



Г.А. Бигус, д-р техн. наук;  
М.В. Черных, специалист “ИНТЕРЮНИС”,  
аспирант МГТУ им.Н.Э.Баумана.  
G.A. Bigus, doctor of engineering sciences,  
M.V. Chernykh, specialist “INTERUNIS”,  
Postgraduate BMSTU;

Статья опубликована в журнале «Сварка и  
Диагностика», 2014, №2, С. 42-45.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ОПАСНЫХ ЗОН АППАРАТОВ КОЛОННОГО ТИПА ДЛЯ УСТАНОВКИ ДАТЧИКОВ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

### DETERMINATION OF THE MOST DANGEROUS ZONES OF VERTICAL VESSELS TO INSTALL SENSORS OF MONITORING SYSTEM

*Рассмотрен порядок построения расчетной модели аппаратов колонного типа для программы ANSYS, анализ распределения напряженно-деформированного состояния, выбор опасных зон.*

*The method of definition design model of vertical vessels for the program ANSYS, distribution strain-stress state analysis, danger zones selection.*

**Ключевые слова:** ректификационная колонна, система мониторинга, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, опасные зоны.

**Key words:** rectification column, monitoring system, finite-element method, strain-stress state, danger zones.

#### Введение

В Российской Федерации более 45 тысяч опасных производственных объектов различного типа и разной формы собственности. Из них только в промышленности более 8 тысяч взрыво- и пожароопасных объектов [1].

В настоящее время в Российской Федерации введены точные критерии идентификации опасных производственных объектов (ОПО), согласно которым все объекты разделены на четыре класса опасности: I класс - объекты чрезвычайно высокой опасности; II класс – объекты высокой опасности; III класс – объекты средней опасности; IV класс – объекты низкой опасности [2].

В зависимости от класса опасности определяются меры государственного регулирования. В отношении ОПО I класса опасности проводится постоянный надзор со стороны Ростехнадзора и эксплуатирующих объект организаций.

Также следует обеспечивать надзор за объектами, на которых, при нарушении технологических регламентов, условий эксплуатации, режимов работы, а также иных событий в процессе эксплуатации, произошли различные нештатные ситуации: утечки, взрывы, пожары и т.п. Данные события оказывают серьезное влияние на техническое состояние объектов и, как следствие, подвергают сомнению возможность их дальнейшей

эксплуатации. Однако эффективнее и целесообразнее было бы продление сроков эксплуатации оборудования, но только при обеспечении уверенности в возможности предотвращения дальнейшего потенциально негативного развития событий.

Методология постоянного надзора (мониторинга) за состоянием оборудования ОПО состоит в создании встроенной в производство системы технического диагностирования (СТД), т.е. совокупности средств, объема и исполнителей, необходимых для обеспечения цели – безопасной эксплуатации. Такая СТД будет вести постоянный контроль технического состояния объекта и следить за наиболее опасными зонами.

Данные задачи наиболее лучшим образом позволяет решить установка на объект контроля системы комплексного диагностического мониторинга (далее система мониторинга).

## Описание объекта мониторинга



Рис. 1. Ректификационная колонна до аварии

Среди ОПО широко распространены аппараты колонного типа. Одним из таких аппаратов является ректификационная колонна (далее колонна), предназначенная для разделения углеводородной фракции С3 на пропан и продуктовый пропилен.

Колонна представляет собой вертикальный стальной сварной аппарат, изготовленный в 1978 г. и состоящий из цилиндрического корпуса, сваренного из 29-ти обечайек, 2-х эллиптических днищ и технологических патрубков (рис. 1). Колонна оборудована 174-мя четырехпоточными ситчатыми тарелками. Общая высота колонны с опорой составляет 82520 мм. Колонна имеет теплоизоляционный слой толщиной 100 мм. Обечайки корпуса и эллиптические днища изготовлены из стали ТТStE36 (аналог 17Г1С).

Из-за превышения регламентных параметров (температуры и нормы содержания пропана в товарном пропилене) технологического процесса, на колонне произошла авария - разгерметизация в зоне соединения штуцера, находящегося в нижней части, с теплообменником, что привело к возгоранию. Как следствие, до высотной отметки 34 м под воздействием ударной волны и огня сорвало изоляцию, деформировало (искорежило) и частично сорвало обслуживающие площадки и лестницы (рис. 2).



Рис. 2. Ректификационная колонна после аварии

По результатам проведенной после аварии экспертизы промышленной безопасности было установлено, что колонна имеет отклонение от вертикальной оси (крен). Отклонение верха колонны составляет 506 мм, что может послужить причиной увеличения крена и привести к дальнейшим возможным сценариям негативного развития событий:

- падение колонны;
- образование местных нарушений геометрической формы (гофров) и, следовательно, образование сквозных трещин и разгерметизация корпуса.

С целью их предупреждения было принято решение об установке системы мониторинга. Для этого необходимо решение 3х задач:

1. определить наиболее опасные зоны;
2. анализ и выбор аппаратно-программных средств, методов контроля за возникновением и развитием дефектов, напряжений в наиболее опасных зонах;
3. установка индикаторных интервалов опасности эксплуатации на основе анализа НДС и обнаруженных дефектов.

В данной статье рассматривается решение 1ой задачи – определение наиболее опасных зон на примере выбранного объекта, для установления в них датчиков системы мониторинга.

## Расчет методом конечных элементов

Для определения наиболее опасных зон были проведены уточненные расчеты методом конечных элементов (МКЭ) с учетом общих и местных напряжений по [3] в соответствии с [4], п.5.5.

В системе трехмерного твердотельного и поверхностного проектирования Autodesk Inventor LTD была создана поверхностная модель колонны согласно:

- чертежам завода-изготовителя;
- чертежам подводящих трубопроводов;
- исполнительной схеме крена колонны;
- реальной геометрии объекта.

Геометрия поверхностной модели с указанием основных элементов представлена на рис. 3.

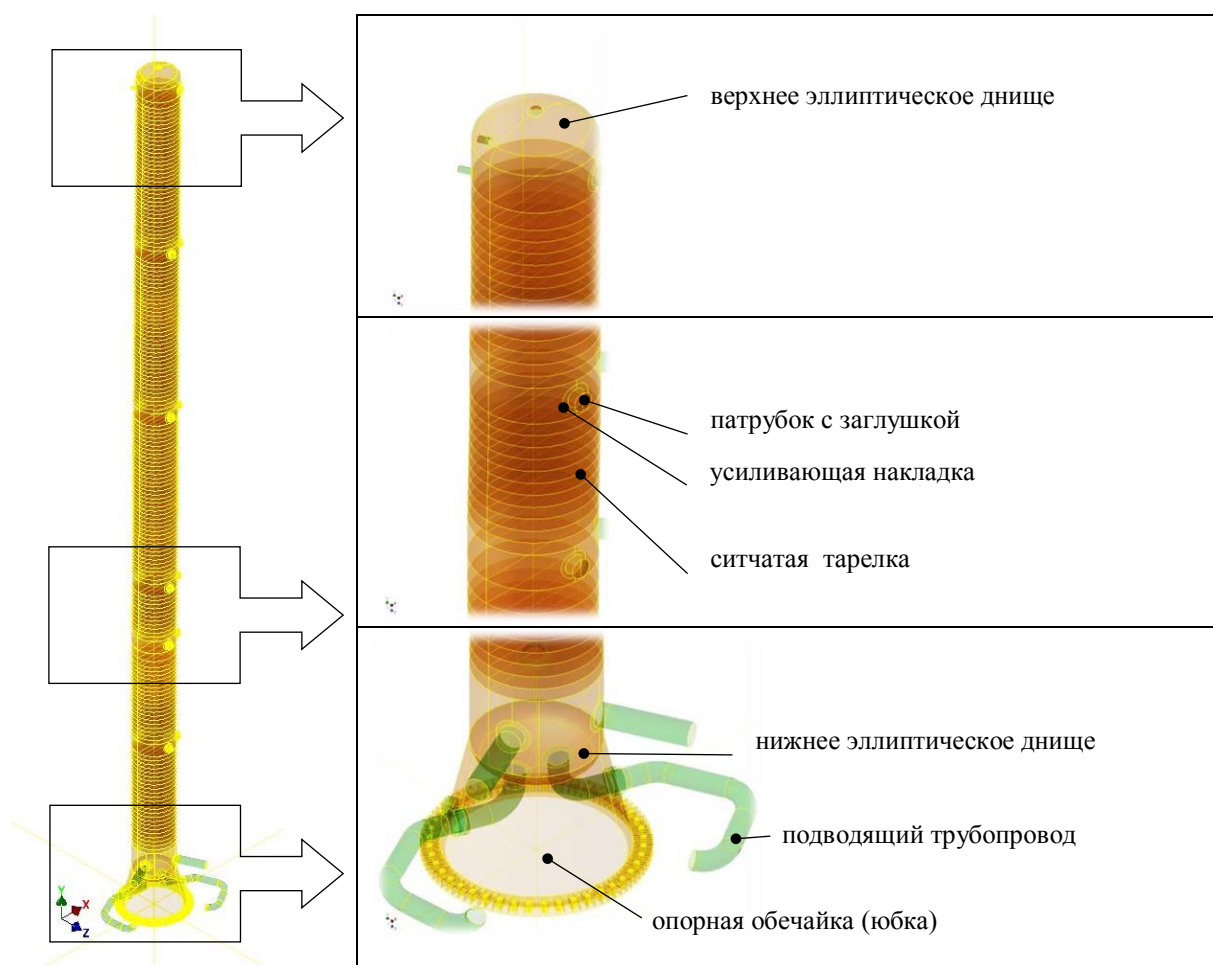


Рис. 3. Геометрия поверхностной модели

Поверхностная модель была импортирована в универсальную программную систему конечно-элементного анализа ANSYS v.14.0, где была создана расчетная модель колонны на основании:

- поверхностной модели колонны;
- протокола по результатам ультразвуковой толщинометрии;
- отчета об исследовании металла.

После этого в ANSYS v.14.0 автоматически была сгенерирована конечно-элементная сетка. Размерность модели составила 340160 узлов.

Расчеты были проведены на многопроцессорной рабочей станции со следующими характеристиками:

- процессор Intel Xeon 2686w 4.5 GHz;
- объем оперативной памяти 32 GB, PC3-2400 DDR 3;
- графический ускоритель NVIDIA Tesla C1060;
- 4 SSD Intel X25 160Gb стоящие в raid 1 для увеличения скорости обмена данных.

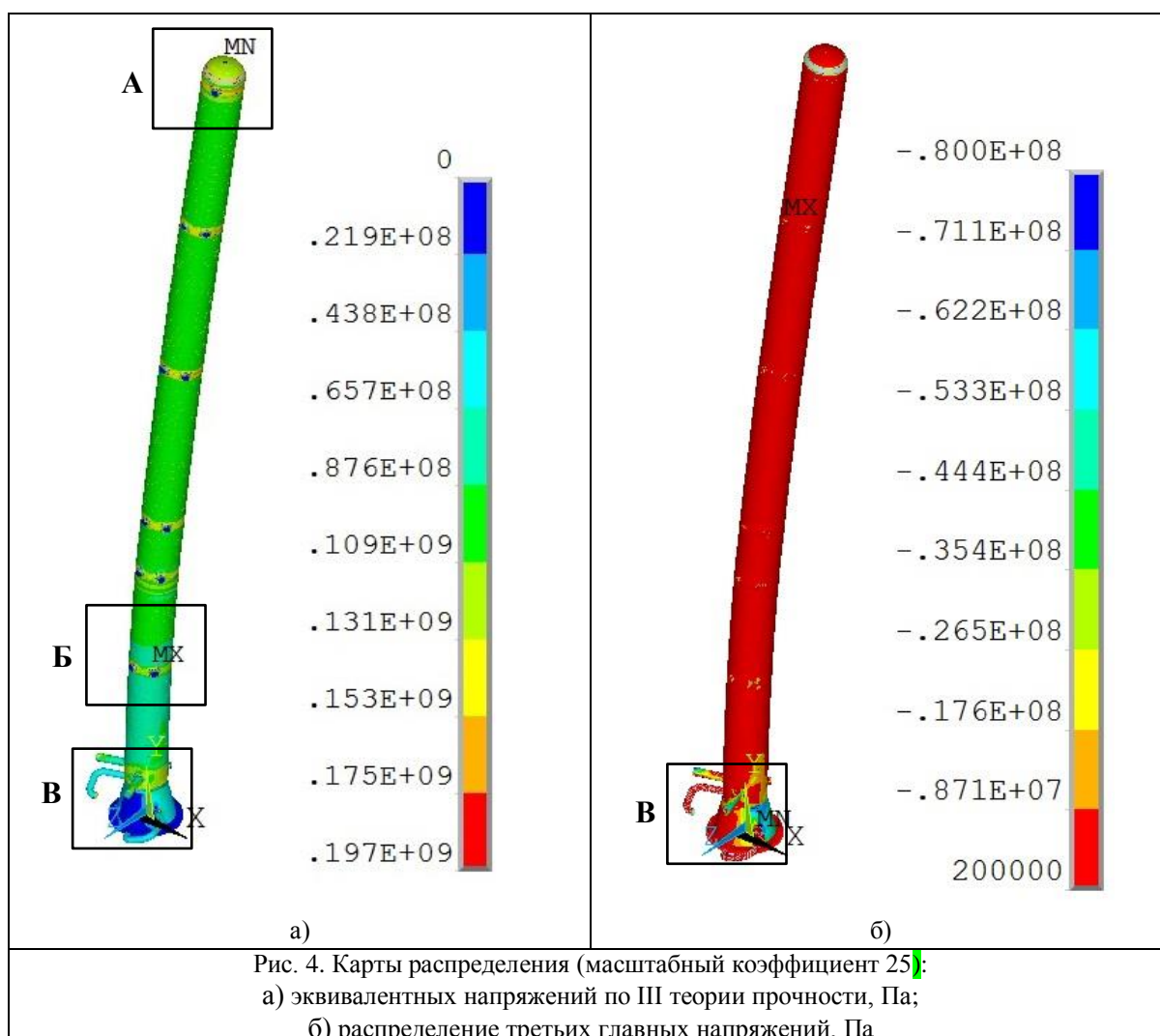
Время расчета с 4х стадийным нагружением составило около 2 часов.

Так как геометрия колонны несимметрична, то для определения опасных зон к расчетной модели было приложено сочетание расчетных нагрузок (расчетное давление, нагрузка от собственного веса, температурное воздействие) при различном направлении ветрового давления.

В соответствии с [3], п.1.2.16, расчет напряжений без учета концентраций был проведен в предположении линейно-упругого поведения материала.

В качестве примера рассмотрим НДС колонны при направлении ветрового давления в сторону ее начального отклонения.

Результаты расчета представлены в виде карт распределения напряжений (рис. 4).





## Анализ полученных результатов и определение наиболее опасных зон

Торосферические днища представляют собой элементы с резким изменением геометрии формы, что приводит к возникновению в них высоких эквивалентных напряжений. С увеличением высоты толщина стенки колонны убывает (с 28 мм до 21 мм), что приводит к возрастанию эквивалентных напряжений верхней части колонны. По данным причинам **верхняя зона** с эллиптическим днищем является зоной с повышенными эквивалентными напряжениями (рис.4, зона А).

На участках приварки патрубков отсутствуют ситчатые тарелки, что приводит к уменьшению жесткости оболочки и повышенным мембранным напряжениям. Непосредственно сами зоны приварки дополнительно являются концентраторами напряжений с возникающими в них **максимальными эквивалентными напряжениями** (рис.4, зона Б). Ярко выражена **нижняя зона** (рис.4, зона В) с максимальными напряжениями, находящимися в местах приварки нижних патрубков, где дополнительно создается максимальный изгибающий момент.

Наибольшие сжимающие напряжения расположены в опорной обечайке, поскольку на нее не действуют растягивающие напряжения от избыточного внутреннего давления.

Начальное отклонение верха колонны на 506 мм не влияет на ее НДС.

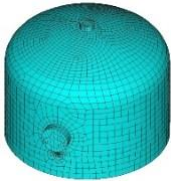
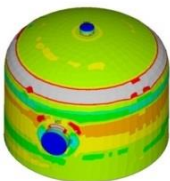
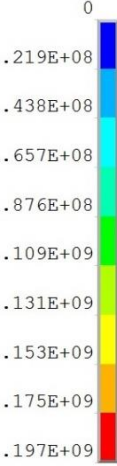
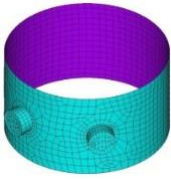
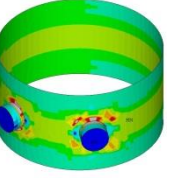
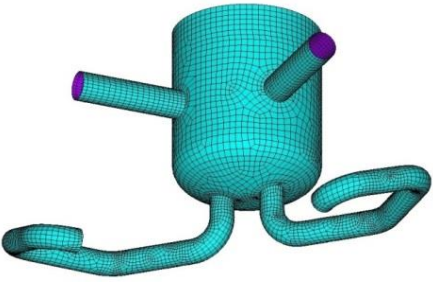
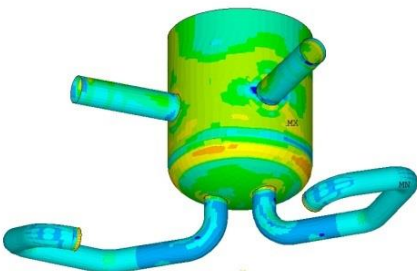

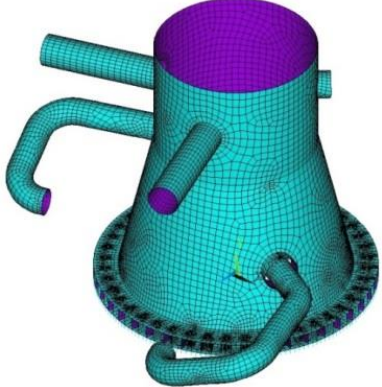
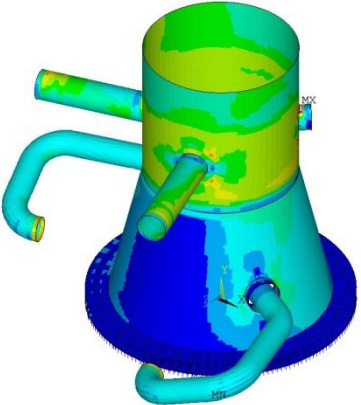
Как следствие, для установки датчиков системы мониторинга выбраны следующие зоны (табл. 1):

А – **зона верхняя** (последняя обечайка и эллиптическое днище - высотная отметка от 79700 до 82520 мм).

Б – **зона максимальных напряжений** (максимальное значение эквивалентных напряжений - высотная отметка от 15400 до 17400 мм).

В – **зона нижняя** (опорная и первая обечайка, эллиптическое днище - высотная отметка от 0 до 6490 мм).

Таблица 1. Опасные зоны

Зона	Конечно-элементная сетка	Карты распределения	
А			 <p style="text-align: center;">эквивалентных напряжений по III теории прочности, Па</p>
Б			
В			 <p style="text-align: center;">третьих главных напряжений, Па</p>
			

На основании определенных наиболее опасных зон планируется установка датчиков системы мониторинга (акустико-эмиссионных, тензометрических и пр.) с целью выявления зарождения и развития дефектов, а также отслеживания НДС в данных зонах.



## Выводы

- Оценка НДС позволяет выделить наиболее опасные зоны необходимые для мониторинга и уменьшить количество устанавливаемых датчиков, тем самым снижая стоимость системы мониторинга.

## Список литературы

1. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф. Техническая диагностика опасных производственных объектов. М.-Наука, 2010. 415 с.
2. Ферапонтов А.В. и др. Новые подходы к регулированию промышленной безопасности // Безопасность труда в промышленности. 2013.- №3.- С.9-11.
3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР. - М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с. – (Правила и нормы в атомной энергетике).
4. РД 03-421-01. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов.