



ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА XFEM ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РОСТА И РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН

Выполнила: Лапина Е.А.

Научный руководитель: Лукин А.В.

Санкт-Петербург
2015

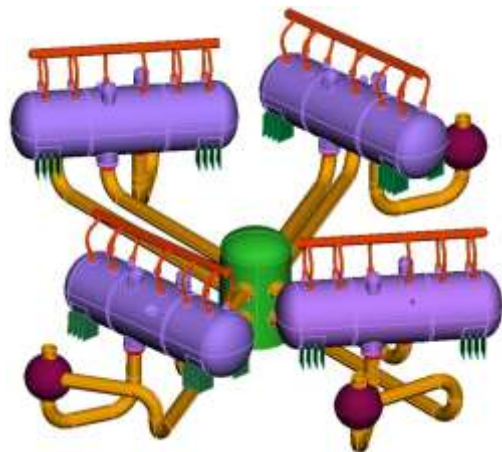


Цели работы:

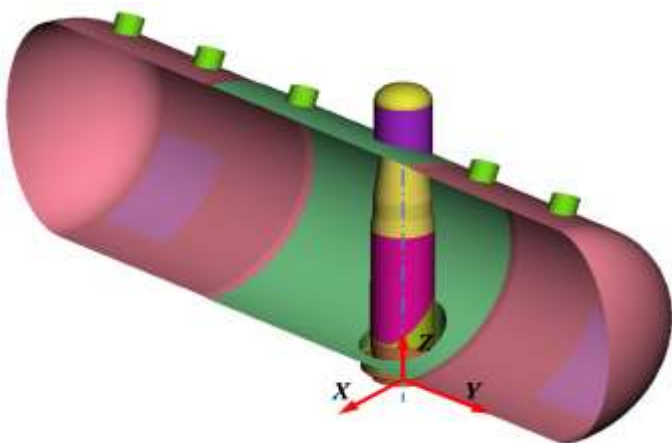
- Создание трехмерной конечно-элементной модели участка трубопровода реакторной установки с поверхностным дефектом (продольной трещиной);
- Расчет напряженно-деформированного состояния данного участка с учетом дефекта с различными граничными условиями;
- Моделирование роста и развития дефекта в участке трубы парогенератора



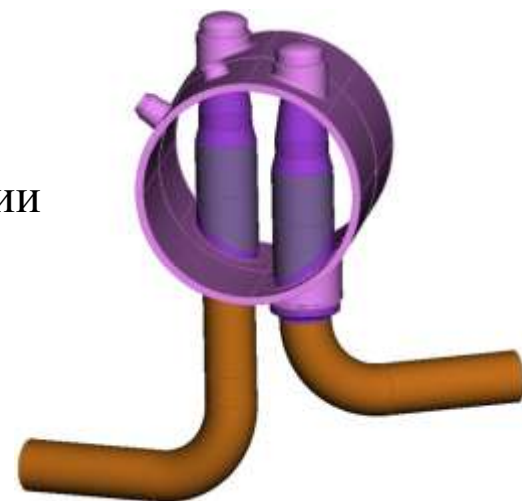
Объект исследования

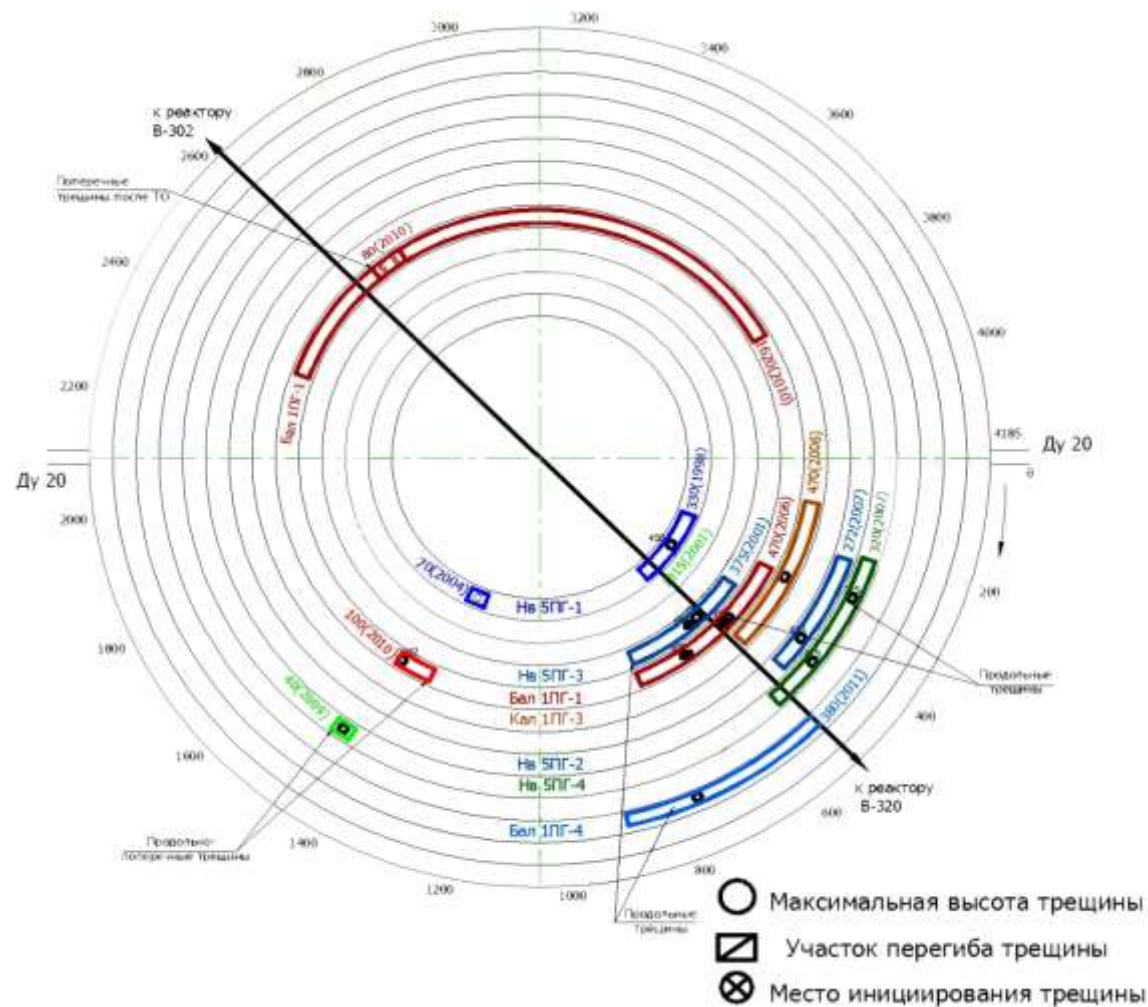


Геометрическая модель
элементов реакторной установки
модификации В-302



Геометрическая модель части
корпуса парогенератора для
реакторной установки модификации
В-302

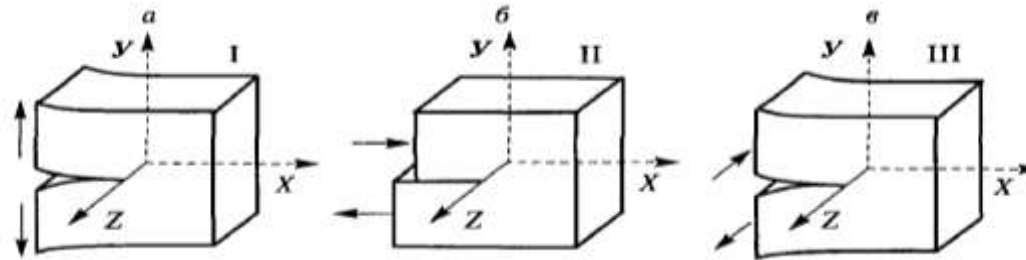




Дефектограмма повреждений узла
сопряжения коллектора с корпусом
парогенератора



Теоретические основы линейной механики разрушения



а – нормальный отрыв, б – поперечный сдвиг, в – продольный сдвиг.

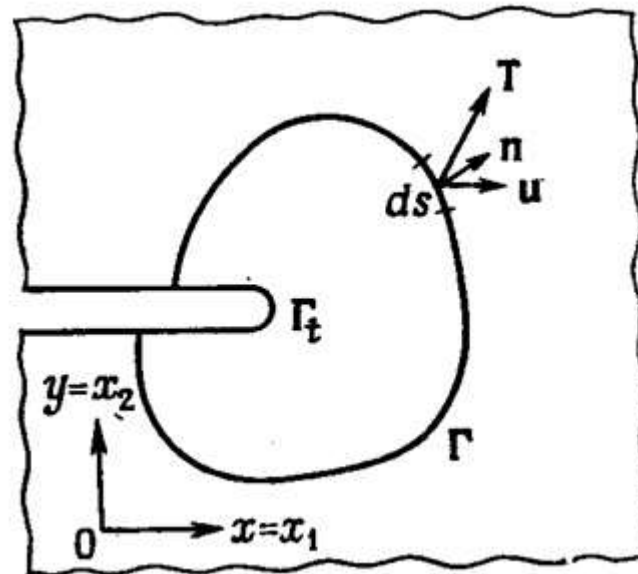
Асимптотические выражения для компонентов тензора напряжений в малой окрестности края трещины:

$$\sigma_{ij}^{I II III}(r, \theta) = \frac{K_{I II III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{I II III}(\theta) + \dots \quad (i, j = 1, 2, 3)$$



J-интеграл

Понятие J-интеграла впервые введено Райсом для исследования свойств концентрации деформаций в окрестности вершины трещины в материале, свойства которого носят нелинейный характер.



Плотность энергии деформации:

$$W = W(x, y) = W(\underline{\varepsilon}) = \int_0^{\varepsilon} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij},$$

J-интеграл возможно определить в следующем виде:

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - T \cdot \frac{du}{dx} ds \right)$$

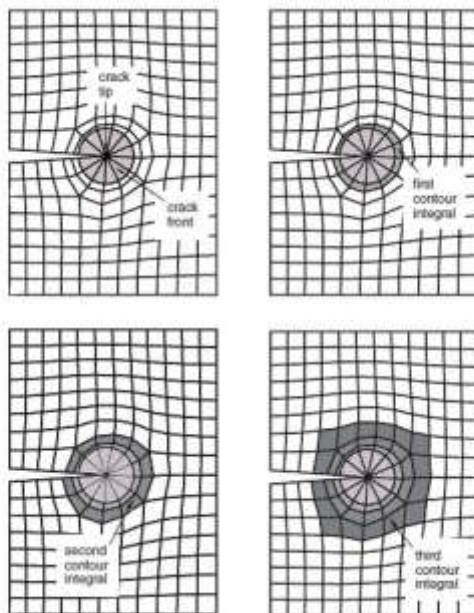
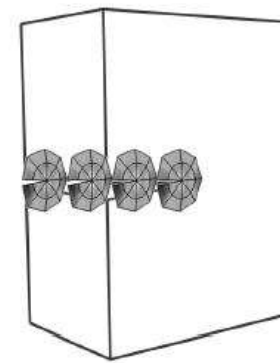
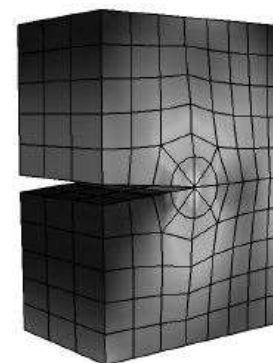
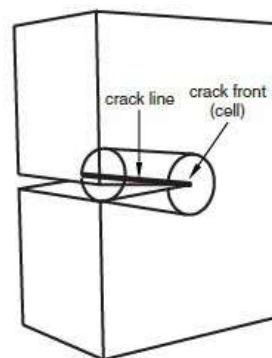
для случая маломасштабной текучести в вершине трещины:

$$G = \frac{1-\nu}{2\mu} K_I^2 + \frac{1-\nu}{2\mu} K_{II}^2 + \frac{1}{2\mu} K_{III}^2.$$

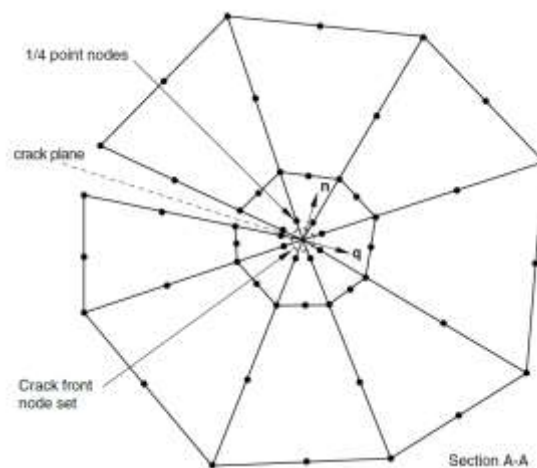


Конечно-элементное моделирование трещин: традиционный подход

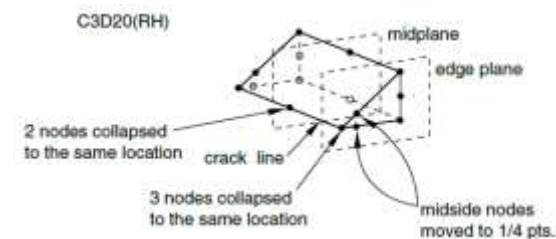
Определение фронта трещины
для вычисления КИН:



Задание контуров интегрирования:

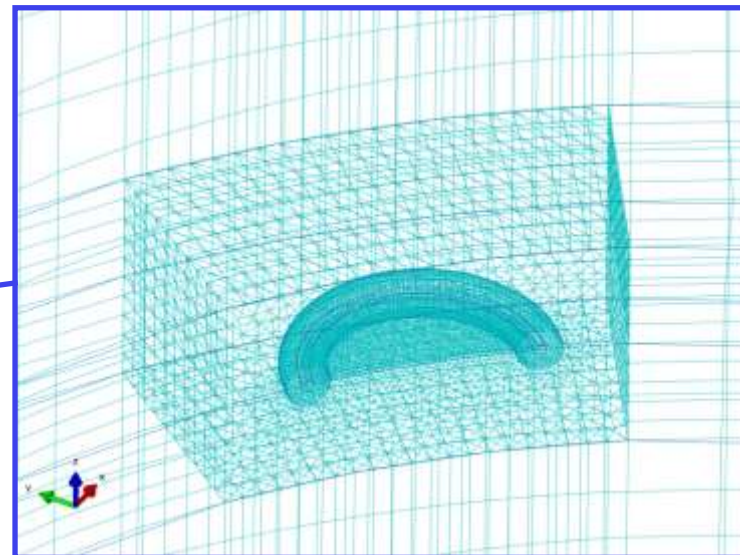
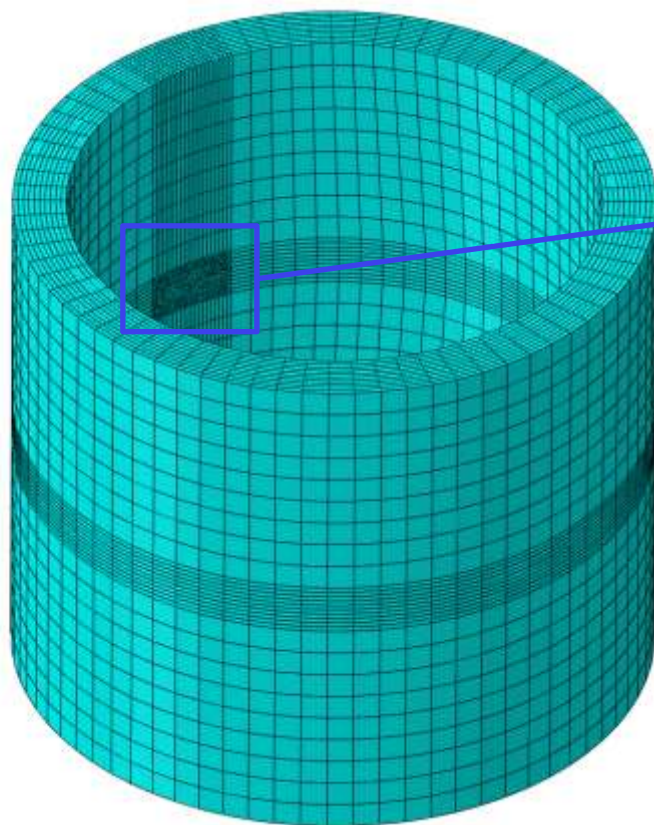


Моделирование
сингулярности поля
перемещений в окрестности
трещины:

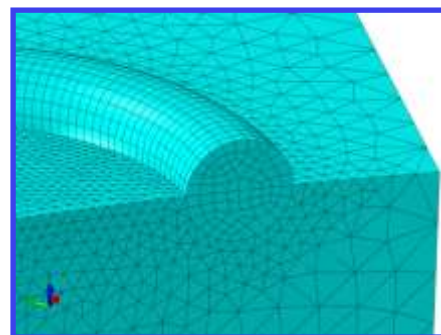
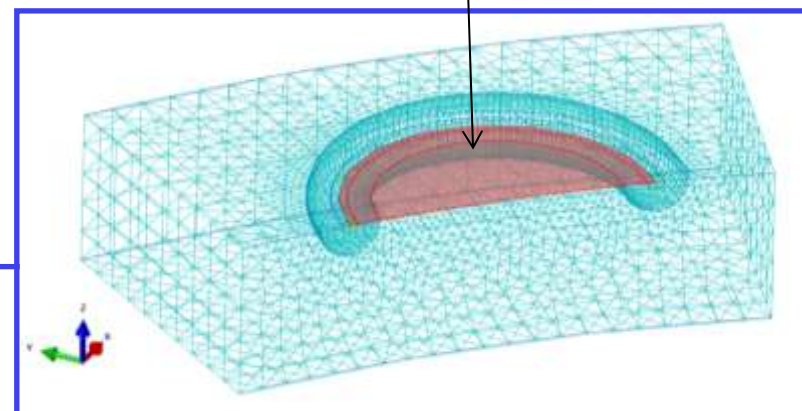




КЭ модель



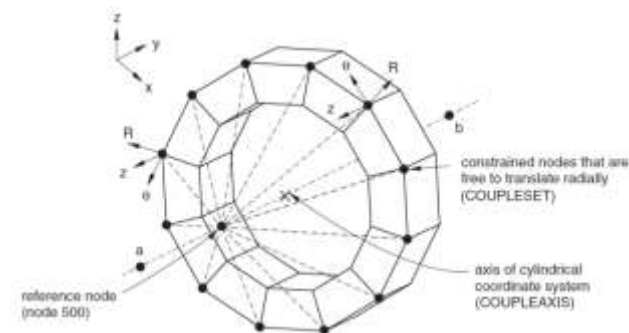
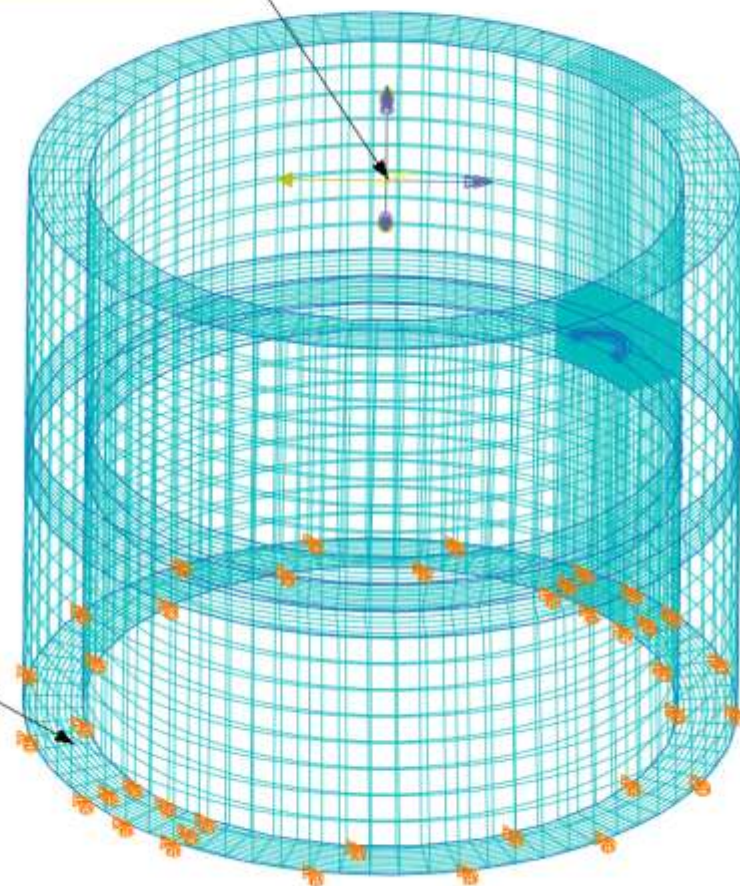
Поверхность трещины



- Параметрическая КЭ модель: возможность задания размера и ориентации дефекта

Постановка задачи

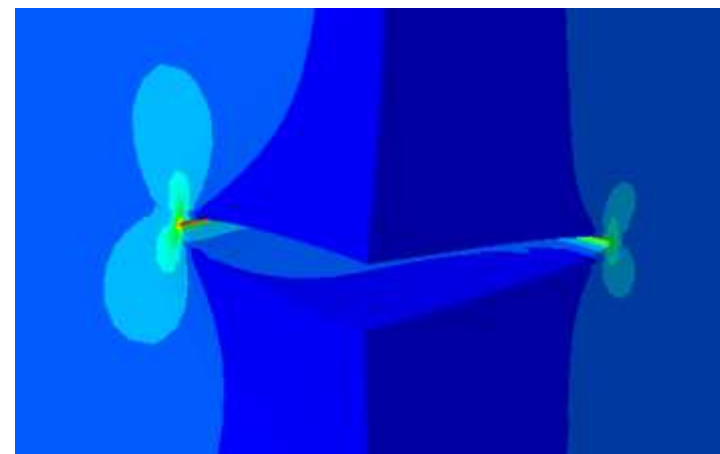
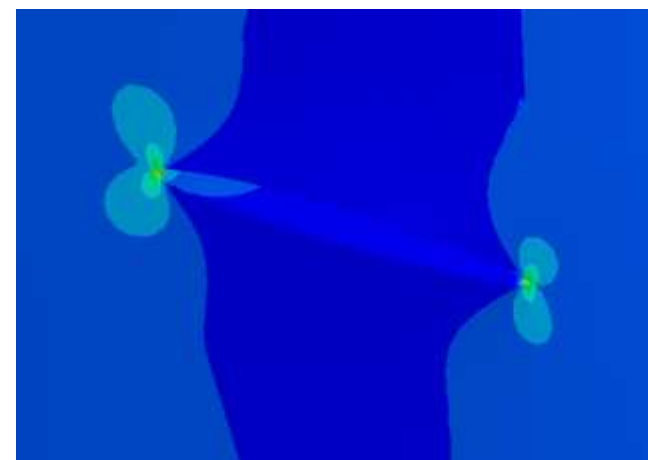
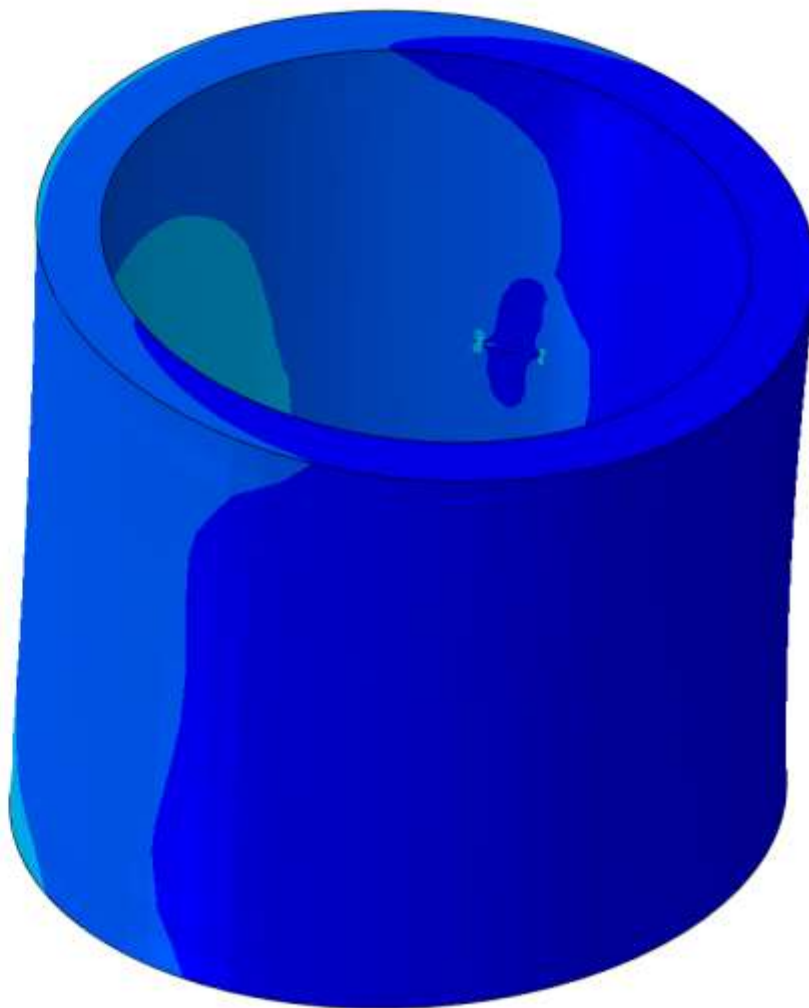
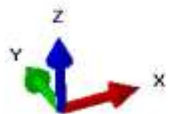
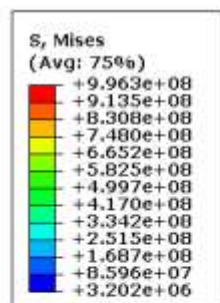
Applied Force and Moment



- Расчетные нагрузки - интегральные силовые факторы, действующие на коллекторы парогенератора со стороны трубопроводов
- Для передачи нагрузок на сечение трубопровода применяется инструмент MPC (Multi-point constraint)

Результаты расчетов

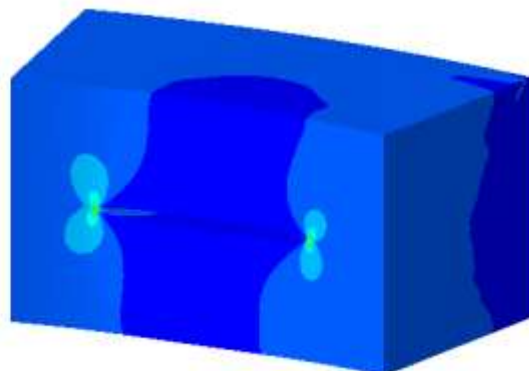
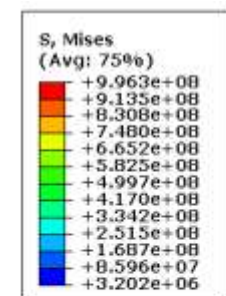
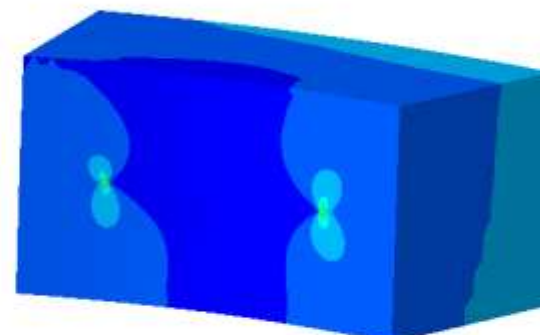
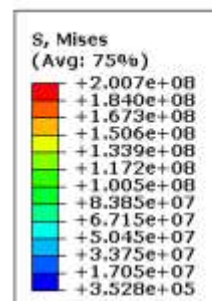
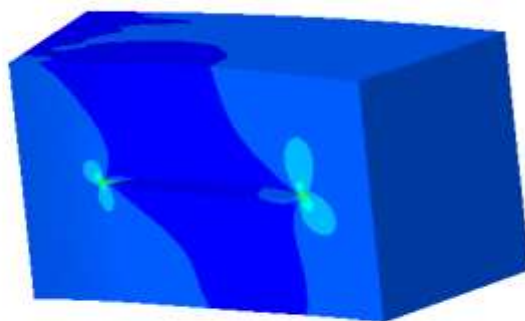
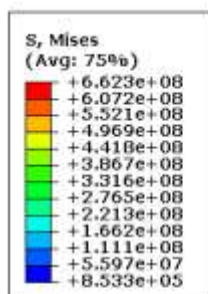
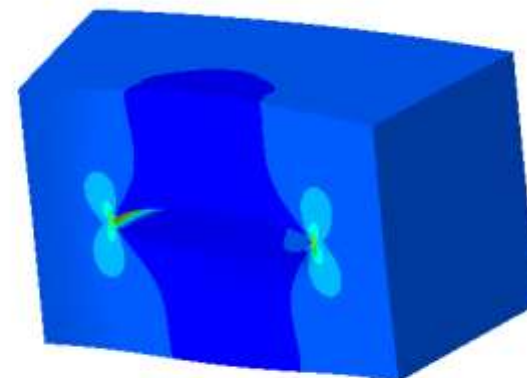
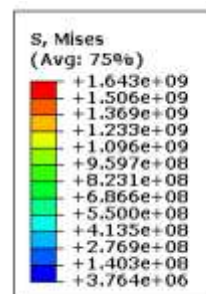
Напряженно-деформированное состояние





Результаты расчетов

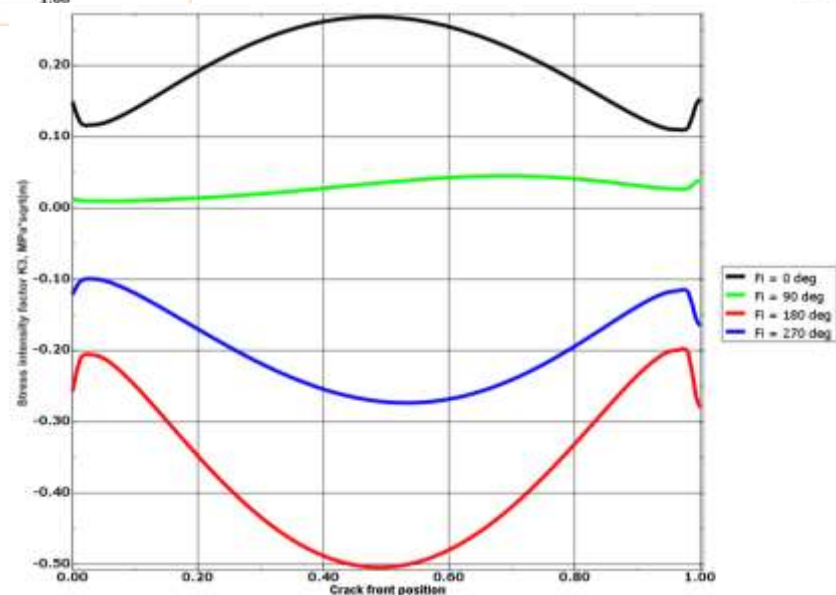
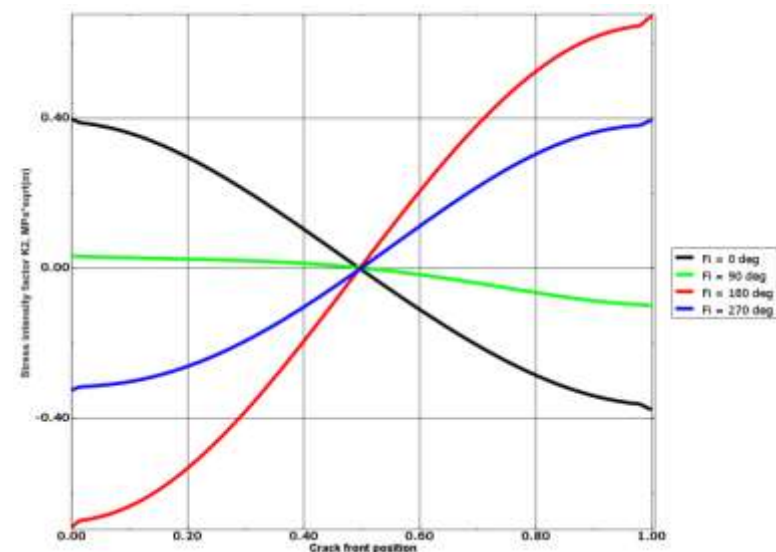
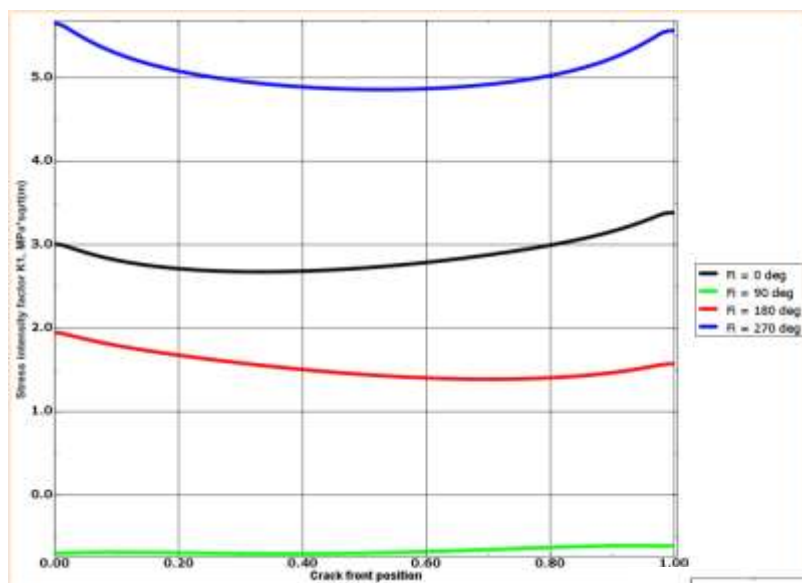
Напряженно-деформированное состояние для различной ориентации дефекта

 $\varphi = 0^\circ$  $\varphi = 90^\circ$  $\varphi = 180^\circ$  $\varphi = 270^\circ$



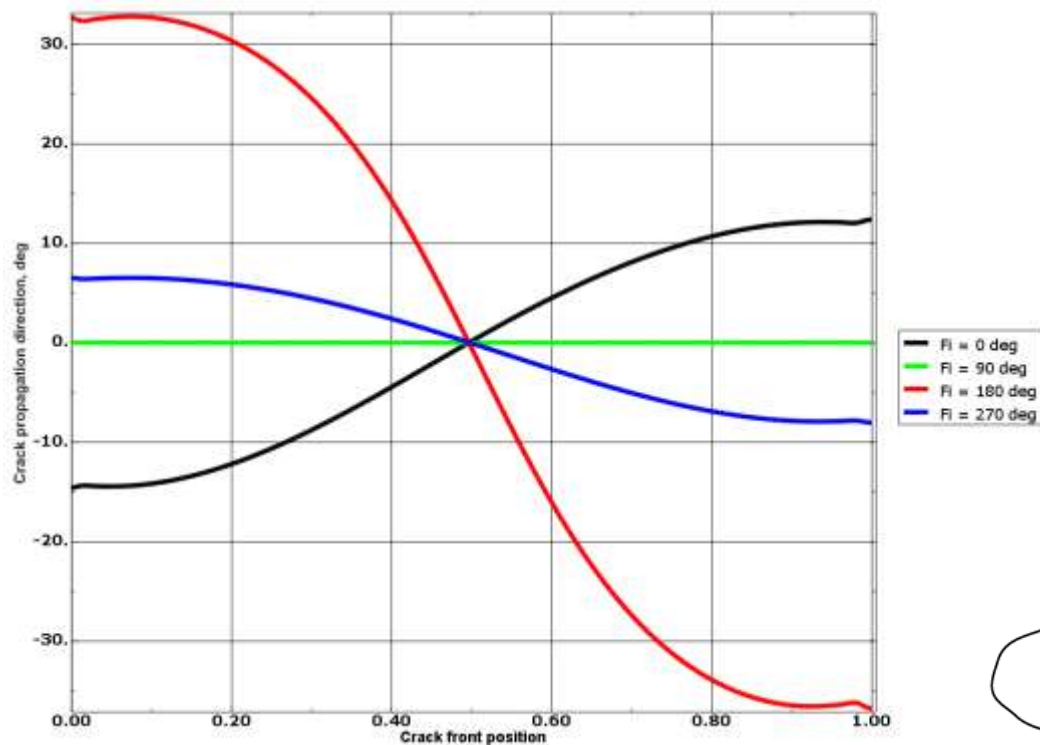
Результаты расчетов

Распределение коэффициентов концентрации напряжения по фронту трещины



- Результаты представлены для различной ориентации дефекта

Результаты расчетов

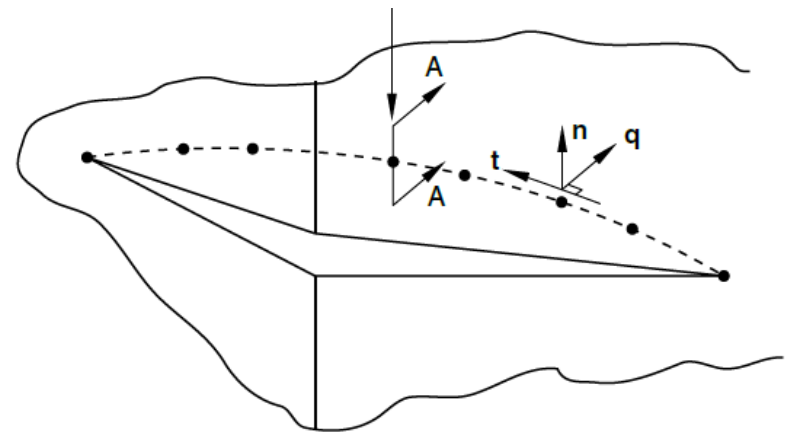


Прогнозирование направления роста трещины в соответствии с критериями

- максимальных касательных напряжений:

$$\hat{\theta} = \cos^{-1} \left(\frac{3K_{II}^2 + \sqrt{K_I^4 + 8K_I^2 K_{II}^2}}{K_I^2 + 9K_{II}^2} \right)$$

- максимальной энергии раскрытия трещины;
- критерий $K_{II} = 0$





Extended finite element method

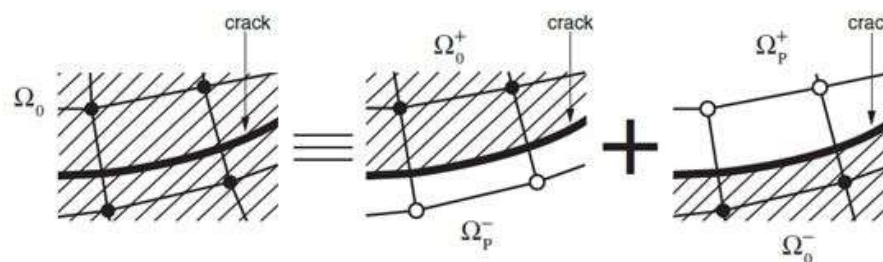
XFEM был развит в 1999 Тедом Беличко* и использовался для моделирования распространение различных дефектов

Аппроксимация вектора перемещений

$$u = \sum_{I=1}^N N_I(x) \left[\mathbf{u}_I + H(x) \mathbf{a}_I + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x) \mathbf{b}_I^{\alpha} \right]$$

● — обычные узлы
○ — фиктивные узлы

Фиктивные и действительные узлы

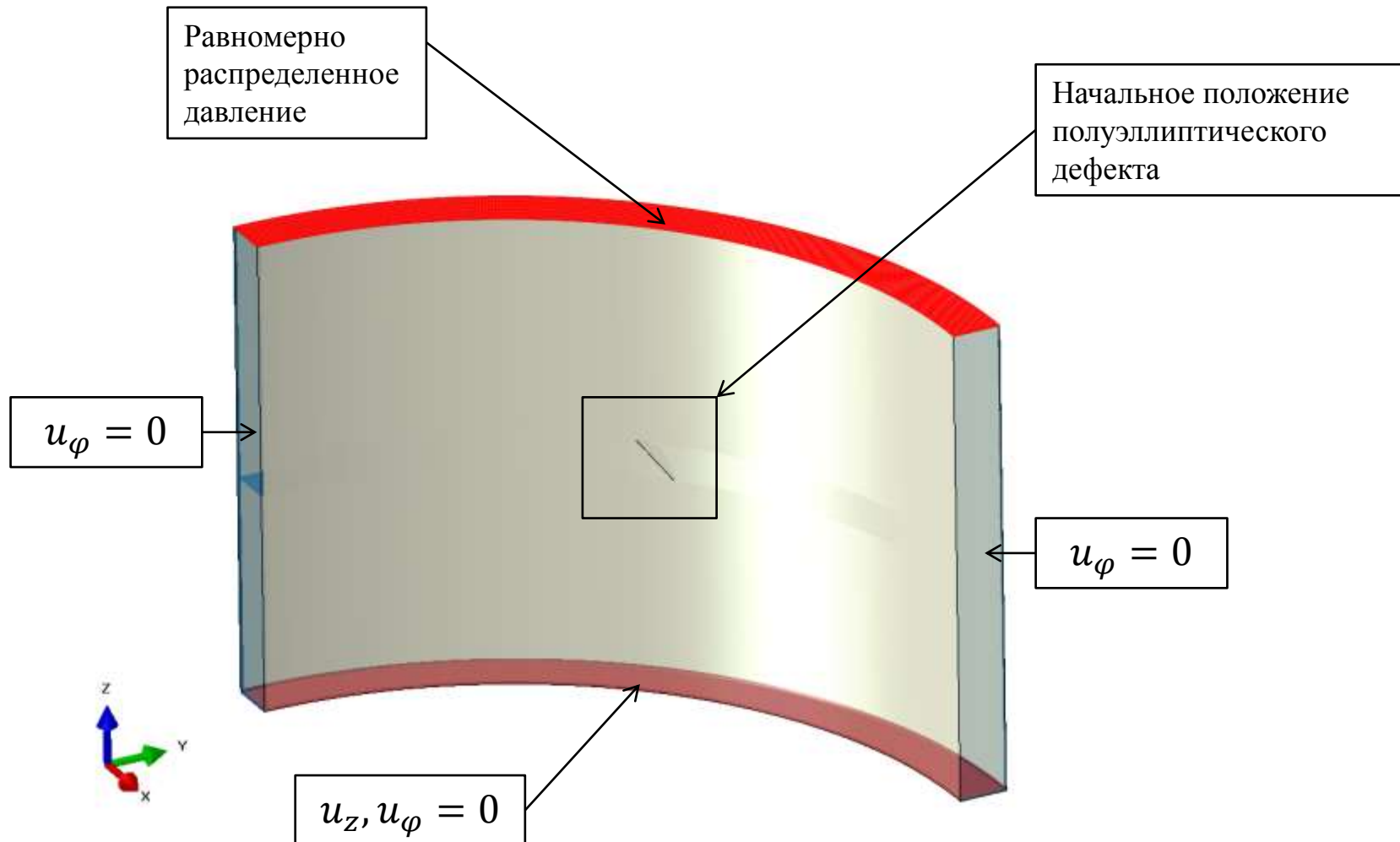


- ✓ Преимущество метода – в отсутствии необходимости перестроения КЭ сетки в процессе роста дефекта

1*. T. Belytschko, T. Black: Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Volume 45, Issue 5, pages 601–620, 20 June 1999

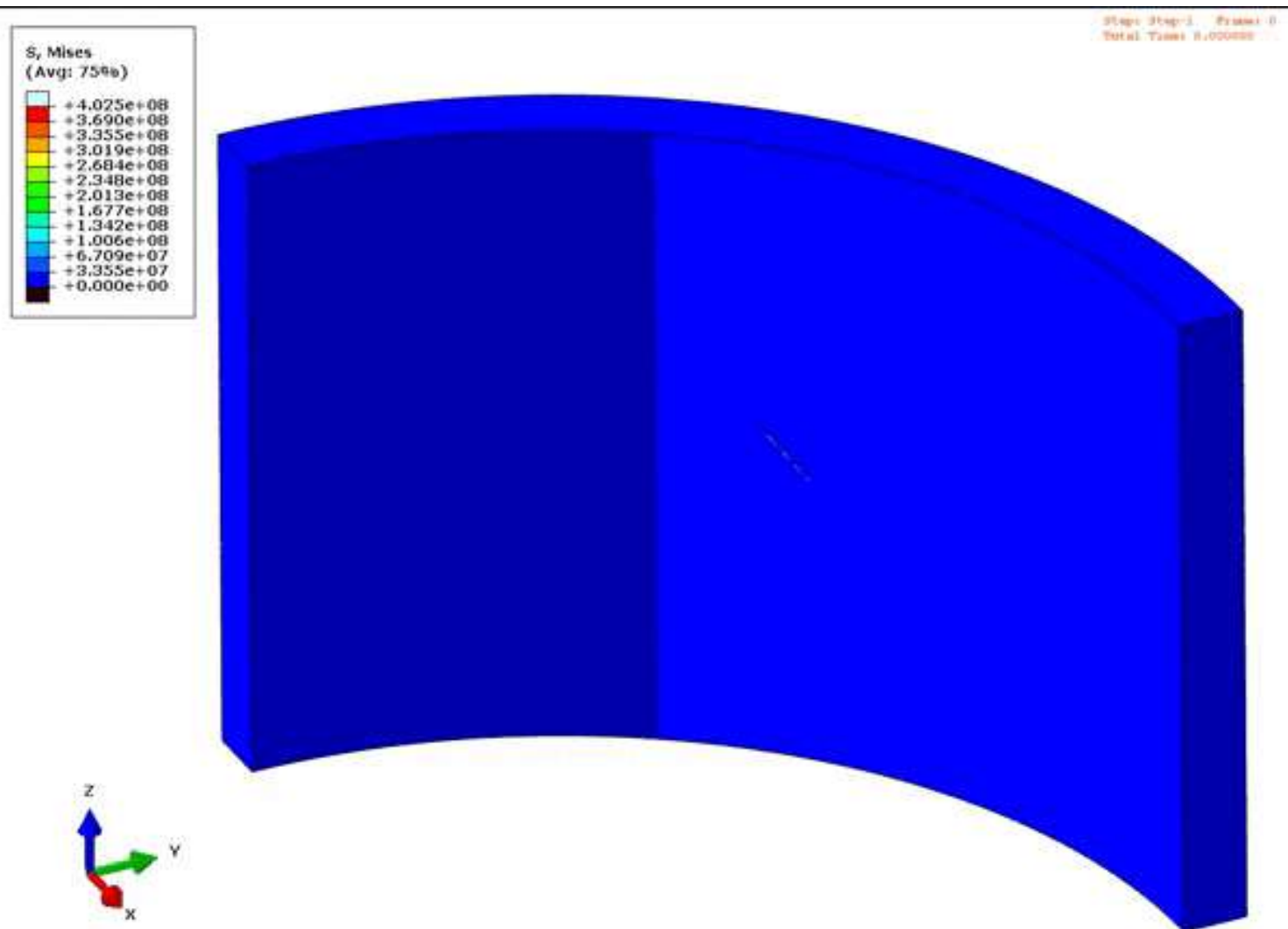


Постановка модельной задачи



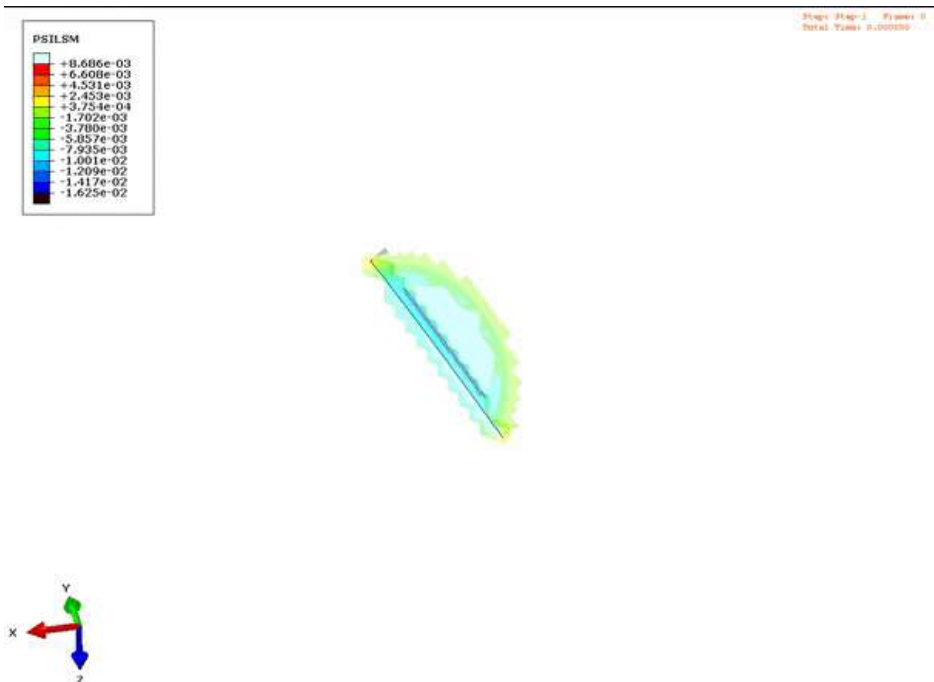


Результаты расчетов: НДС участка трубопровода

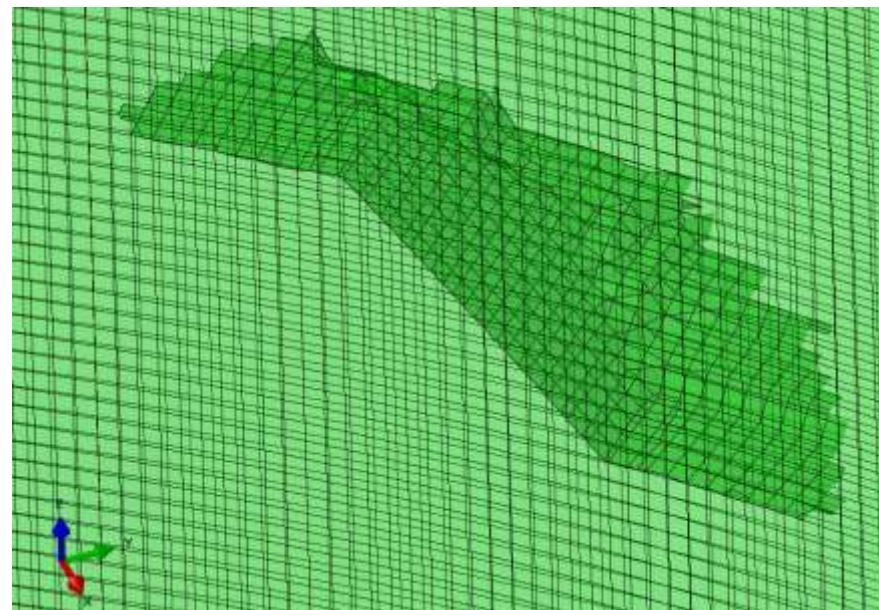


Результаты расчетов

Квазистатический рост трещины



Итоговое расположение дефекта



- Высокая степень зависимости сходимости нелинейных численных алгоритмов от настройки критериев сходимости и качества КЭ сетки
- Значительная длительность расчетов: порядка 48 часов для КЭ модели с 720 тыс. узлов

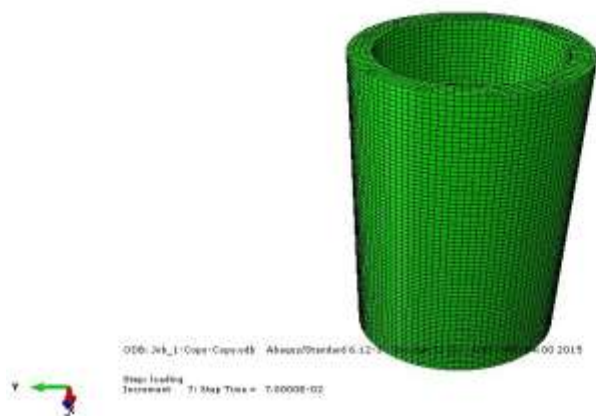
Конечно-элементная модель

КЭ модель создана с использованием ABAQUS

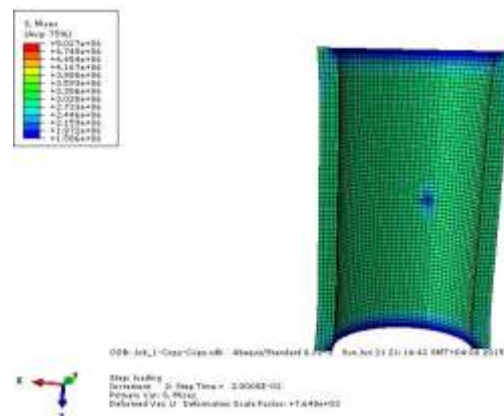
Количество узлов: 33117

Количество элементов: 26264

Марка материала	Модуль Юнга	Коэффициент Пуассона
10ГН2МФА	2.13	0.3



Конечно-элементная модель участка трубопровода



Конечно-элементная модель участка трубопровода (разрез) 19



Граничные условия

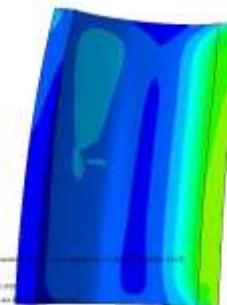
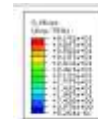
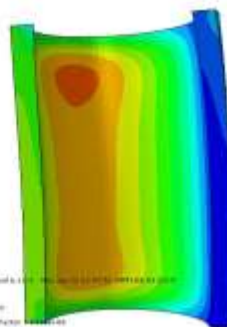
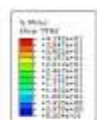
Силовые и моментные воздействия от главного циркулярного трубопровода на коллекторы парогенераторов

№ задачи	Коллектор	Режим	F_x , кН	F_y , кН	F_z , кН	M_x , кНм	M_y , кНм	$M_{изг}$, кНм	M_z , кНм
1	ГК	НУЭ	-402	-211	2422	26	191	193	- 1057
	ХК	НУЭ	25	950	2721	- 1521	-159	1529	-216
2	ХК	ГИ	168	-32	3606	27	360	361	102
	ГК	ГИ	-220	-150	3453	-13	218	219	-537
3	ХК	ГИ	-67	-42	3619	39	418	420	106
	ГК	ГИ	-337	-154	3456	-11	201	202	-539



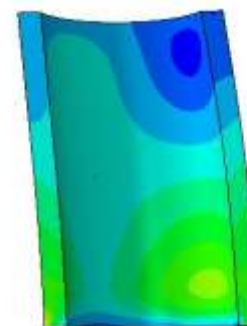
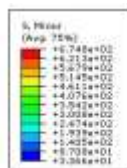
Результаты работы

1.



• Напряженно-деформированное состояние

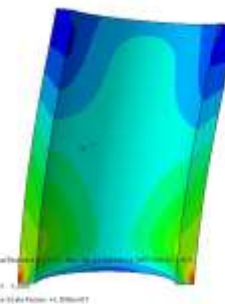
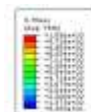
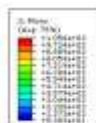
2.



Сечение без дефекта

Сечение с дефектом

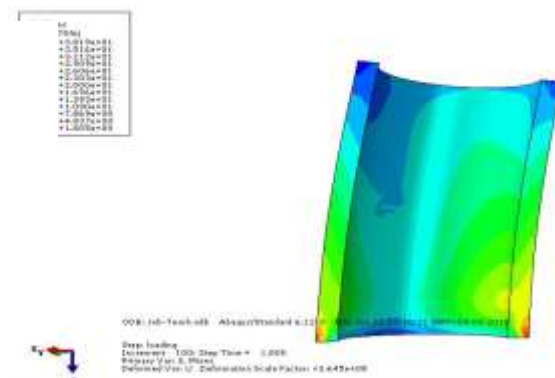
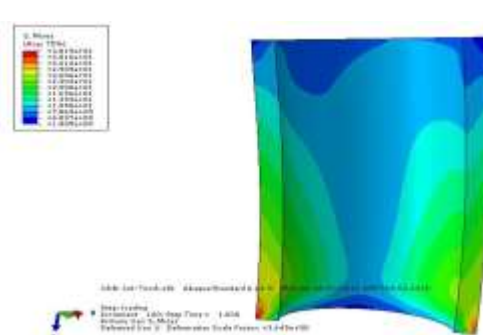
3.





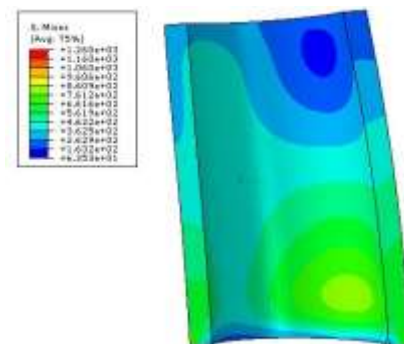
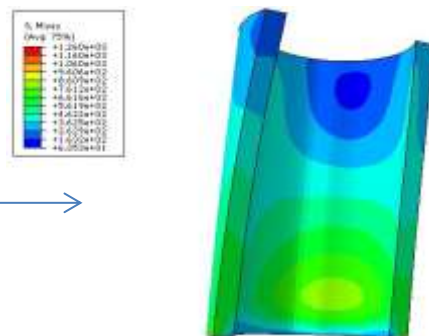
Результаты работы

4.



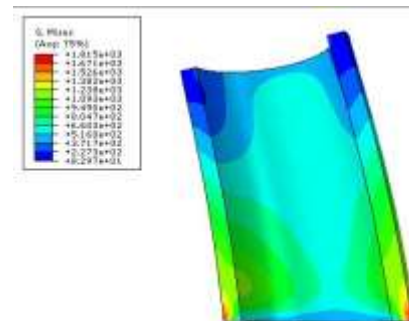
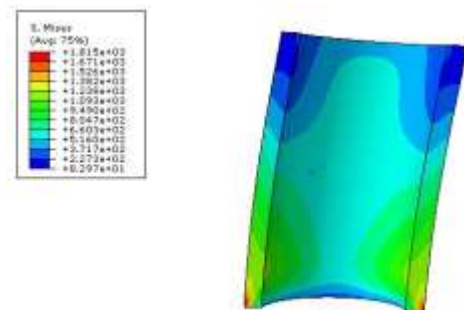
5.

Сечение без
дефекта



Сечение с
дефектом

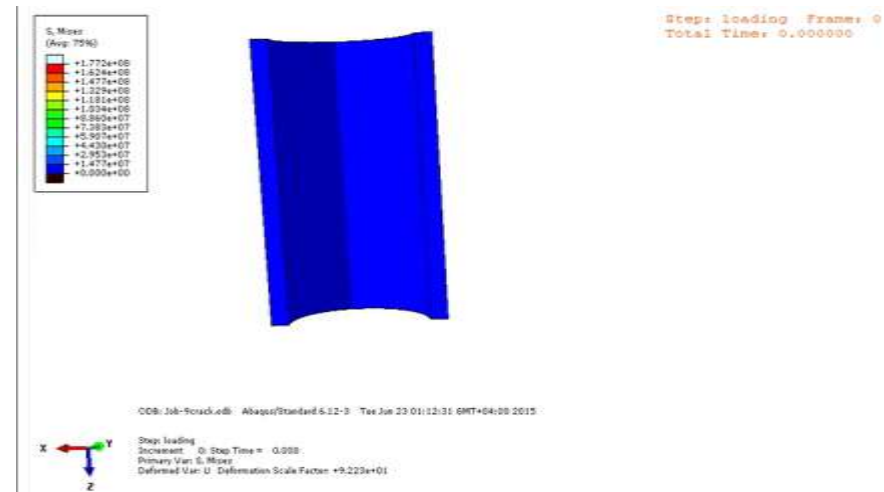
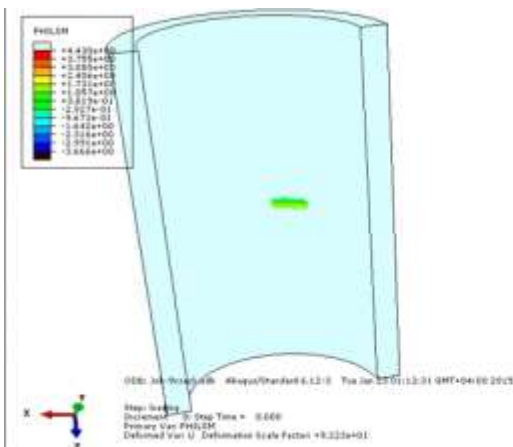
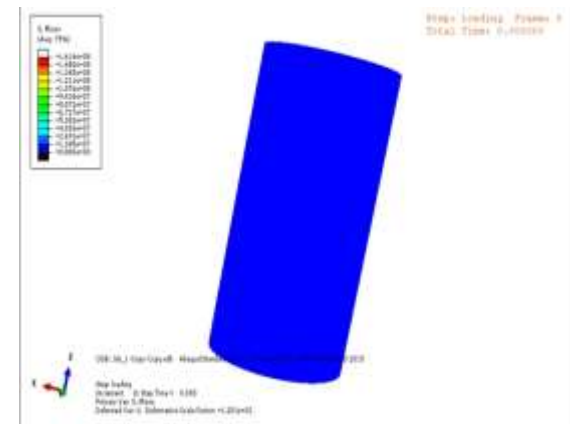
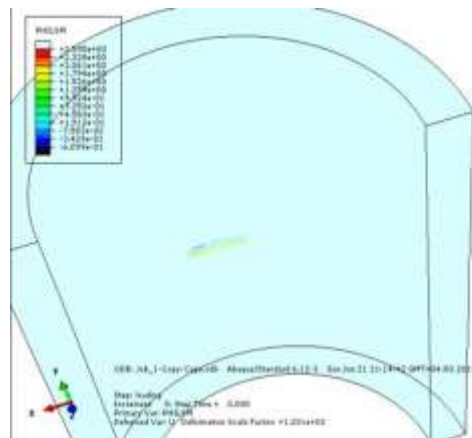
6.





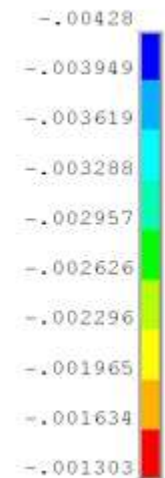
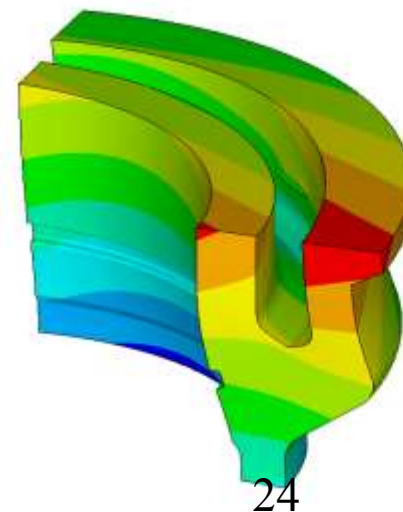
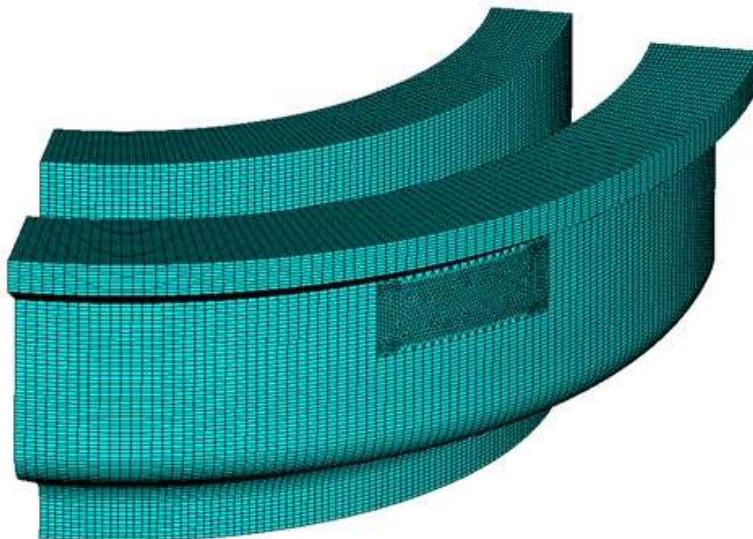
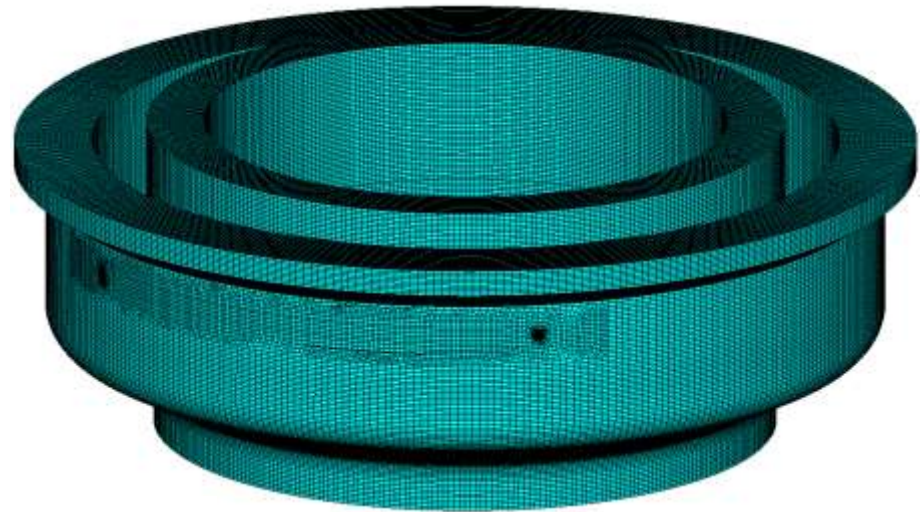
Результаты работы

Моделирование развития дефекта с использованием xFEM



Дальнейшие направления работы

- Применение метода XFEM к расчету параметров механики разрушения узла сопряжения коллектора с корпусом парогенератора со сквозной трещиной;
- Изучение прямых численных методов (на основе XFEM) расчета малоциклового усталости УСКП





Спасибо за внимание!