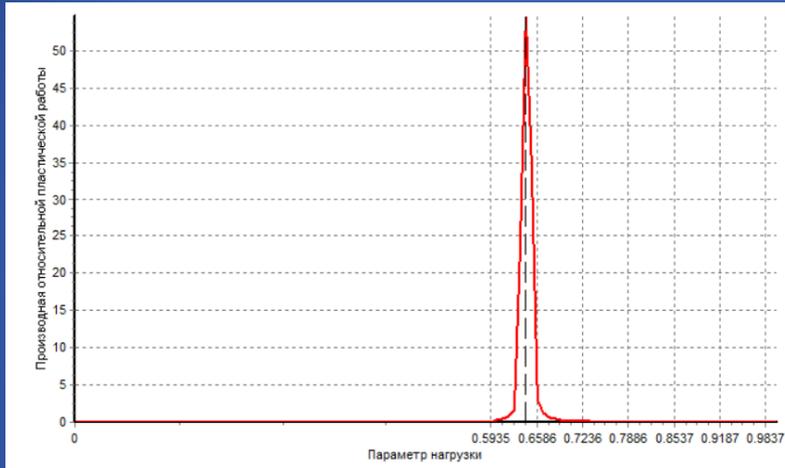
Параметры модели/задачи

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

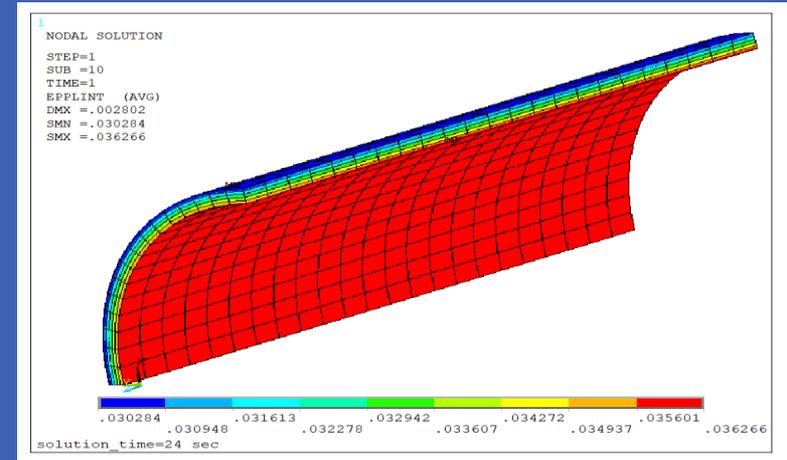


Прямая труба под внутренним давлением

Критерий максимума скорости изменения относительной пластической работы



Эквивалентные пластические деформации Треска при предельной нагрузке $p_* = 9.6345$ МПа.
Максимум – 3.63%



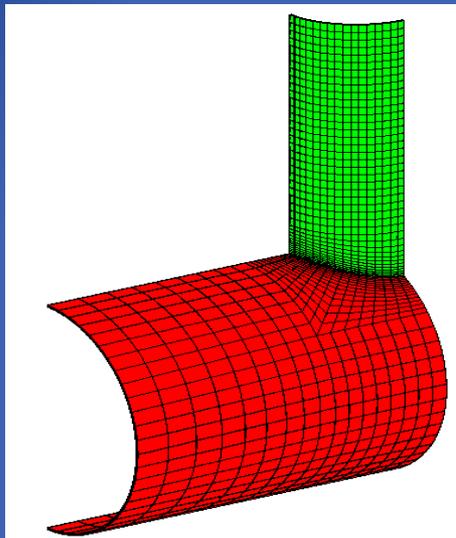
Предельное давление, МПа

Нормы ПНАЭ Г-7-002-86	Двойной упругий наклон <i>АСТРА-СТАДИО</i>	Максимум скорости изменения относительной пластической работы <i>АСТРА-СТАДИО</i>
8.33	9.60	9.63

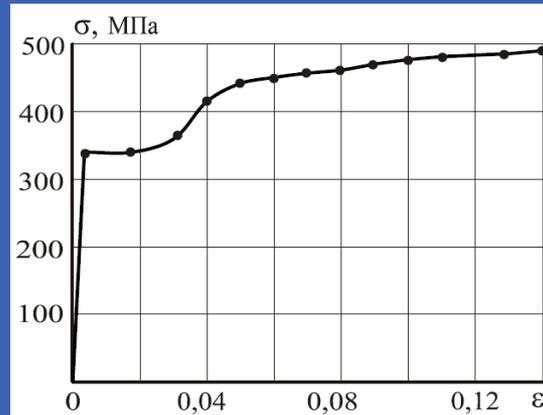


Тонкостенный тройник под внутренним давлением

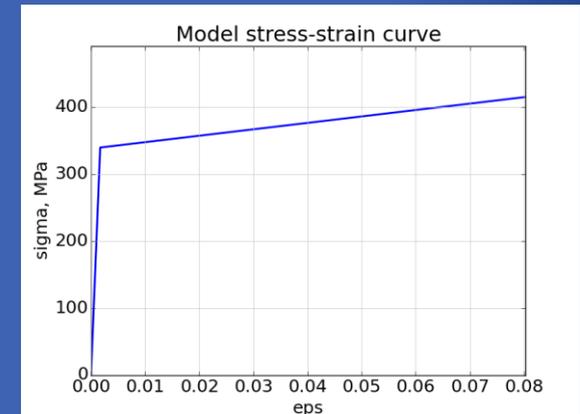
Объемная КЭ-модель



Реальная диаграмма деформирования



Модельная диаграмма



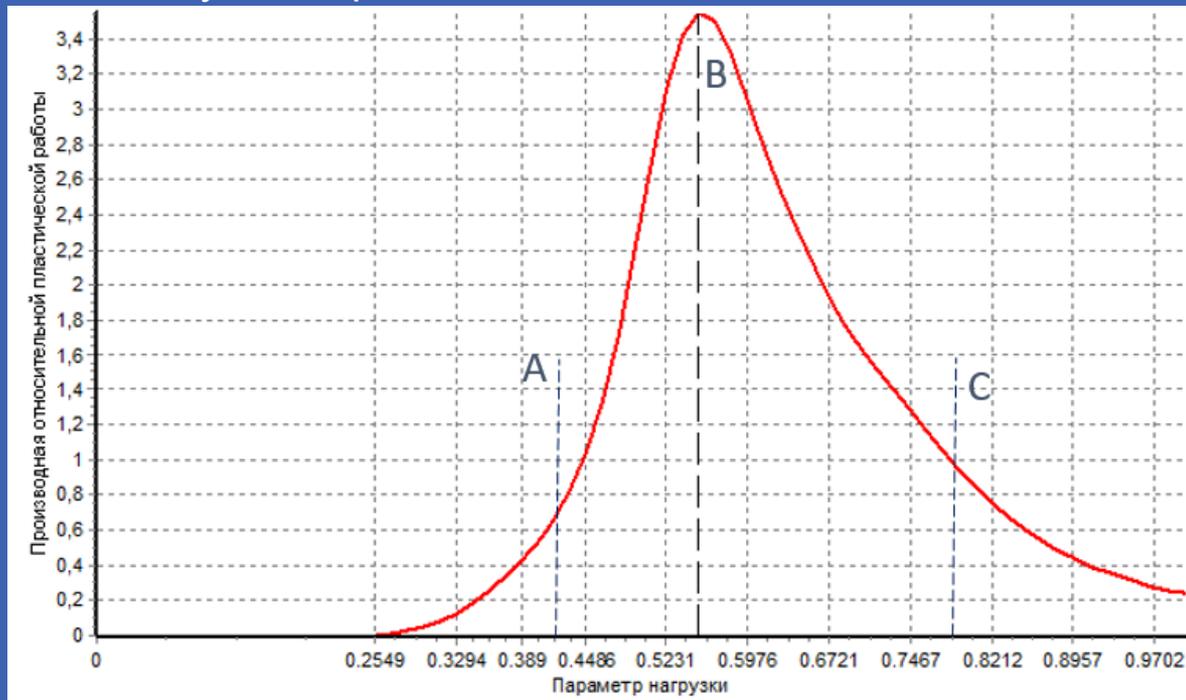
Параметры

Наружный диаметр магистрали D_H , мм	612
Толщина стенки магистрали T , мм	6
Наружный диаметр штуцера d_H , мм	325
Толщина стенки штуцера t , мм	6
Модуль упругости E , МПа	2e5
Коэффициент Пуассона ν	0.3
Предел текучести σ_T , МПа	339.4
Тангенциальный модуль E_T , МПа	958.61
Максимальное давление, МПа	5



Тонкостенный тройник под внутренним давлением

Критерий максимума скорости изменения относительной пластической работы



Предельное давление, МПа

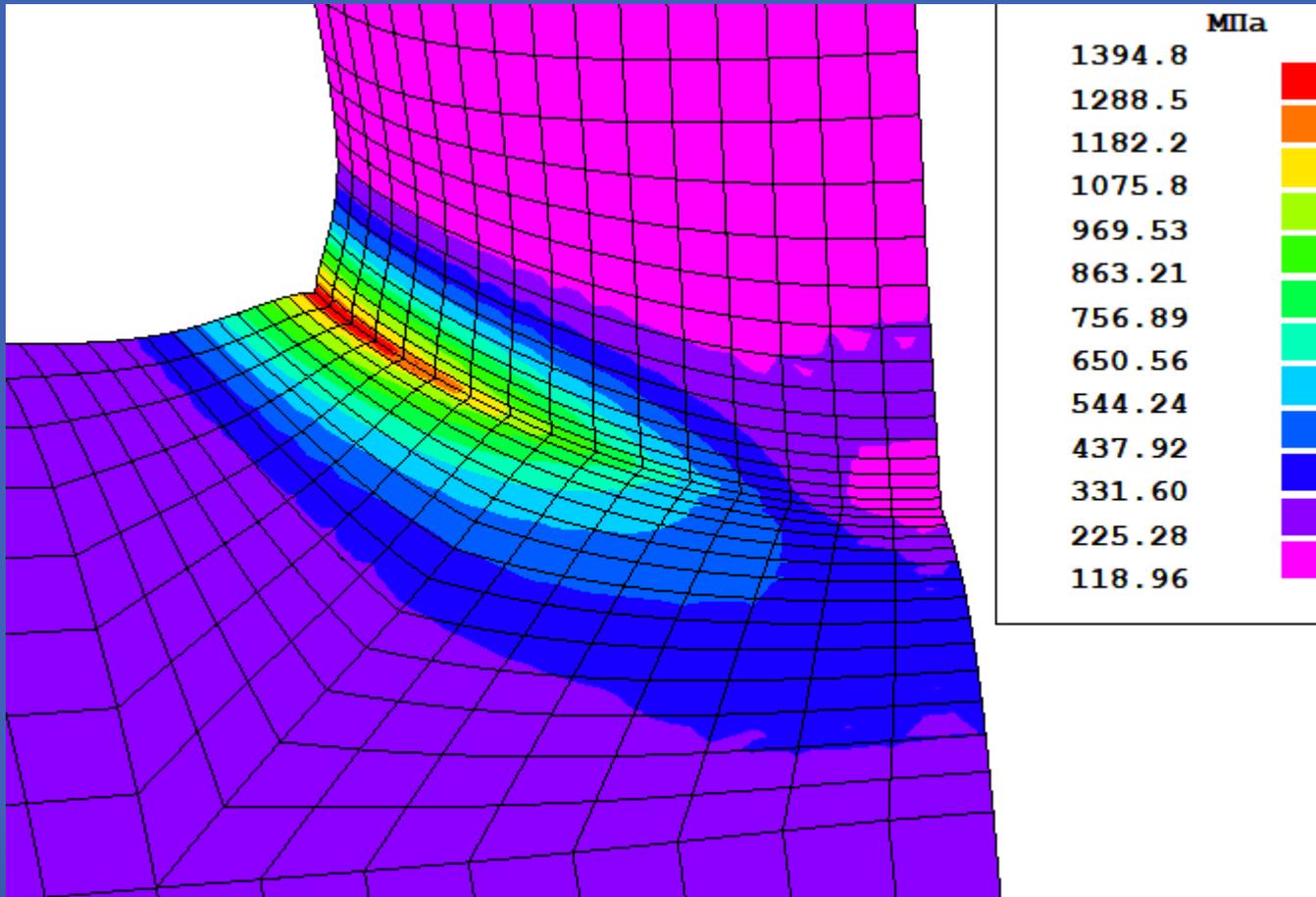
Нормы ПНАЭ Г-7-002-86 / Оценка прочности <i>АСТРА-СТАДИО</i>	Двойной упругий наклон <i>АСТРА-СТАДИО</i>	Максимум скорости изменения относительной пластической работы <i>АСТРА-СТАДИО</i>	³ Скопинский В.Н. и др., 2011 Оболочечная КЭ-модель
0.94 / 1.07	2.20	2.76	3.05



Тонкостенный тройник под внутренним давлением

Упругий расчет

Приведенные напряжения (МПа) этап 1, группа 2
(оценка прочности АСТРА-СТАДИО по ПНАЭ Г-7-002-86)



Максимальные приведенные напряжения 1367.51 МПа. Допускаемые - 294.15 МПа

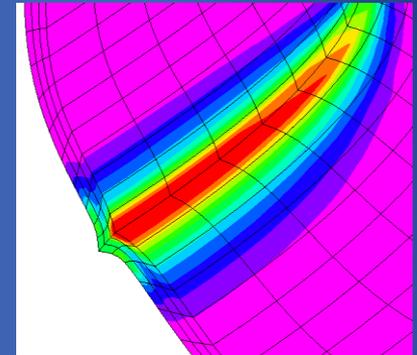
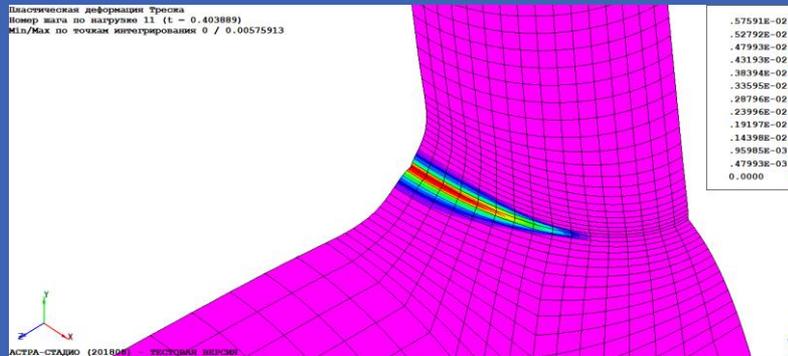


Тонкостенный тройник под внутренним давлением

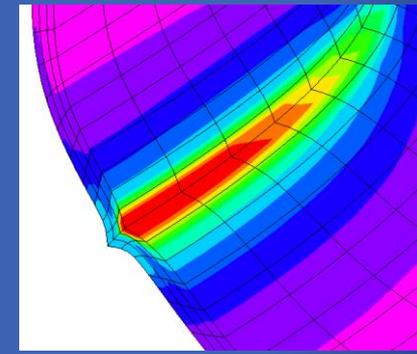
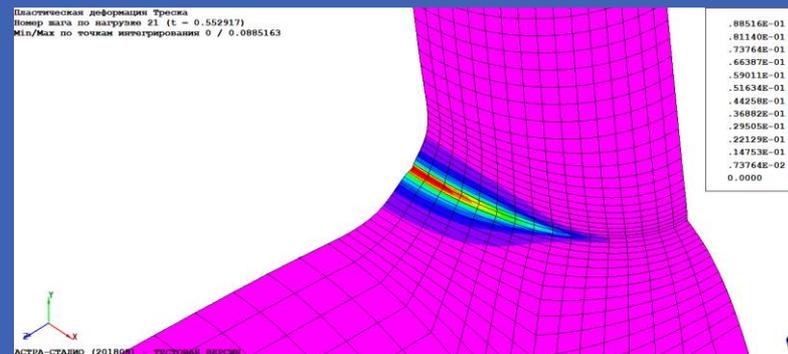
Упруго-пластический расчет

Эквивалентные пластические деформации Треска

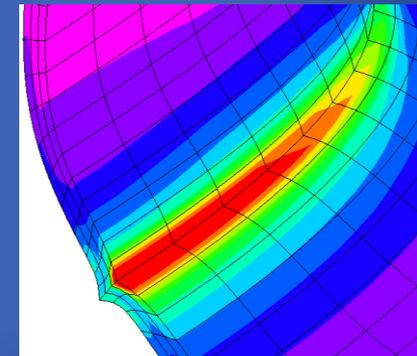
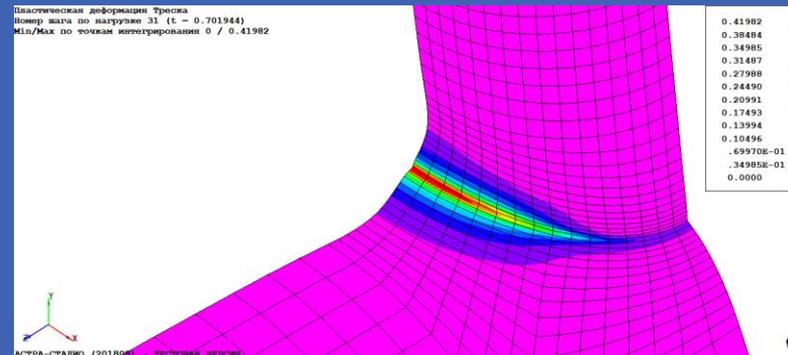
Докритическая область
(точка А, $q = 0.40$, $p = 2.02$
МПа), макс. — 0.58%



Предельная нагрузка
(точка В, $q = 0.55$, $p_* = 2.76$
МПа), макс. — 8.85%т



Закритическая область
(точка С, $q = 0.70$, $p = 3.51$
МПа), макс. — 41.98%

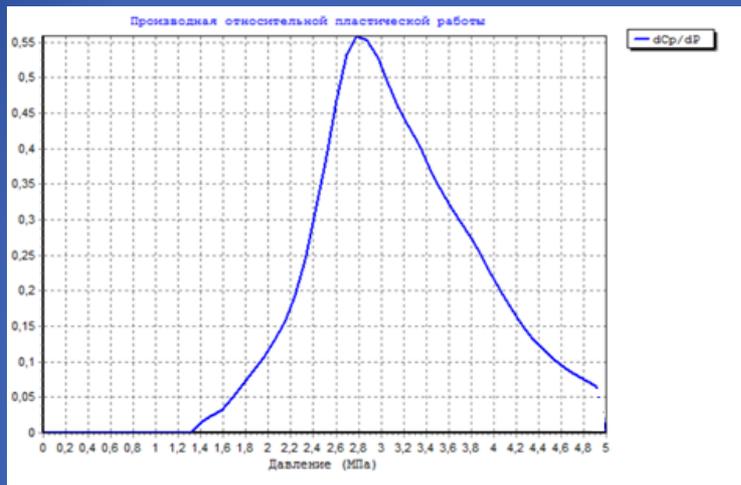




Тонкостенный тройник под внутренним давлением

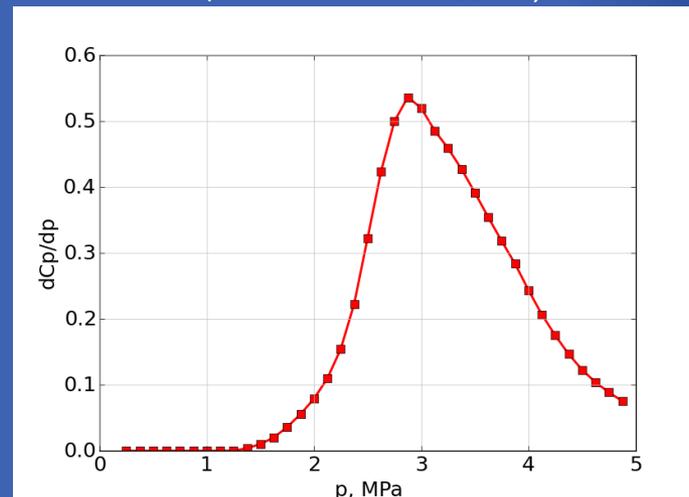
Сравнение по критерию максимума скорости изменения относительной пластической работы

АСТРА-СТАДИО (объемная КЭ-модель)



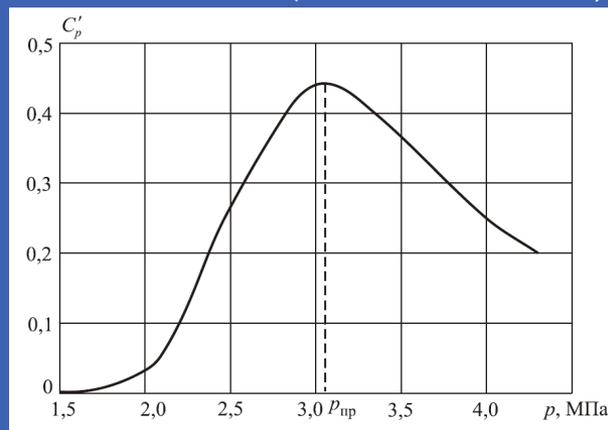
$p_* = 2.76$ МПа

ANSYS (объемная КЭ-модель)

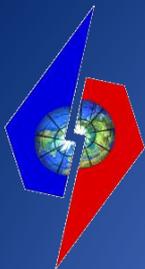


$p_* = 2.88$ МПа

Скопинский В.Н. (оболочечная модель)



$p_* = 3.05$ МПа



Расчет среднестенного равнопроходного тройника

Объемная КЭ-модель

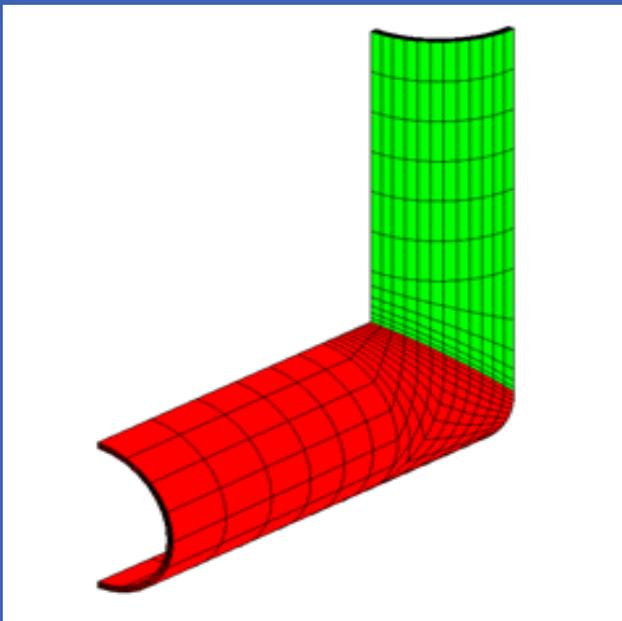
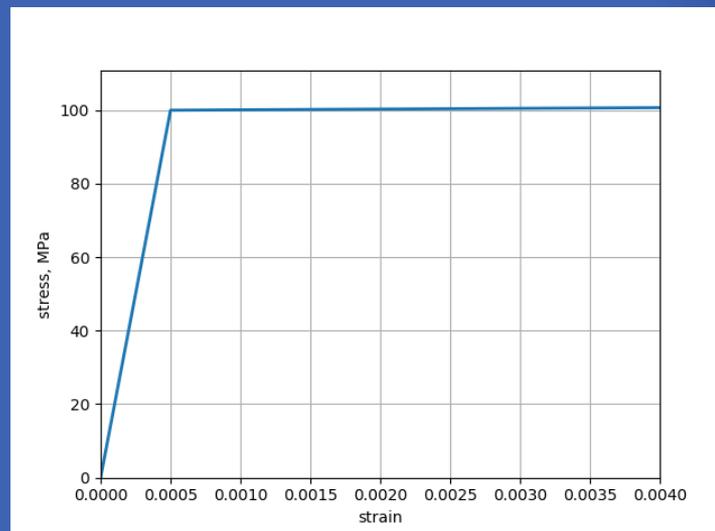


Диаграмма деформирования



Параметры модели

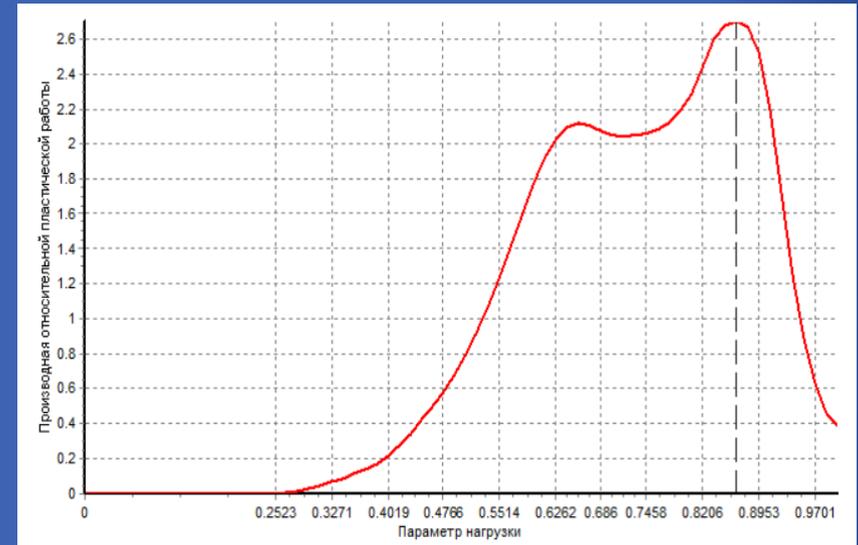
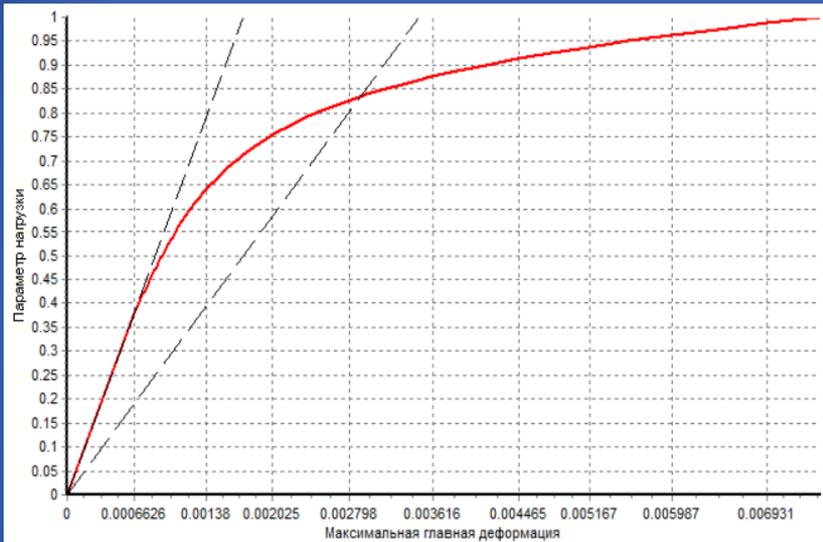
Диаметр магистрали, мм	500
Толщина стенки магистрали, мм	20
Диаметр штуцера, мм	500
Толщина стенки штуцера, мм	20
Модуль упругости, МПа	$2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0.3
Предел текучести, МПа	100
Тангенциальный модуль, МПа	200
Максимальное давление, МПа	6



Расчет среднестепенного равнопроходного тройника

Метод двойного упругого наклона
(параметр нагрузки vs макс. главная деформация)

Критерий максимума скорости изменения
относительной пластической работы



Предельное давление, МПа

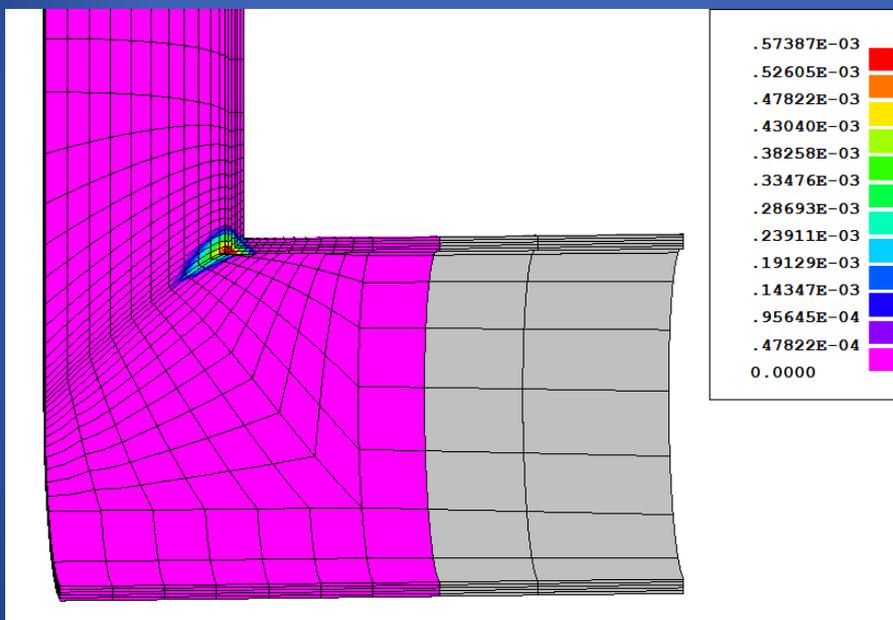
Нормы ПНАЭ Г-7-002-86	Метод двойного упругого наклона	Критерий максимума скорости изменения относительной пластической работы
2.43	3.33	3.94 / 5.19



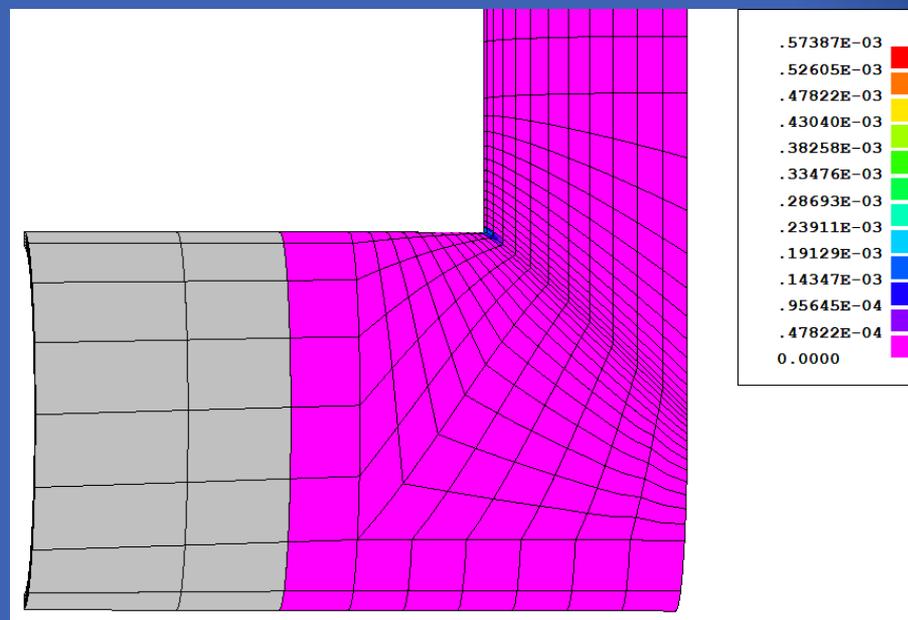
Расчет среднестенного равнопроходного тройника

Эквивалентные пластические деформации Треска
 $p = 2.43 \text{ МПа}$ (допускаемое давление по нормам ПНАЭ Г-7-002-86)

Внутренняя поверхность



Наружная поверхность



Максимальные пластические деформации - **0.06%**

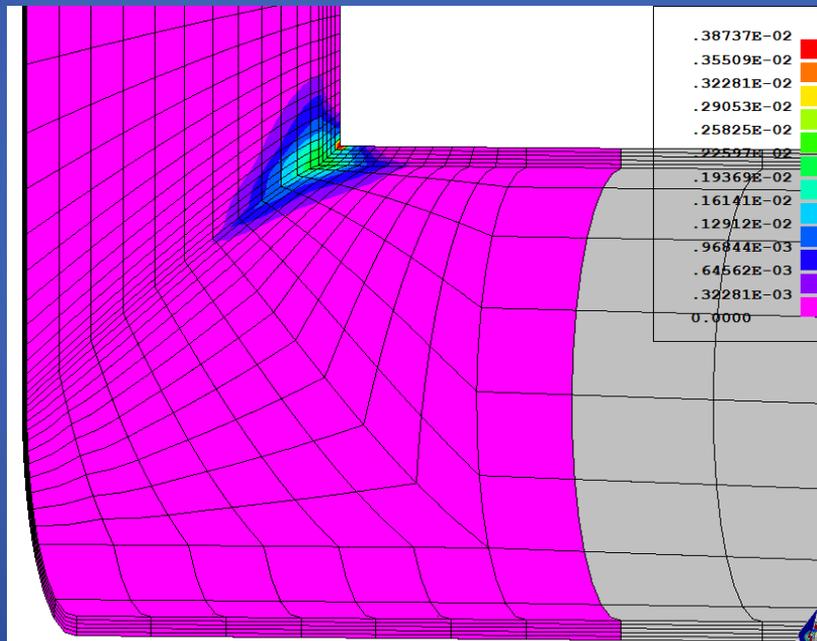


Расчет среднестенного равнопроходного тройника

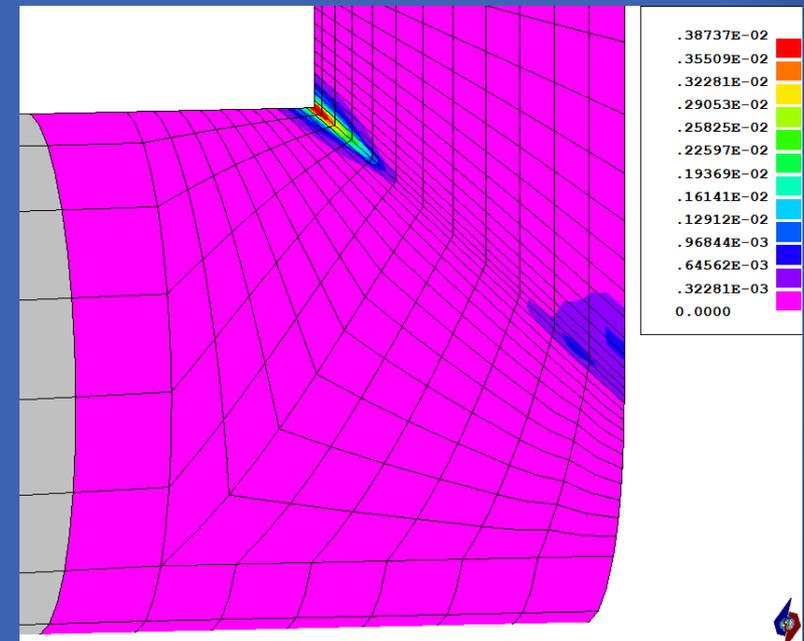
Эквивалентные пластические деформации Треска

$p = 3.30$ МПа (предельное давление по критерию двойного упругого наклона)

Внутренняя поверхность



Наружная поверхность



Максимальные пластические деформации - **0.39%**



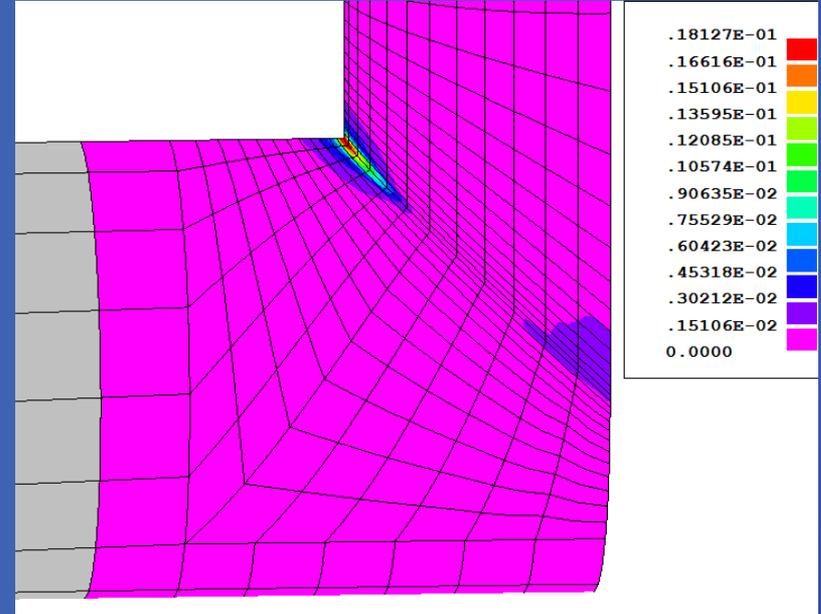
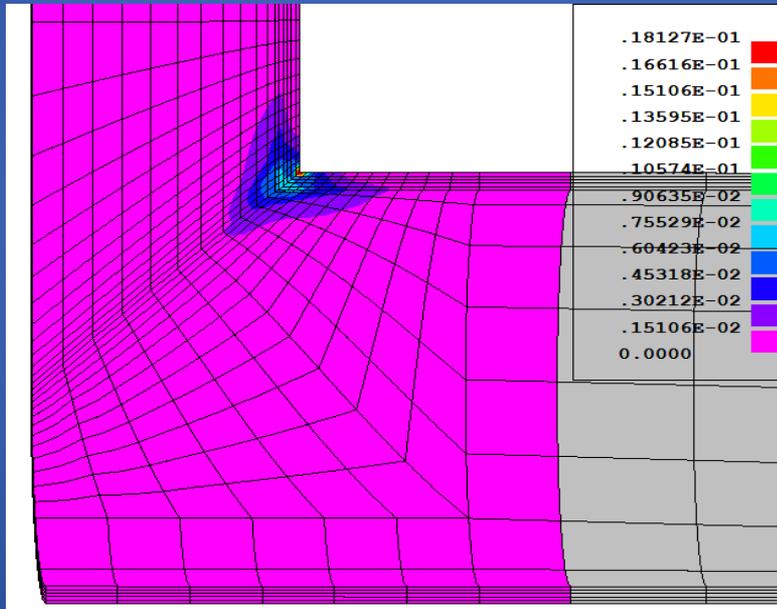
Расчет среднестенного равнопроходного тройника

Эквивалентные пластические деформации Треска

$p = 3.94$ МПа (предельное давление по интегральному критерию, первый экстремум на графике)

Внутренняя поверхность

Наружная поверхность



Максимальные пластические деформации - 1.81%

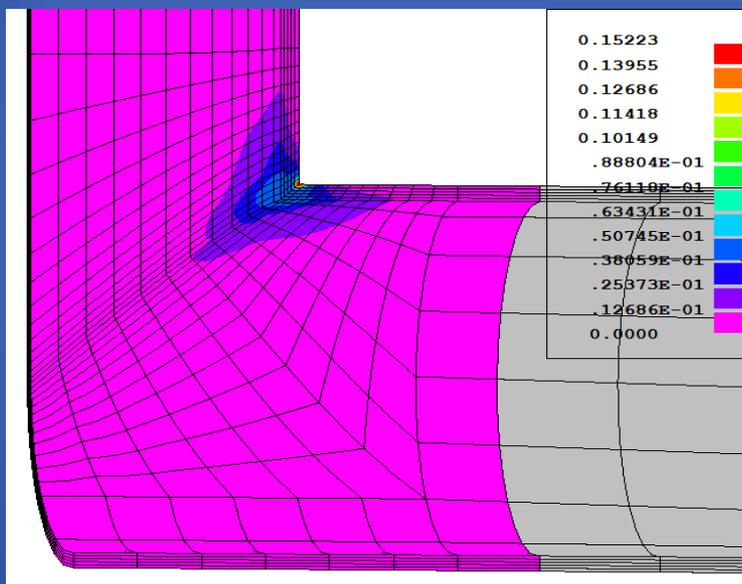


Расчет среднестенного равнопроходного тройника

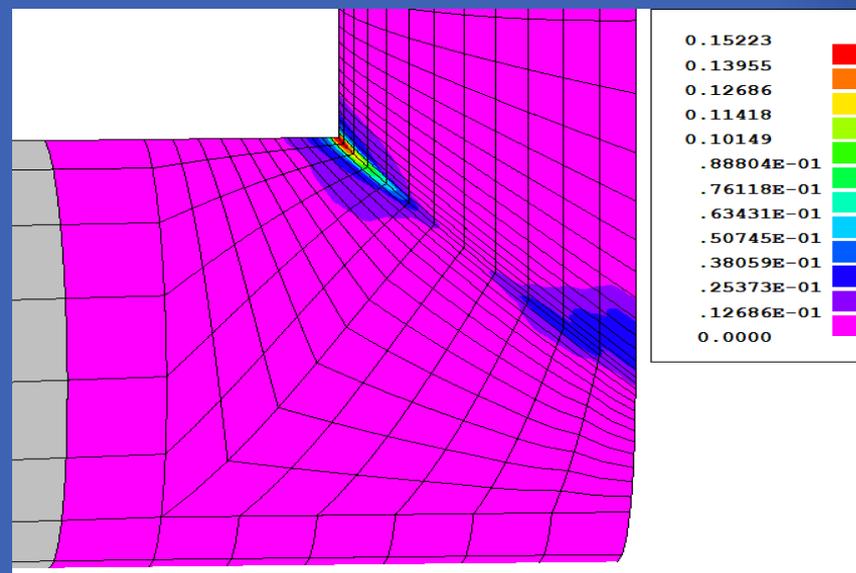
Эквивалентные пластические деформации Треска

$p = 5.16$ МПа (предельное давление по интегральному критерию, второй экстремум на графике)

Внутренняя поверхность



Наружная поверхность



Максимальные пластические деформации - 15.22%



Вариантные расчеты тройников на внутреннее давление

Отношение диаметра к толщине D/T (d/t)	Предельное давление, МПа, по критерию		
	Нормы ПНАЭ Г-7-002-86	Двойного упругого наклона	Максимума скорости изменения относительной пластической работы
Прямая труба			
25	8.333	9.459	9.427
<i>Равнопроходные тройники</i>			
100	0.342	0.431	0.524
50	0.918	1.193	1.427
25	2.432	3.371	5.299
10	8.743	12.442	17.42
<i>Неравнопроходные тройники*</i>			
100	0.596	0.4848	0.6558
50	1.534	1.3055	1.9987
25	3.875	3.5106	5.2374
10	13.008	12.62	18.220

*диаметр штуцера = 0.5 × диаметра магистрали



Вариантные расчеты тройников на совместное действие внутреннего давления и изгибающего момента в штуцере

Отношение диаметра к толщине D/t	Максимальные нагрузки		Критерий	
	Давление, МПа	Момент в штуцере, кН·м	Двойного упругого наклона	Максимум скорости изменения относительной пластической работы
Равнопроходные тройники				
100	0.75	18	0.3626	0.6639
50	2	68	0.3849	0.6077
25	6	240	0.3339	0.5536
10	15	510	0.7180	0.8922
Неравнопроходные тройники ($D=2d$)				
50	1.75	8.4	0.3876	0.7469
25	4.5	20.7	0.4141	0.8741

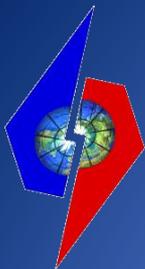


Заключение

- ✓ Интегральные/энергетические критерии не только «физичны», но и более удобны на практике, поскольку не требуют выбора деформационного параметра и контрольных узлов
- ✓ Для деталей трубопроводов со сложным НДС (тройники, отводы, ...) критерии предельной пластической нагрузки дают большие значения предельной нагрузки, чем нормативные оценки.

Дальнейшая работа

- Сопоставление с экспериментальными данными.
- Расчет с учетом геометрической нелинейности и реальной диаграммы деформирования.
- Включение в верификационный отчет при переаттестации АСТРА-АЭС



Спасибо за внимание!

Thank you for your attention!

ЗАО НИЦ СтаДуО, Москва, www.stadyo.ru