

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
РЕАКЦИОННОЙ КОЛОННЫ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА
В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Бердин В.К., Закирничная В.К., Кириллова Н.Ю.

На основании результатов экспериментальных исследований и численного моделирования установлено, что конструктивные особенности реакционной колонны, а также изменение механических свойств материала в процессе длительной эксплуатации оказывают существенное влияние на напряженное состояние аппарата.

On the basis of results of experimental researches and numerical modeling it is established, that design features of a reaction column and a change of mechanical properties of a material during continuous operation essentially influence the stressed condition of the device.

Развитие техники ставит новые задачи в области исследования работоспособности машин и их элементов. Повышение их надежности и долговечности, являясь важнейшим фактором, определяющим рост конкурентоспособности изделий, связано с достоверным определением "опасных" мест конструкции. Наиболее эффективным широко используемым современным средством достижения поставленной цели является использование метода конечных элементов [1].

Метод конечных элементов является мощным и надежным средством исследования поведения конструкций в условиях разнообразных воздействий. В настоящее время имеется большое количество комплексов метода конечных элементов, в том числе ANSYS. Этот продукт относится к категории программного обеспечения, применяемого при проектировании машиностроительных, строительных и других конструкций. Особенностью ANSYS является чрезвычайно широкий спектр задач, которые он в состоянии решать. Сюда входят задачи расчетов на прочность (как линейные, так и нелинейные), теплообмена, гидродинамики, смешанные и даже акустики [2].

Математическое моделирование широко применяется при оценке изменении несущей способности конструкций, прочности и устойчивости сосудов и аппаратов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств,

эксплуатирующихся продолжительное время. Обеспечение надежной и безопасной работы нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий с каждым годом становится все более актуальным, так как большое количество оборудования отработало свой назначенный расчетный срок службы, и значительная его часть достигла физического износа [3]. Однако, при выполнении прочностных расчетов сосудов и аппаратов по методикам, изложенным в нормативно-технической документации, не учитывается, что в процессе их длительной эксплуатации происходит изменение механических характеристик металла, в том числе охрупчивание, изменение структуры и фазового состава [4].

Поэтому в данной работе изучение напряженного–деформированного состояния аппарата методом конечных элементов проводилось с учетом изменения свойств материала в процессе длительной эксплуатации, его конструктивных особенностей и влияния собственного веса (гравитации).

В качестве объекта исследования была выбрана реакционная колонна одного из нефтеперерабатывающих предприятий, изготовленная из углеродистой стали 20 с антикоррозионным медным покрытием. Сталь 20 является качественной машиностроительной углеродистой сталью, характеризующейся высокими механическими свойствами, обладающей конструкционной прочностью и хорошими технологическими свойствами.

Аппарат введен в эксплуатацию в 1962 году. Параметры эксплуатации: давление 8 МПа, температура 300 °С, среда – углеводороды, давление гидравлического испытания 10 МПа. Реакционная колонна демонтирована в 2003 году на основании заключения экспертизы промышленной безопасности специализированной организации в связи с тем, что толщина стенки нижней (кубовой) части приблизилась к отбраковочной толщине, а также при проведении акустико-эмиссионного контроля были зарегистрированы активные источники сигналов, равномерно распределенные в нижней части аппарата.

Для оценки изменения свойств материала реакционной колонны в процессе длительной эксплуатации были выполнены обширные исследования, в том числе испытания одноосным растяжением образцов, результаты которых были использованы для расчета модели реакционной колонны методом конечных элементов [5].

Были рассмотрены следующие задачи:

- создание двухмерной (2D) и трехмерной (3D) геометрической и конечно-элементной модели реакционной колонны;
- анализ влияния конструктивных особенностей и собственного веса на напряженно-деформированное состояние аппарата;
- анализ влияния изменения механических свойств материала на напряженно-деформированное состояние аппарата.

Для определения влияния конструктивных особенностей и собственного веса на напряженно-деформированное состояние аппарата проведен сравнительный анализ результатов расчетов моделей реакционной колонны:

- расчет 2D и 3D моделей с использованием исходных свойств материала без учета влияния собственного веса аппарата;
- расчет 2D и 3D моделей с использованием исходных свойств материала с учетом влияния собственного веса аппарата;
- расчет 3D модели с использованием исходных свойств материала, с учетом влияния собственного веса аппарата и конструктивных особенностей (штуцеров).

Для определения влияния изменения механических свойств материала на напряженно-деформированное состояние аппарата проведен сравнительный анализ результатов расчетов моделей реакционной колонны:

- расчет 2D модели со свойствами материала постоянными по толщине стенки аппарата с использованием зависимости $\sigma_{\text{ср}}=f(\epsilon_i)$, полученной по результатам испытаний одноосным растяжением (по среднему значению);
- расчет 2D модели со свойствами материала переменными по толщине стенки аппарата с использованием зависимостей: для внутренней поверхности $\sigma_{\text{мин}}=f(\epsilon_i)$; для срединной поверхности $\sigma_{\text{ср}}=f(\epsilon_i)$; для наружной поверхности $\sigma_{\text{макс}}=f(\epsilon_i)$, полученных по результатам испытаний одноосным растяжением.

Исходные данные

Расчет методом конечных элементов был проведен для условий гидравлического испытания аппарата как наиболее напряженного. В качестве исходных данных были приняты геометрические размеры реакционной колонны в

соответствии с паспортом аппарата и чертежом завода-изготовителя. Построение геометрических моделей было произведено при использовании графической программы AutoCAD.

Для определения влияния конструктивных особенностей и собственного веса на напряженно-деформированное состояние аппарата были приняты следующие исходные данные:

- для расчета 2D и 3D модели без учета влияния собственного веса аппарата
- механические свойства материала: модуль упругости при температуре 20 °С $E = 1,99 \cdot 10^5$ МПа (Н/мм²); коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$;

- для расчета 2D и 3D модели с использованием исходных свойств материала с учетом влияния собственного веса аппарата – механические свойства материала: модуль упругости при температуре 20 °С $E = 1,99 \cdot 10^5$ МПа (Н/мм²), коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, плотность стали $\rho = 7,85 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³, ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с²;

- для расчета 3D модели с использованием исходных свойств материала с учетом влияния собственного веса аппарата и конструктивных особенностей (штуцеров) – механические свойства материала: модуль упругости при температуре 20 °С $E = 1,99 \cdot 10^5$ МПа (Н/мм²), коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, плотность стали $\rho = 7,85 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³, ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с².

Для определения влияния изменения механических свойств материала на напряженно-деформированное состояние аппарата были приняты следующие исходные данные:

- для расчета 2D модели со свойствами материала постоянными по толщине стенки аппарата. Пластические свойства материала: среднее значение $\sigma_{icp}=f(\epsilon_i)$ экспериментальных зависимостей $\sigma_{imin}=f(\epsilon_i)$ и $\sigma_{imax}=f(\epsilon_i)$, полученные по результатам испытаний образцов одноосным растяжением при температуре 20 °С [5] (рисунок 1). Упругие свойства материала: коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, плотность стали $\rho = 7,85 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³, ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с²;

- расчет 2D модели со свойствами материала переменными по толщине стенки аппарата. Пластические свойства материала: экспериментальные зависимости для внутренней поверхности $\sigma_{imin}=f(\epsilon_i)$, для срединной поверхности $\sigma_{icp}=f(\epsilon_i)$, для

наружной поверхности $\sigma_{\text{макс}}=f(\epsilon_i)$, полученные по результатам испытаний образцов одноосным растяжением при температуре 20 °С [5] (рисунок 1). Упругие свойства материала: коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, плотность стали $\rho = 7,85 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³, ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с².

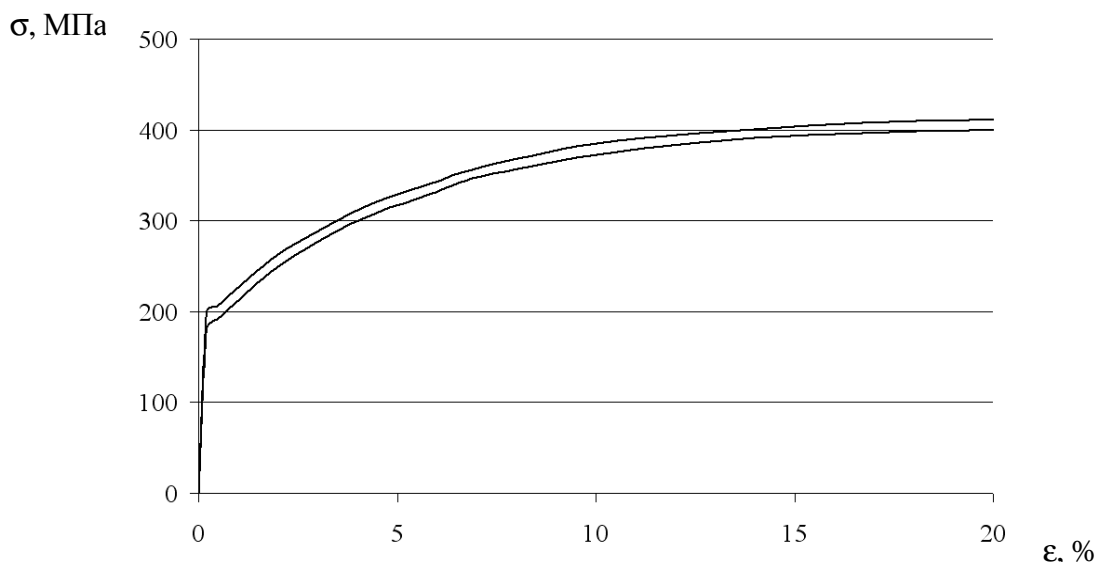


Рисунок 1 – Экспериментальные зависимости $\sigma_{\text{мин}}(\epsilon_i)$ и $\sigma_{\text{макс}}(\epsilon_i)$

Модель реакционной колонны и граничные условия

Сущность метода конечных элементов состоит в аппроксимации исследуемого тела некоторой моделью, которая представляет собой совокупность элементов с конечным числом степеней свободы. Эти элементы взаимосвязаны только в узловых точках, куда прикладываются фиктивные силы, эквивалентные поверхностным напряжениям, распределенным по границам элементов. Параметры приведенной идеализированной системы определяются исходя из соответствующих вариационных решений [1, 2].

В данной работе решение задач выполнено с использованием конечно-элементных моделей в двухмерной 2D и трехмерной 3D постановках. Дополнительно решена 3D задача, в которой колонна рассмотрена со штуцерами. Конечно-элементные модели представлены на рисунках 2-5.

При решении задачи в 2D осесимметричной постановке, ось симметрии колонны совмещали с осью OY. Граничные условия и приложенные нагрузки представлены на рисунке 3. Перемещение опорного кольца равно 0, т.е. $U_x=U_y=0$. Ко всей внутренней поверхности аппарата было приложено равномерное избыточное давление 10 МПа (Н/мм²).

Для уменьшения количества конечных элементов при решении задач в 3D постановке рассмотрена ¼ часть колонны. При этом граничные условия были выбраны идентичными 2D модели. На отсеченных поверхностях колонны, совпадающих с плоскостями OXY и OYZ, перемещения $U_z=0$ и $U_x=0$ соответственно. Наружная поверхность опорного кольца во всех направлениях была закреплена, т.е. $U_x=U_y=U_z=0$. (см. рисунок 3) Ко всей внутренней поверхности аппарата было приложено равномерное избыточное давление 10 МПа (Н/мм²).

Оценка влияния собственного веса аппарата и конструктивных особенностей на напряженно-деформированное состояние аппарата

Результаты, полученные при расчете 2D модели, 3D модели без учета и с учетом влияния собственного веса аппарата, а также 3D модели реакционной колонны со штуцерами приведены на рисунках 6-8.

Распределение интенсивности напряжений по длине обечайки внутренней и наружной поверхности модели реакционной колонны от верхнего укрепляющего кольца до нижнего укрепляющего кольца аппарата приведено на рисунках 9-10.

Результаты расчета 2D модели и 3D модели (без учета и с учетом собственного веса аппарата) практически идентичны, с максимальной разностью в расчетах не более 1 %. Результаты расчета 3D модели и 3D модели со штуцерами в целом различаются не значительно, с максимальным отклонением значений интенсивности напряжений в отдельных точках: по внутренней поверхности – не более 20 %, по наружной поверхности не более 30 %, так как штуцера являются концентраторами напряжений.

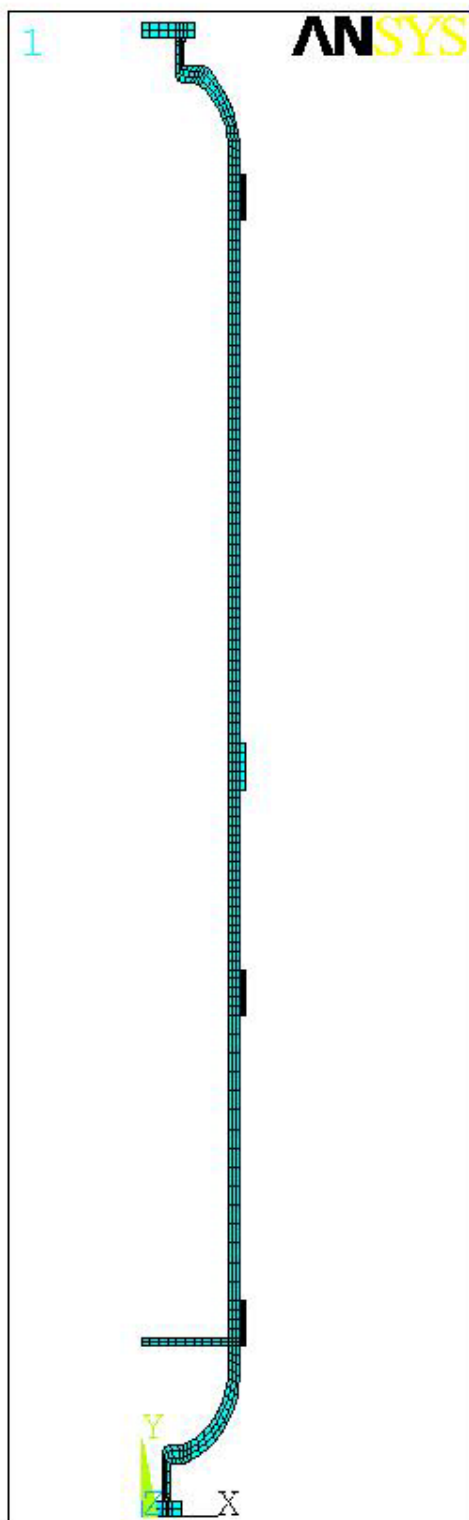


Рисунок 2. 2D конечно-элементная модель реакционной колонны

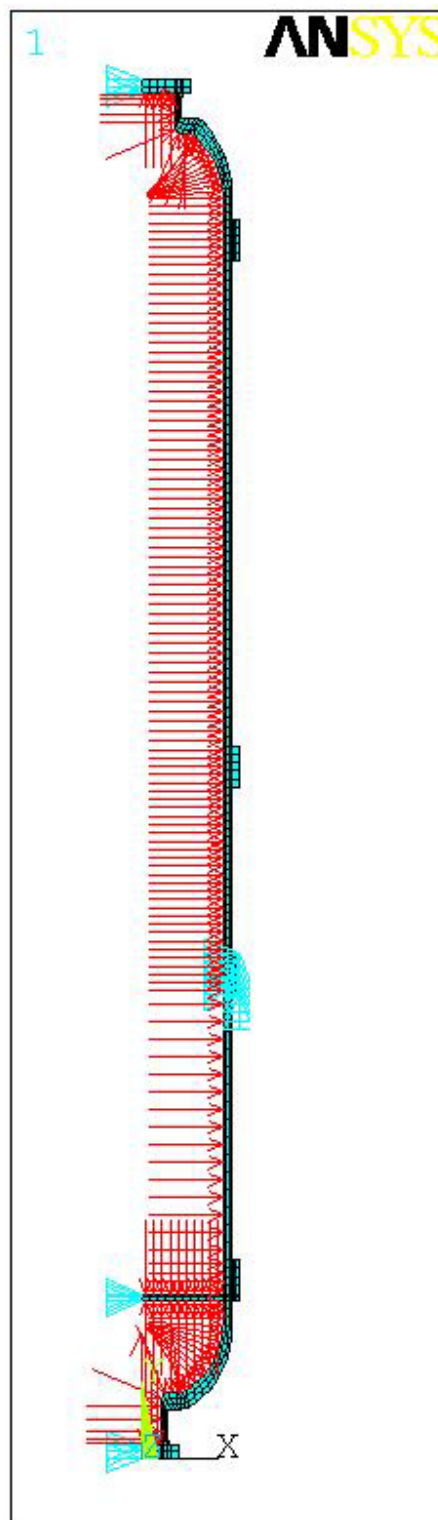


Рисунок 3. Граничные условия и приложенные нагрузки

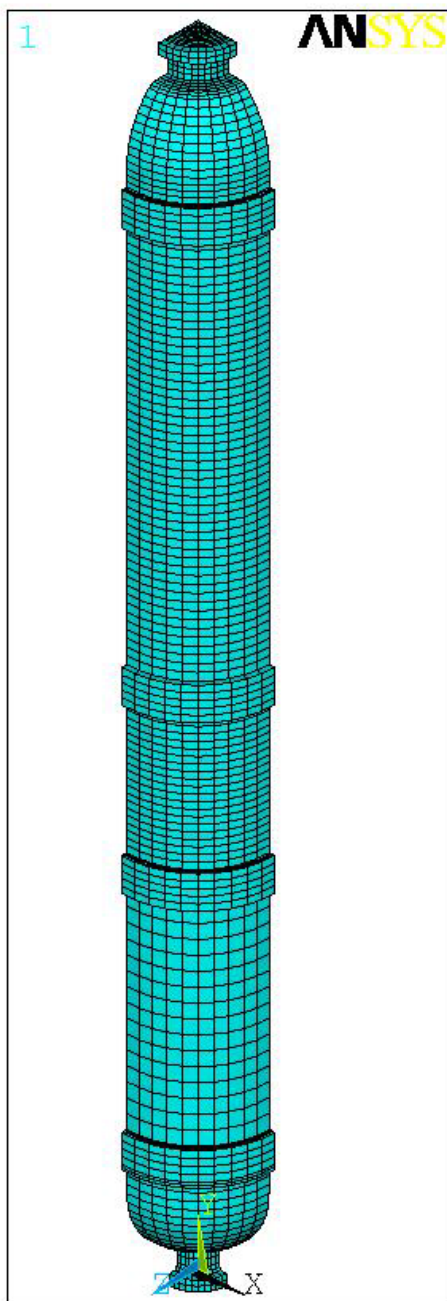


Рисунок 4. 3D конечно-элементная модель реакционной колонны

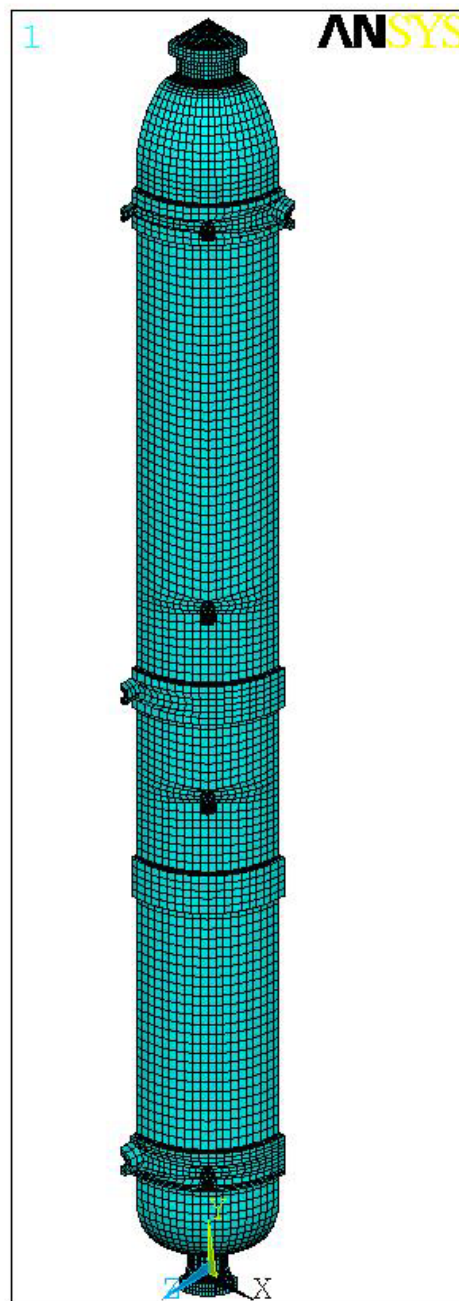


Рисунок 5 – 3D конечно-элементная модель реакционной колонны со штуцерами

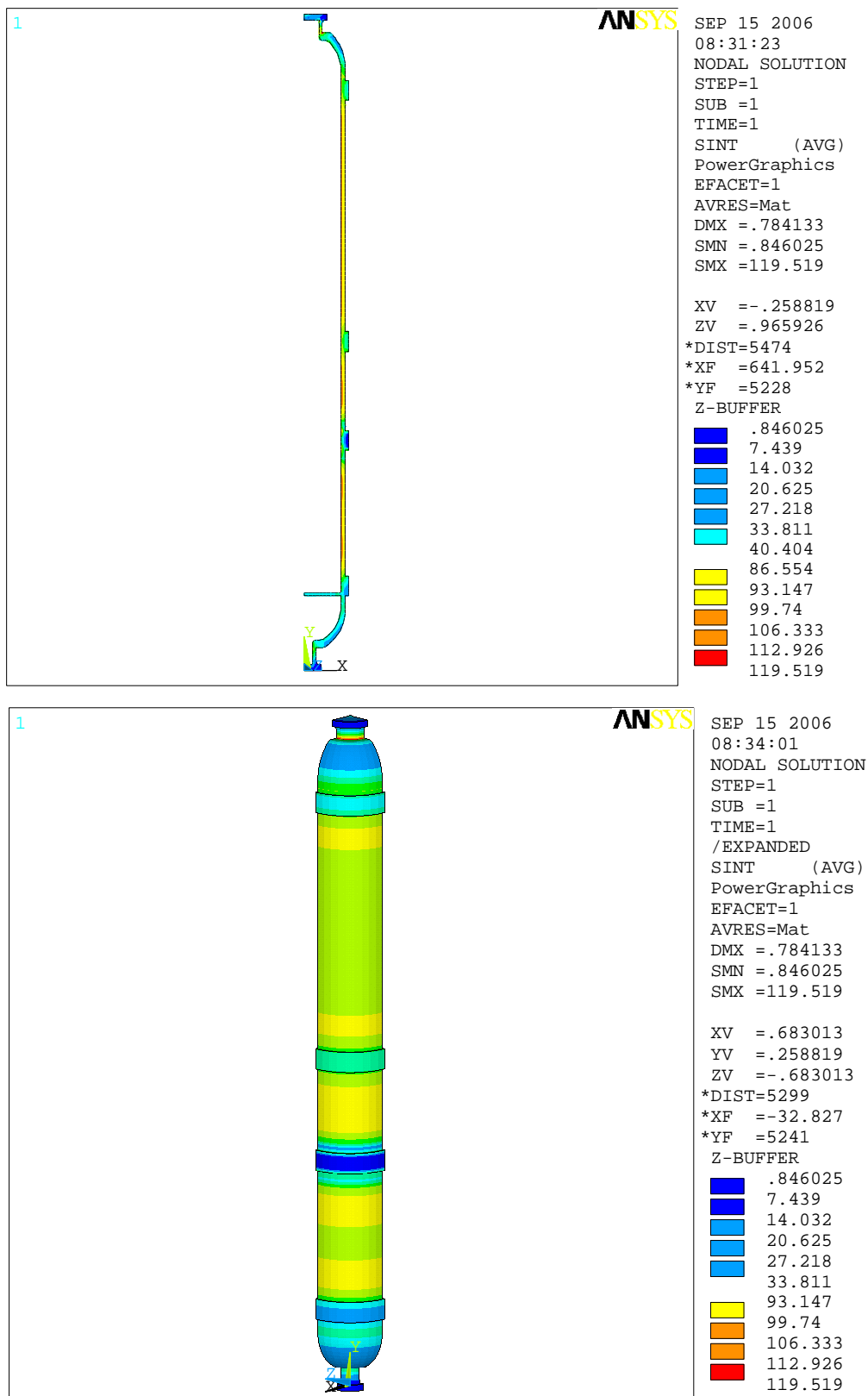


Рисунок 6. Эпюра распределения интенсивности напряжений
 2D и 3D моделей без учета собственного веса аппарата

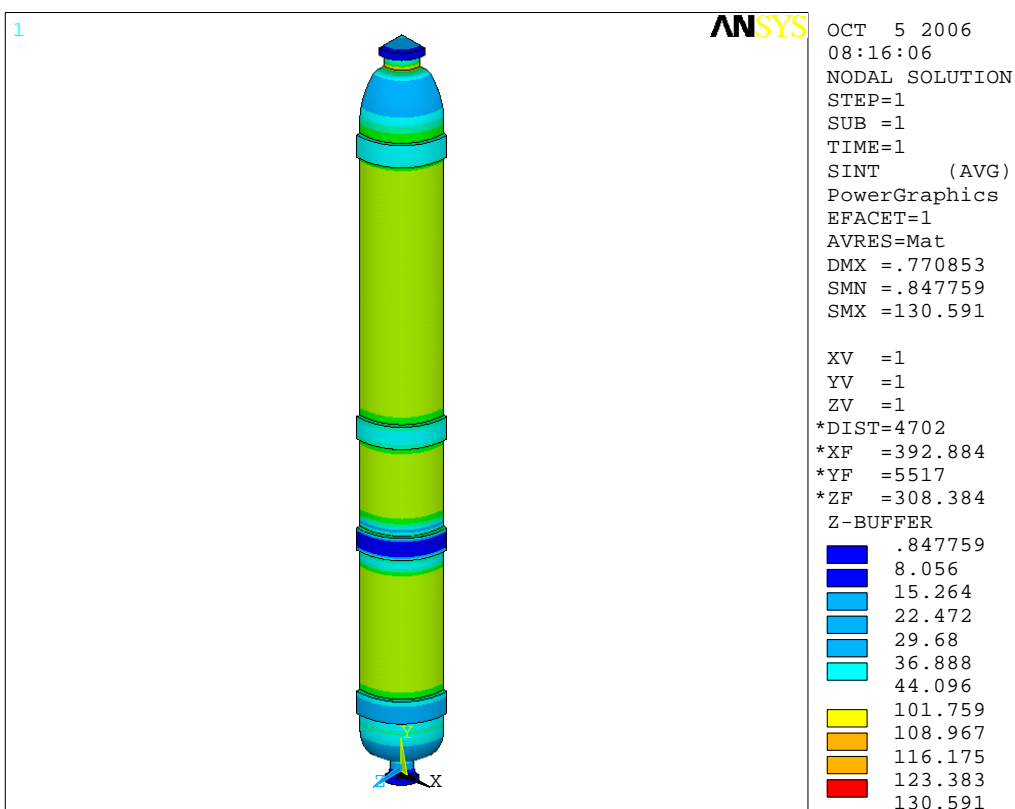
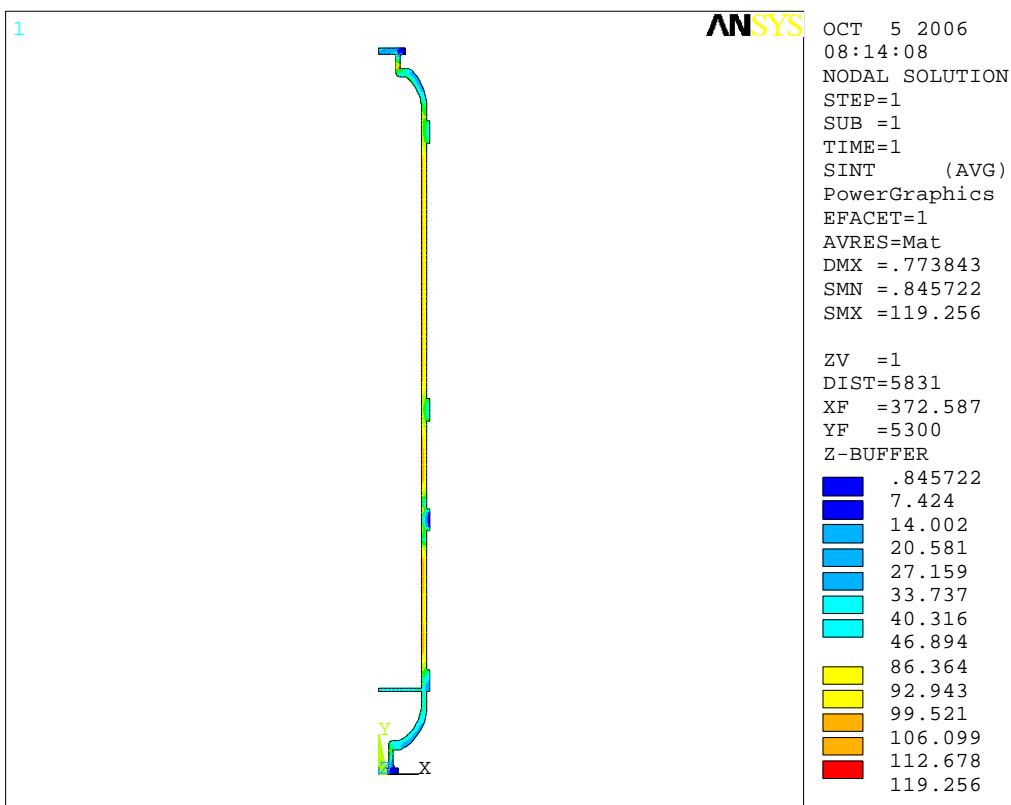


Рисунок 7. Эпюра распределения интенсивности напряжений
2D и 3D моделей с учетом собственного веса аппарата

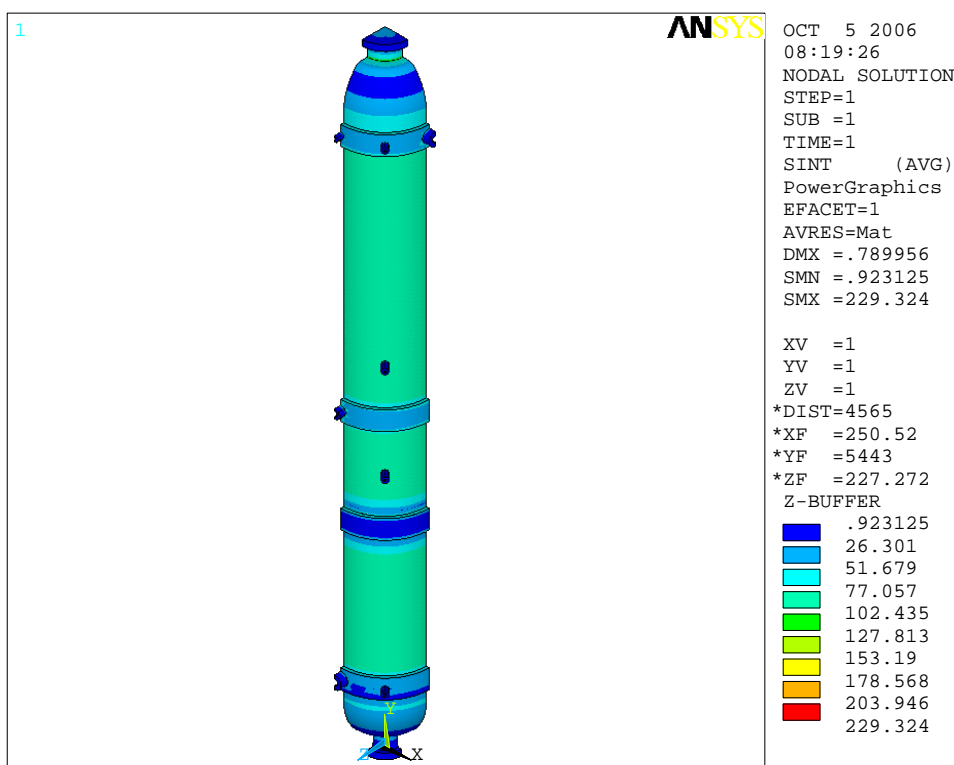
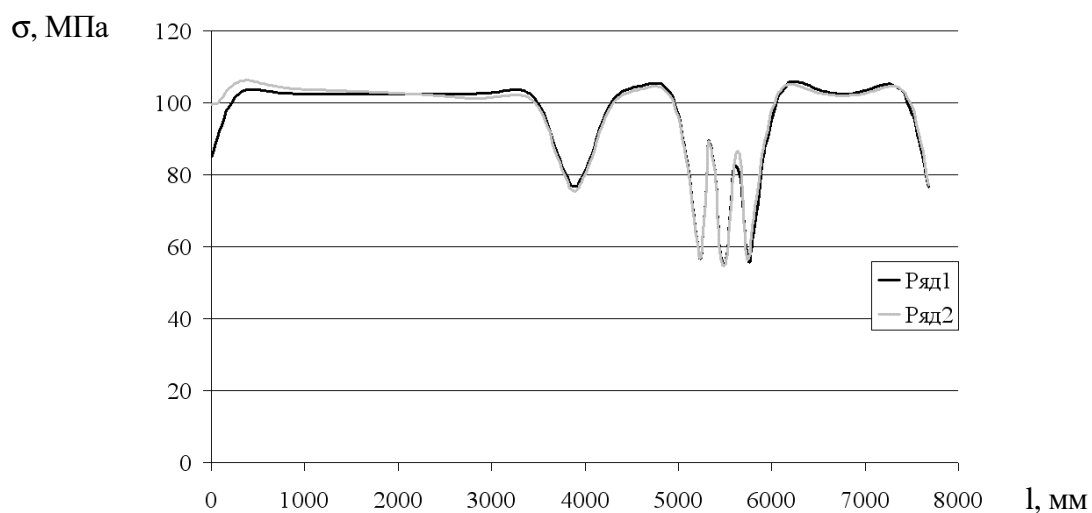
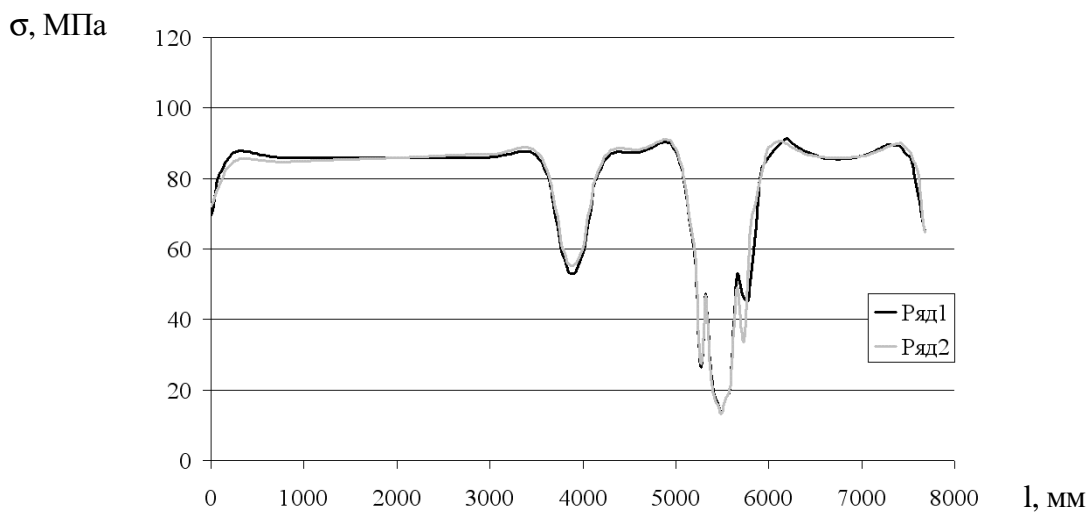


Рисунок 8. Эпюра распределения интенсивности напряжений 3D модели с учетом собственного веса аппарата и влияния штуцеров



ряд 1 – 2D и 3D без учета и с учетом собственного веса аппарата,
ряд 2 – 3D с учетом собственного веса аппарата и штуцеров

Рисунок 9 – Распределение интенсивности напряжений по внутренней поверхности модели аппарата



ряд 1 – 2D и 3D без учета и с учетом собственного веса аппарата,
ряд 2 – 3D с учетом собственного веса аппарата и штуцеров

Рисунок 10 – Распределение интенсивности напряжений по наружной поверхности модели аппарата

Дальнейшие расчеты проводятся с применением 2D модели только для нижней (кубовой) части модели реакционной колонны, материал которой по результатам обследования является наиболее деградировавшим и для которого определены экспериментальные зависимости $\sigma_{\text{мин}}(\epsilon_i)$ и $\sigma_{\text{макс}}(\epsilon_i)$.

Оценка влияния изменения механических свойств материала на напряженно-деформированное состояние аппарата

В качестве пластических свойства материала приняты экспериментальные зависимости для внутренней поверхности $\sigma_{\text{мин}}=f(\epsilon_i)$, для срединной поверхности $\sigma_{\text{ср}}=f(\epsilon_i)$, для наружной поверхности $\sigma_{\text{макс}}=f(\epsilon_i)$, полученные по результатам испытаний образцов одноосным растяжением при температуре 20 °С [5] (рисунок 1).

С использованием пластических свойств материала был проведен расчет нижней (кубовой) части аппарата. Эпюры распределения интенсивности напряжений представлены на рисунках 11-12.

Распределение интенсивности напряжений по длине обечайки внутренней и наружной поверхности кубовой части реакционной колонны от опорного кольца до нижнего укрепляющего кольца приведены на рисунках 13-14.

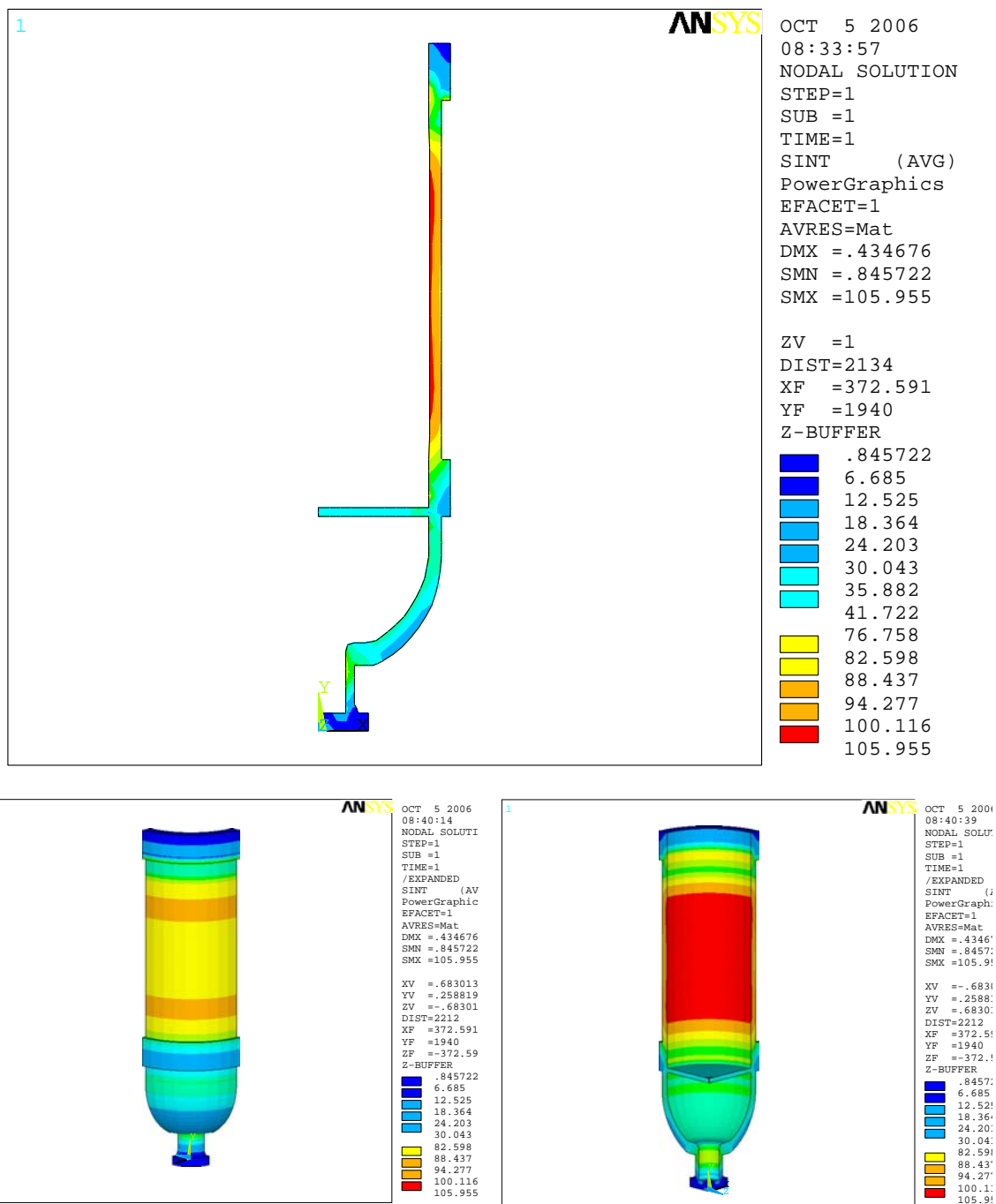


Рисунок 11. Эпюра распределения интенсивности напряжений 2D модели без изменения свойств материала и со свойствами материала постоянными по толщине стенки аппарата $\sigma_{icp}=f(\epsilon_i)$

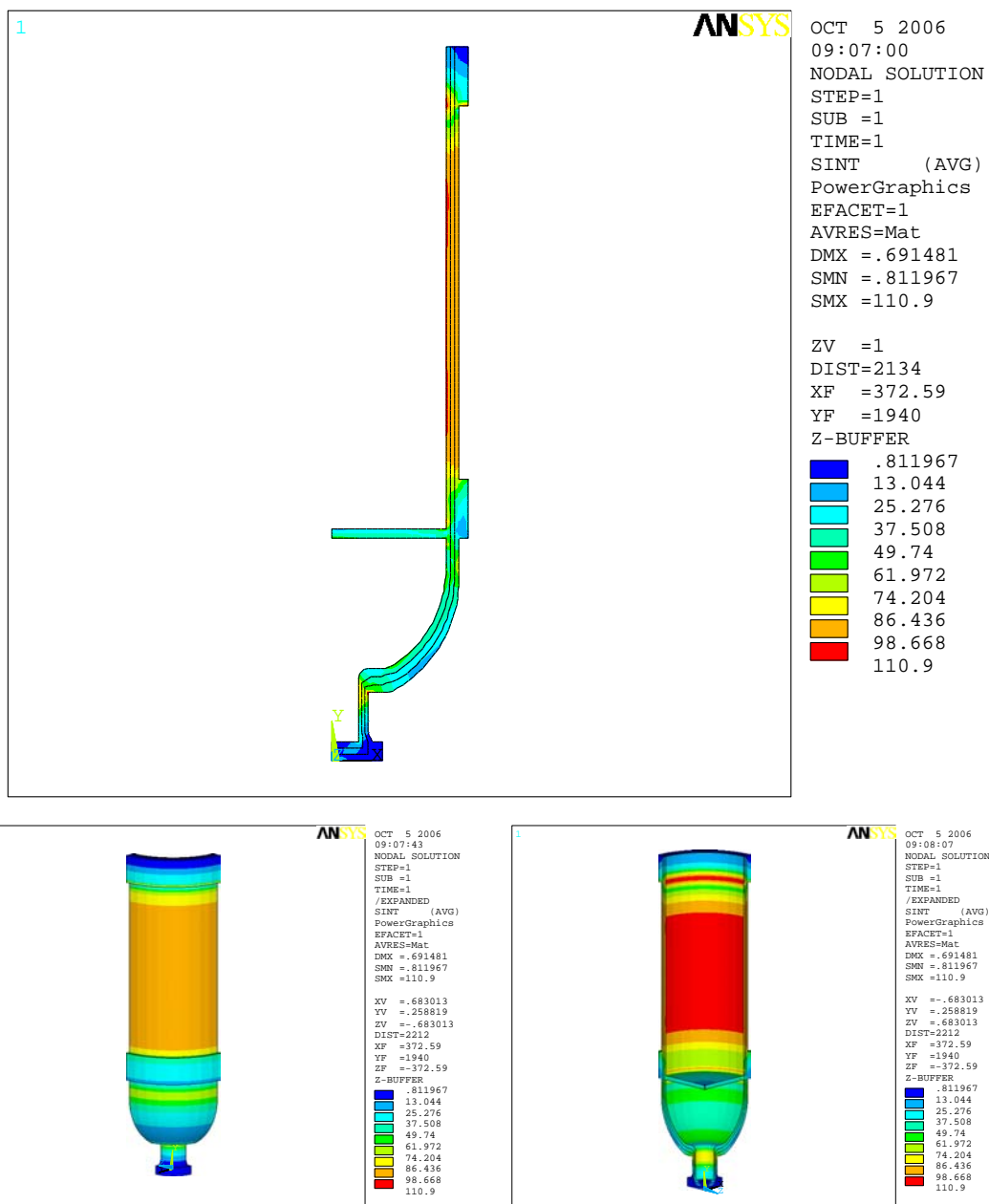
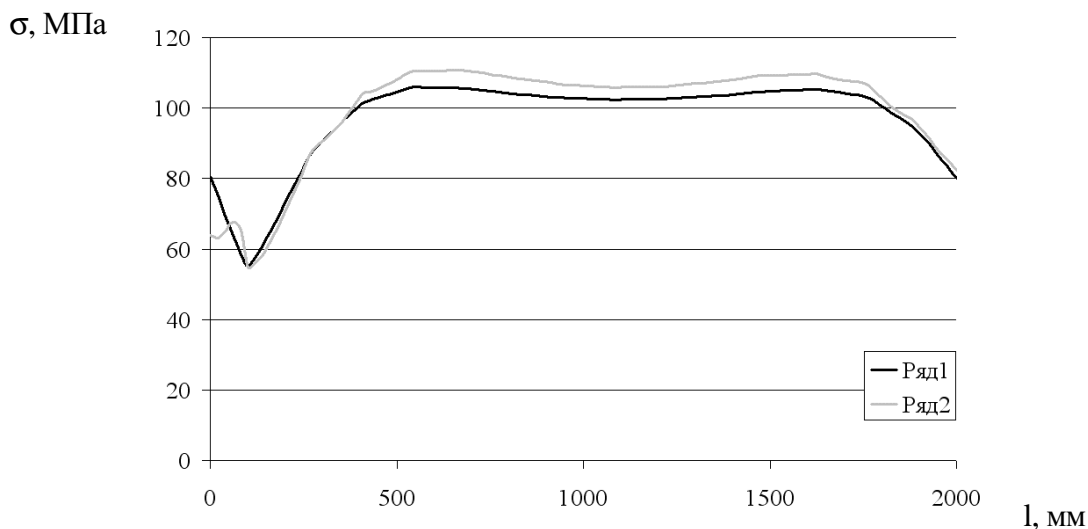


Рисунок 12. Эпюра распределения интенсивности напряжений 2D модели со свойствами материала переменными по толщине стенки аппарата

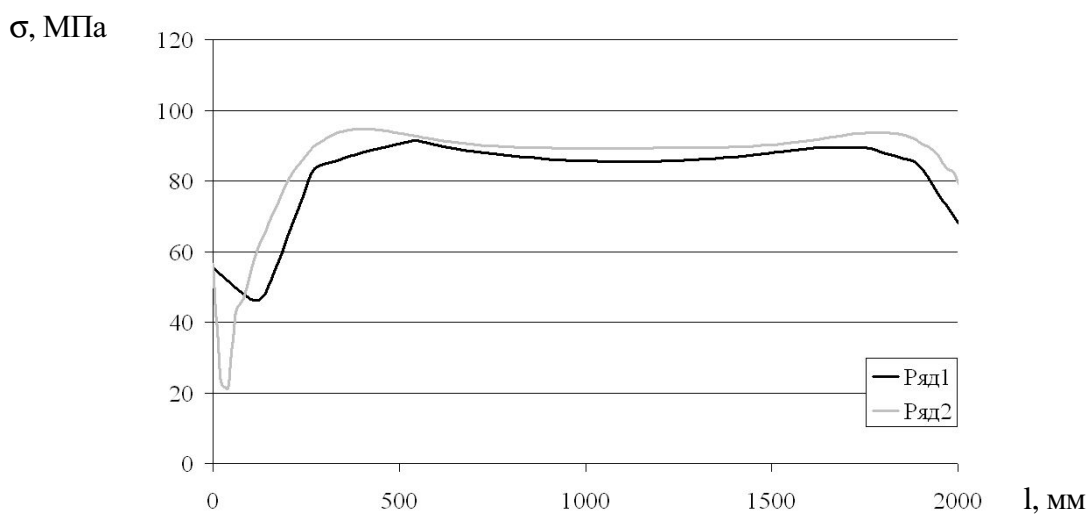
$$\sigma_{\text{мин}}=f(\epsilon_i), \sigma_{\text{ср}}=f(\epsilon_i), \sigma_{\text{макс}}=f(\epsilon_i)$$

Ввиду того, что аппарат работает с напряжениями в упругой области, расчет модели без учета изменения механических свойств материала и модели с учетом изменения механических свойств материала, постоянных по толщине стенки, – идентичны. Интенсивность напряжений для модели с учетом изменения механических свойств материала, переменных по толщине стенки, существенно выше.



ряд 1 – модель без изменения свойств материала и модель со свойствами материала постоянными по толщине стенки аппарата $\sigma_{\text{ср}}=f(\epsilon_i)$;
 ряд 2 – модель со свойствами материала переменными по толщине стенки аппарата $\sigma_{\text{мин}}=f(\epsilon_i)$, $\sigma_{\text{ср}}=f(\epsilon_i)$, $\sigma_{\text{макс}}=f(\epsilon_i)$

Рисунок 13. Распределение интенсивности напряжений по внутренней поверхности модели аппарата



ряд 1 – модель без изменения свойств материала и модель со свойствами материала постоянными по толщине стенки аппарата $\sigma_{\text{ср}}=f(\epsilon_i)$;
 ряд 2 – модель со свойствами материала переменными по толщине стенки аппарата $\sigma_{\text{мин}}=f(\epsilon_i)$, $\sigma_{\text{ср}}=f(\epsilon_i)$, $\sigma_{\text{макс}}=f(\epsilon_i)$

Рисунок 14. Распределение интенсивности напряжений по наружной поверхности модели аппарата

Результаты расчета максимальных значений интенсивности напряжений модели реакционной колонны приведены в таблице 1.

Таблица 1

Максимальные значения напряжений модели реакционной колонны по результатам расчета методом конечных элементов

Тип расчетной модели	Интенсивность напряжений, МПа	
	Внутренняя поверхность	Наружная поверхность
Модель без учета изменения механических свойств материала	105,94	91,31
Модель с учетом изменения механических свойств материала, постоянных по толщине стенки	105,94	91,31
Модель с учетом изменения механических свойств материала, переменных по толщине стенки	110,72	94,66

Анализ результатов расчета модели аппарата методом конечных элементов показал, что при оценке технического состояния длительно эксплуатируемого оборудования необходимо учитывать изменение механических свойств материала, в том числе изменение их по толщине стенки аппарата.

Выводы

На основании результатов экспериментальных исследований и численного моделирования на примере реакционной колонны было установлено:

– собственный вес оказывает незначительное влияние на напряженно-деформированное состояние конструкции аппарата по сравнению с нагрузками от действия внутреннего давления;

– конструктивные особенности реакционной колонны оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние конструкции аппарата;

– неравномерное изменение механических свойств материала по толщине стенки аппарата в условиях длительной эксплуатации также влияет на несущую способность конструкции.

Литература

1. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справочное пособие. – М: Машиностроение, 2004. – 512 с.;
2. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под общей редакцией Д.Г. Красковского. – М: КомпьютерПресс, 2002. – 224 с.;
3. Дубов А.А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования. Химическое и Нефтегазовое машиностроение, 2003 – № 4. – С. 41-43;
4. Горицкий В.М. Диагностика металлов. – М.: Металлургиздат, 2004. – 408 с.;
5. Закирничная М.М., Кузеев И.Р., Бердин В.К. Кириллова Н.Ю. Анализ изменения структуры и свойств стали 20 в условиях длительной эксплуатации. Известия высших учебных заведений. Нефть и газ, 2006. – № 4. – С. 75-82.