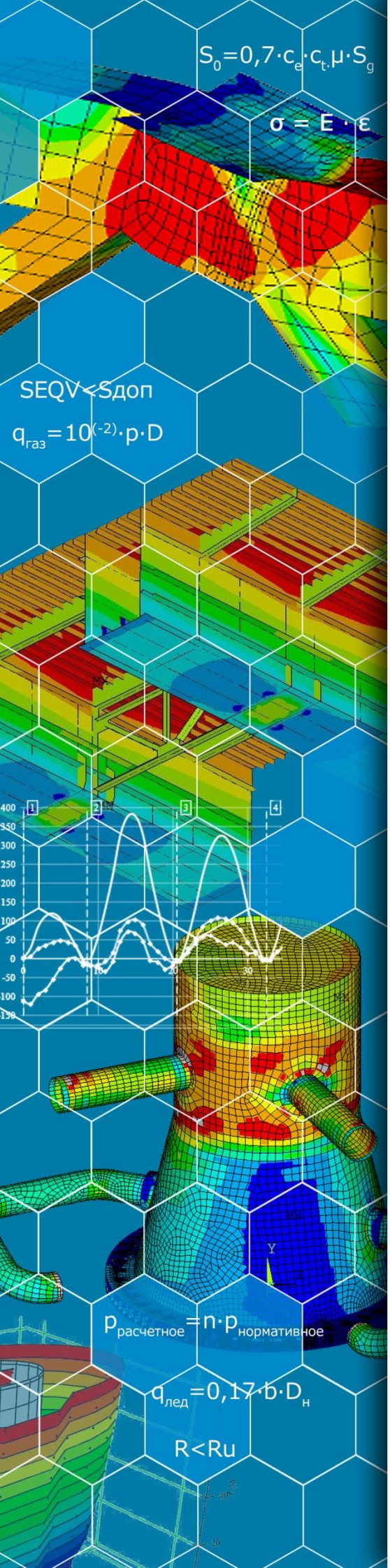


Анализ напряженно-деформированного состояния торосферического днища

В данной работе произведен расчет и анализ составляющих напряжений в торосферическом днище (рис. 1) ректификационной колонны, применяемой на нефтеперерабатывающих заводах.

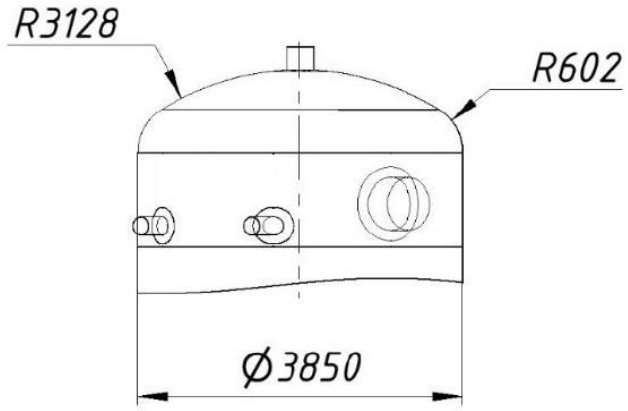


Рис. 1. Геометрия днища

1) Теоретический анализ напряжений

При расчете тонкостенных оболочек по распространенной безмоментной теории, главными напряжениями являются:

$\sigma_1 > 0$ – кольцевые (тангенциальные);

$\sigma_2 > 0$ – продольные (меридиональные);

$\sigma_3 = 0$.

Тогда эквивалентные напряжения $\sigma_{экв}$ по III теории прочности (или теория Мора для пластичных материалов, одинаково работающих на растяжение и сжатие):

$$\sigma_{экв1} = \sigma_1 - \sigma_3$$

учитывая, что $\sigma_3 = 0$:

$$\sigma_{экв1} = \sigma_1$$

В торосферическом днище кольцевые напряжения на торовом участке отрицательны* (рис. 2), поэтому главные напряжения равны:

$\sigma_1 > 0$ – продольные (меридиональные);

$\sigma_2 = 0$;

$\sigma_3 < 0$ – кольцевые (тангенциальные).

Соответственно эквивалентные напряжения будут равны:

$$\sigma_{экв2} = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_1 + |\sigma_3|$$

Как следствие, на торовом участке:

$$\sigma_{экв2} > \sigma_{экв1}$$

**Подробный аналитический расчет приведен в учебном пособии Погорелов В.И. “Строительная механика тонкостенных конструкций” [1] (рис. 2).*

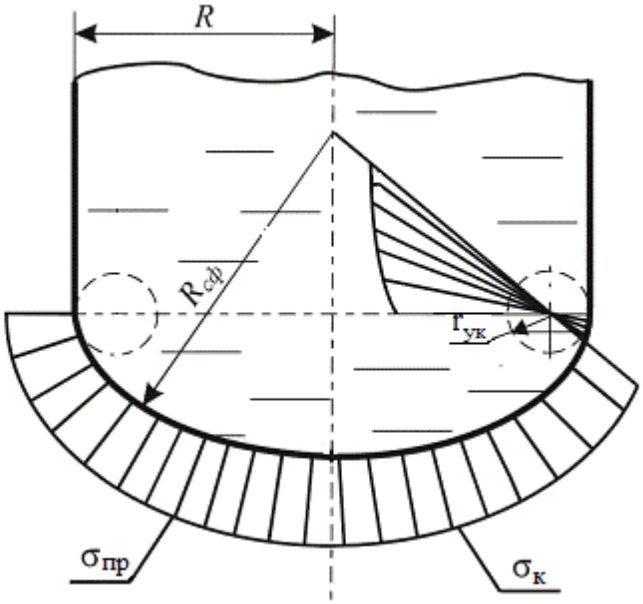


Рис. 2. Эпюры напряжений в торосферическом днище, заполненном жидкостью
, где
R – радиус обечайки;
$R_{сф}$ – радиус кривизны сферической части днища;
$r_{ук}$ – радиус кривизны торовой части днища;
$\sigma_{пр}$ – продольные (меридиональные) напряжения;
$\sigma_{к}$ – кольцевые (тангенциальные) напряжения.

Из построенных эпюр можно видеть, что меридиональные напряжения всегда положительные, а тангенциальные напряжения положительные на сферическом участке днища и отрицательные на торовом [1].

Вывод:

В торосферических днищах на торовом участке присутствует пояс повышенных эквивалентных напряжений.

2) Расчетное распределение перемещений

Для анализа распределения **перемещений**, в универсальной программной системе конечно-элементного анализа ANSYS была построена твердотельная расчетная модель торосферического днища (SOLID186) в соответствии с размерами, указанными на рис. 1, и произведен расчет при внутреннем давлении 2,6 МПа.

Карта распределения суммарных перемещений представлена на рис. 3.

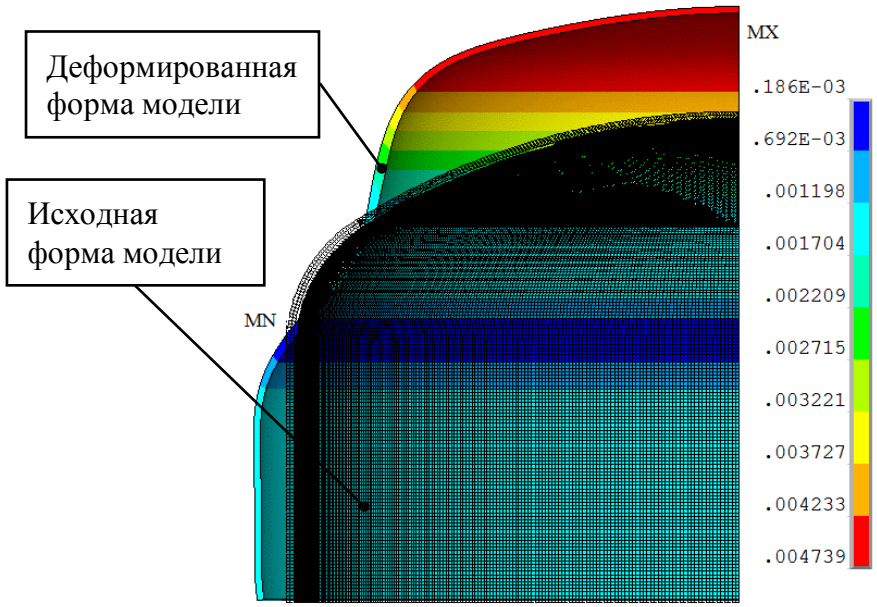


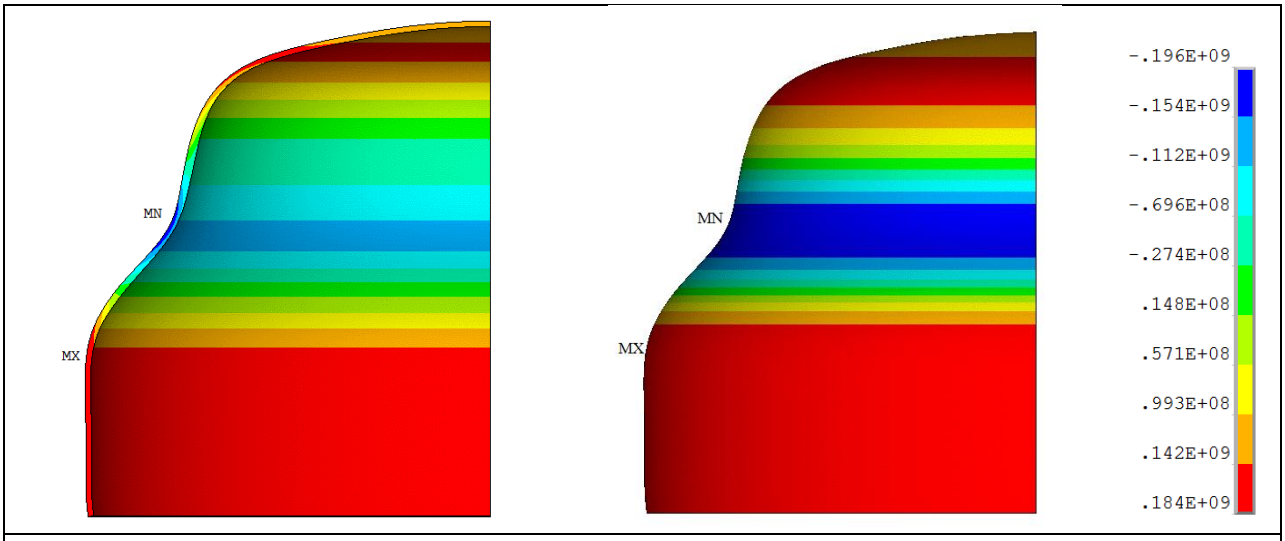
Рис. 3. Карта распределения суммарных перемещений (масшт. коэф. 100), [м]

Вывод:

Перемещения различных участков торосферического днища неодинаковы и неравномерны.

3) Расчетное распределение кольцевых и эквивалентных напряжений

Для анализа распределения **кольцевых напряжений** приведены соответствующие карты распределения для внутренней и внешней поверхности торосферического днища (рис. 4).



а) внутренняя поверхность б) внешняя поверхность

Рис. 4. Карты распределения кольцевых напряжений (масшт. коэф. 100), [Па]

Вывод:

На торовом участке возникают сжимающие кольцевые напряжения, что совпадает с теоретическим анализом напряжений, приведенным в п.1.

Для анализа распределения **эквивалентных напряжений** была построена поверхностная расчетная модель (SHELL181).

Карта распределения эквивалентных напряжений с равномерно усредненными по толщине значениями представлена на рис. 5.

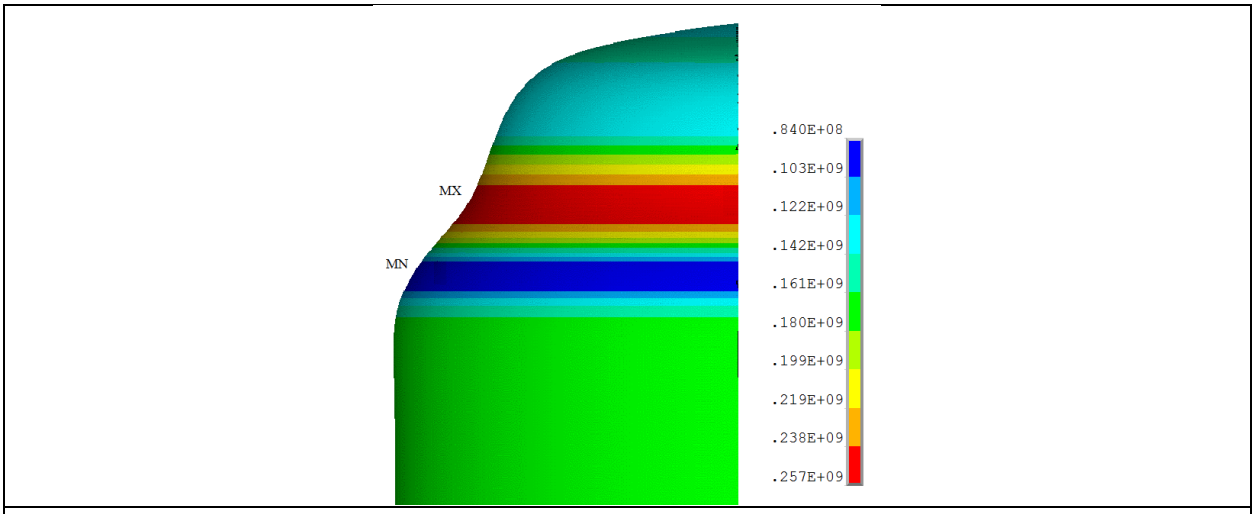


Рис. 5. Карта распределения эквивалентных напряжений (масшт. коэф. 100), [Па]

Вывод:

На торовом участке возникают максимальные эквивалентные напряжения, что совпадает с теоретическим анализом напряжений, приведенным в п. 1.

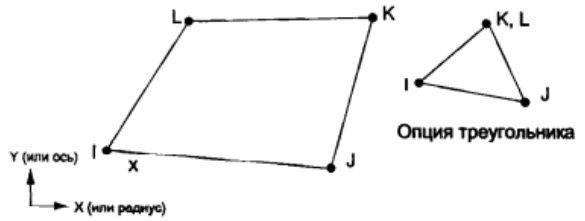
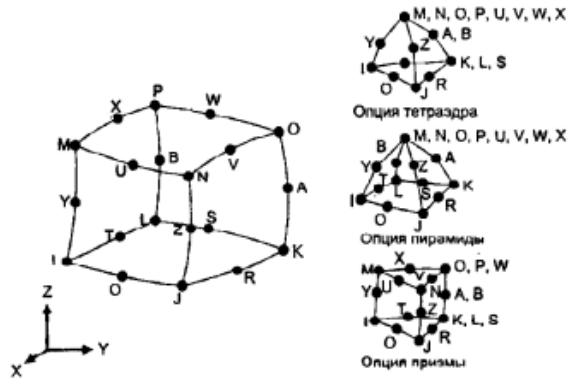
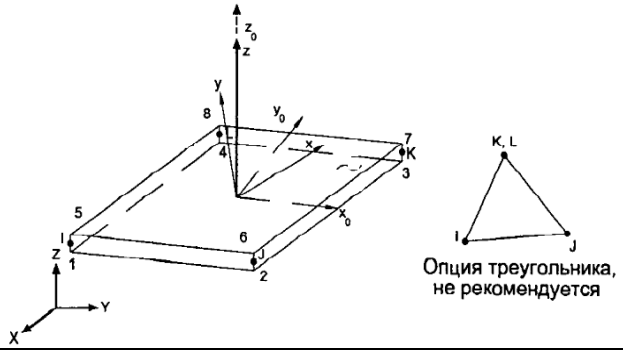
4) Сравнение результатов расчета различных расчетных моделей

Для сравнения различных расчетных моделей были построены и рассчитаны следующие модели:

плоскостная (PLANE182);
поверхностная (SHELL181);
объемная (SOLID186).

При импортировании в ANSYS расчетные модели была построена с использованием конечных элементов, представленных в табл. 1.

Таблица 1. Типы конечных элементов

	Геометрия элемента	Моделирование
PLANE182		объемных конструкций, плоского деформированного и осесимметричного состояния
SOLID186		тонкостенных конструкций, т.к. имеет дополнительные узлы в серединах ребер
SHELL181		оболочек с малой или умеренной толщиной в нелинейных задачах с большими поворотами и деформациями

Карты распределения главных и эквивалентных напряжений на торовом участке представлены на рис. 6.

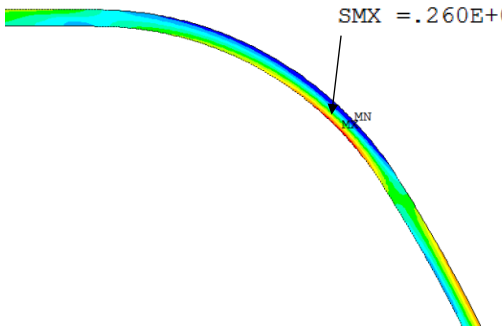
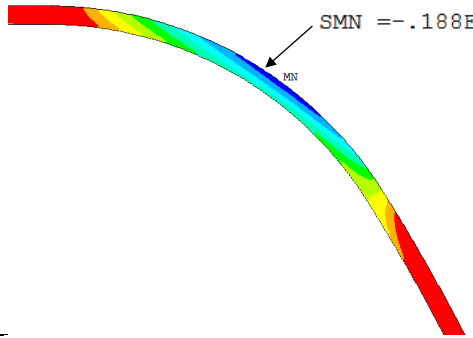
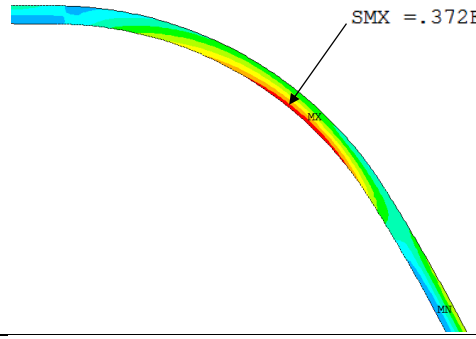
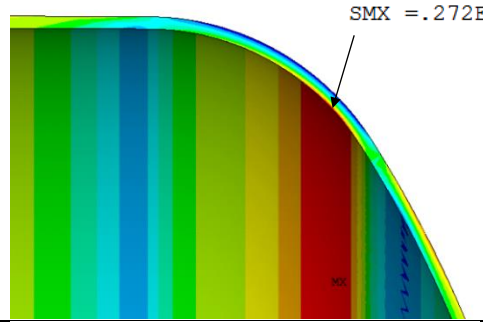
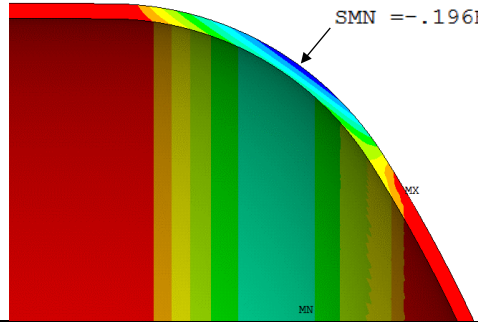
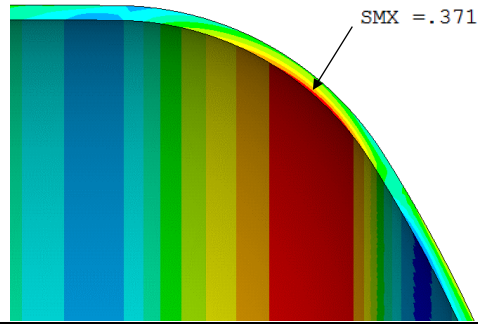
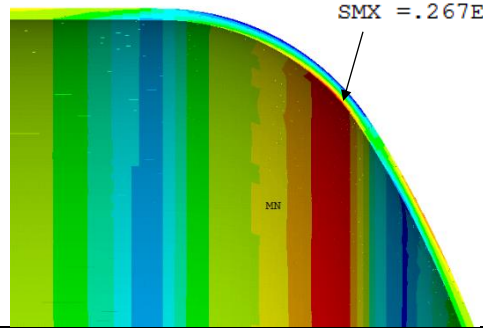
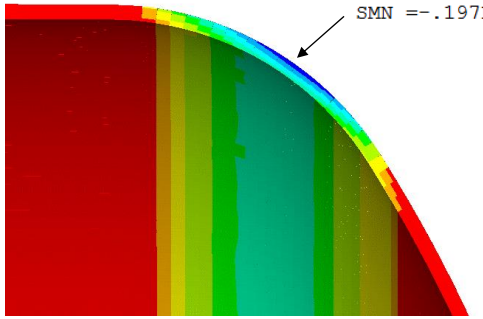
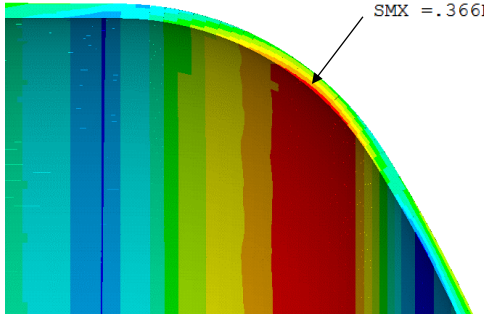
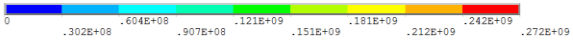
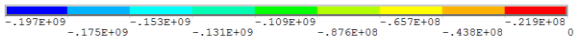
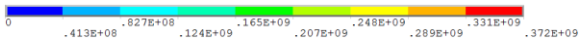
Модель	Первые главные	Третьи главные	Эквивалентные
PLANE182			
SOLID186			
SHELL181			
			

Рис. 6. Карты распределения напряжений (масшт. коэф. 1), [Па]

Принимая, что плоскостная модель наиболее точно отражает распределение напряжений в оболочке (т.к. имеет наибольшее количество элементов по толщине), оценим результаты расчета объемных моделей по сравнению с ней.

Рассчитанные погрешности, полученных максимальных и минимальных напряжений, относительно принятых эталонных напряжений плоскостной модели, сведены в табл. 2.

Таблица 2. Погрешность результатов, %

Модель	Первые главные напряжения	Третьи главные напряжения	Эквивалентные напряжения
SOLID186	4,6	4,3	0,3
SHELL181	2,7	4,8	1,6

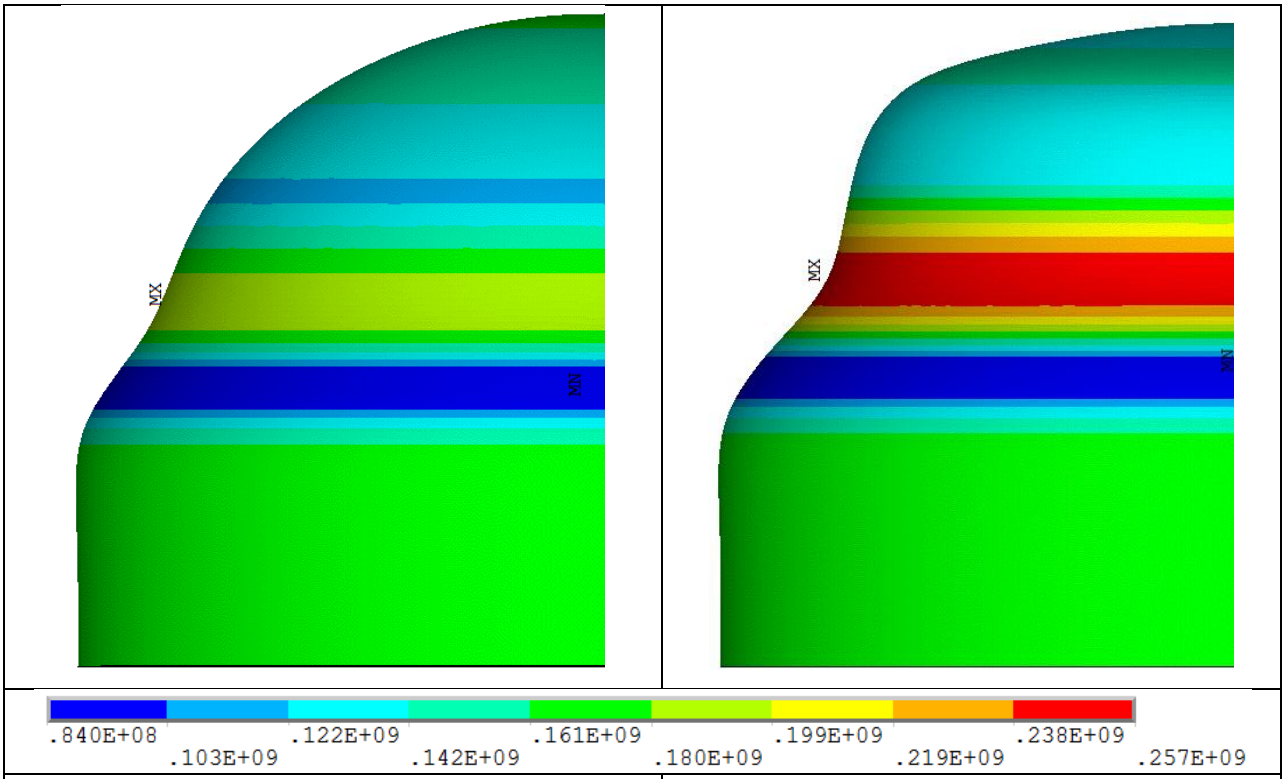
Учитывая, что максимальная погрешность составила 4,8%, возможно использование любой расчетной модели из приведенных.

Выводы:

При моделировании больших тонкостенных конструкций целесообразно использовать модель SHELL181, поскольку она отражает достаточно точное распределение напряжений в оболочке и требует значительно меньше времени для проведения расчета.

5) Сравнение напряжений в эллиптическом и торосферическом днищах

Для сравнения напряжений в эллиптическом и торосферическом днищах одинакового диаметра при одинаковом внутреннем давлении, были построены соответствующие карты распределения эквивалентных напряжений (рис. 7).



Эллиптическое днище	Торосферическое днище

Рис. 7. Карта распределения эквивалентных напряжений (масшт. коэф. 100), [Па]

Максимальные эквивалентные напряжения составили в:
эллиптическом днище – 199 МПа;
торосферическом днище – 257 МПа.

Вывод:
Напряжения в торосферическом днище выше чем в эллиптическом на 29%.