

Выбор схемного решения конструкции котла цистерны для перевозки сжиженных углеводородных газов

10, октябрь 2014

Ломакин В. В., Языков А. В.

УДК: 629.7.082.6

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

andr-yaz@yandex.ru

В настоящее время в России ведётся разработка перспективных ракет-носителей, одним из компонентов топлива которых будет являться сжиженный природный газ /1/. Применение таких носителей повлечёт за собой необходимость создания технической инфраструктуры доставки больших объёмов сжиженных углеводородных газов (СУГ) на космодром, их хранения и заправки в ракету-носитель.

В связи с этим, встаёт вопрос разработки технических предложений и требований к перспективной конструкции емкости вагона-цистерны для перевозки СУГ с улучшенными техническими характеристиками.

Большинство образцов существующих железнодорожных вагонов-цистерн для перевозки СУГ имеет рамную конструкцию (рис.1, /2/) с внутренним диаметром котлов от 2,6 до 3,2 м, выполненных из низкоуглеродистой конструкционной стали 09Г2С, при длине по осям автосцепок 12,02 и 15,28 м и имеющих в своем составе две двухосные тележки типа 18-100 с массой 4750 кг /3/ каждая.

Анализ существующих конструкций железнодорожных вагонов-цистерн для перевозки СУГ показал, что наибольшее распространение получили цистерны с внутренним диаметром 3 м с длиной 12,02 м типов 15-1200-2, 15-1519-02, т.к. они полностью подходят к большинству наливных эстакад.

Для проведения расчетного анализа технических характеристик котла цистерны использовались нормативная база в виде ГОСТов /4, 5, 6/ и опыт проектирования емкостей заправочного оборудования в ракетно-космической технике /7/.



Рис.1. Общий вид железнодорожной цистерны рамного типа

Для определения геометрических и массовых характеристик предлагаемого варианта конструкции котла вагона-цистерны приняты следующие исходные данные:

1. Внутренний диаметр котла – 3,0 м. Данному размеру отдано предпочтение, т.к. цистерны с данным диаметром везде подходят под наливные эстакады и вписываются в габариты Европейских железных дорог;
2. Длина вагона-цистерны по автосцепкам – 18 м. При наличии двух горловин, расположенных симметрично относительно центра котла на расстоянии 6 м друг от друга, цистерны с данной длиной везде будут подходить под наливные эстакады. При этом длина котла должна быть на 1-2 м меньше длины вагона-цистерны по автосцепкам;
3. Внутренний объем котла – не менее 110 м^3 . Данное условие следует из характеристик существующих цистерн, с тем, чтобы перспективные цистерны не уступали, или превосходили существующие образцы по объему котла;
4. Масса цистерны в наполненном состоянии – 100 т;
5. Предельная нагрузка на ось тележки – 25 тс из условия применения в ваго-не-цистерне двух тележек типа 18-194-1 производства ОАО «НПК “Уралвагонзавод”»;
6. Масса одной тележки 18-194-1 – 5,0 т, двух тележек – 10 т;
7. Внутренний диаметр люков – 0,5 м;

8. Заполняемость котла СУГ – не более 85%;
9. Расчетная плотность СУГ для 85% заполнения – 600 кг/м³;
10. Внутреннее давление: рабочее – 2 МПа, пробное давление при гидравлических испытаниях – 3 МПа;
11. Эквивалентное значение ускорения для динамических режимов движения – 21,4 м/с² (2,18 g);
12. Коэффициент запаса по пределу текучести материала котла:
для рабочих нагрузок – не менее 1,65;
для режимов гидравлических испытаний – не менее 1,1;
13. Коэффициент снижения прочности сварного шва – 0,9;
14. Суммарное относительное уменьшение толщин обечайек и днищ за счет отрицательного допуска поставляемых листов и коррозии при эксплуатации – 0,1;
15. Относительное уменьшение толщины днищ при их изготовлении штамповкой – 0,1.

Выпускаемые промышленностью цистерны изготавливаются из стали 09Г2С, однако она обладает относительно низкой механической прочностью. Поэтому в качестве возможных материалов для изготовления котлов цистерн для перевозки СУГ рассмотрены варианты сталей из той же группы сталей, но имеющие лучшие механические характеристики: стали 10ХСНД, 16Г2АФ и 18Г2АФпс.

В результате, были предложены несколько вариантов конструктивного исполнения котла вагона-цистерны, а также материалов, из которых он может быть выполнен, параметры которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры котлов с внутренним диаметром 3 м, выполненных из различных марок стали с двумя технологическими горловинами

Параметры котла	Марка стали			
	09Г2С	10ХСНД	16Г2АФ, 18Г2АФпс	
	№1	№2	№3	№4
Внутренний объем, м ³	110	114	116	116
Масса груза СУГ, т	56,1	58,2	59,2	59,2
Масса котла, т	26,6	21,8	21,7	19,4
Остаток массы для дообо-рудования котла, т	7,3	10,1	9,1	11,5
Длина по днищам, м	16,1	16,6	16,9	16,9
Толщина обечайки, мм	20	16	16	14
Толщина днищ, мм	25	18	16	16
Допустимое рабочее давление, МПа	2,1	2,0	2,0	2,0
Допустимое пробное давление, МПа	3,2	3,0	3,1	3,0

Анализ полученных данных показал, что наилучшими из рассмотренных являются варианты №3 и №4. Эти варианты конструкции котла вагона-цистерны были приняты для дальнейшего расчетного анализа общей прочности.

Моделирование котла вагона-цистерны, действующих нагрузок, а также проведение прочностного расчета осуществлялось при помощи ПК «CAD/CAE Система автоматизированного расчета и проектирования механического оборудования и конструкций АРМ WinMachine 2010» и ПК «SADAS», разработанного на кафедре СМ8 МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Объемная конструктивная модель котла вагона-цистерны представлена на рис.2, а ее расчетная модель – на рис.3. Расчетная модель сформирована на основе МКЭ /8/ и состоит из пластинчатых и стержневых конечных элементов (КЭ). Все КЭ являются пространственными и могут испытывать сложное напряженно деформированное состояние. Параметры конечных элементов выбираются исходя из конструктивных параметров котла вагона-цистерны, соответствующих вариантам исполнения №3 и №4.

В качестве расчетных случаев рассматривались: 1) испытание котла вагона-цистерны пробным давлением $P_{пр}$, равным 3 МПа; 2) движение цистерны при рабочем давлении величиной 2 МПа с ускорением $a_{экр}$, значение которого составляло $21,4 \text{ м/с}^2$ (продольное (горизонтальное) ускорение - $14,7 \text{ м/с}^2$, вертикальное ускорение - $14,7 \text{ м/с}^2$, боковое ускорение - $4,9 \text{ м/с}^2$).

В рамках 1-ого расчетного случая котел вагона-цистерны испытывает действие сил собственного веса, давления жидкости и внутреннего давления $P_{пр}$. Во 2-ом расчетном случае на котел вагона-цистерны действуют внутреннее рабочее давление, давление СУГ и инерционные силы, вызванные движением вагона-цистерны с ускорением $a_{экр}$. Указанные нагрузки моделировались с учетом конечноэлементного представления модели котла вагона-цистерны, т.е. в виде узловых нагрузок.

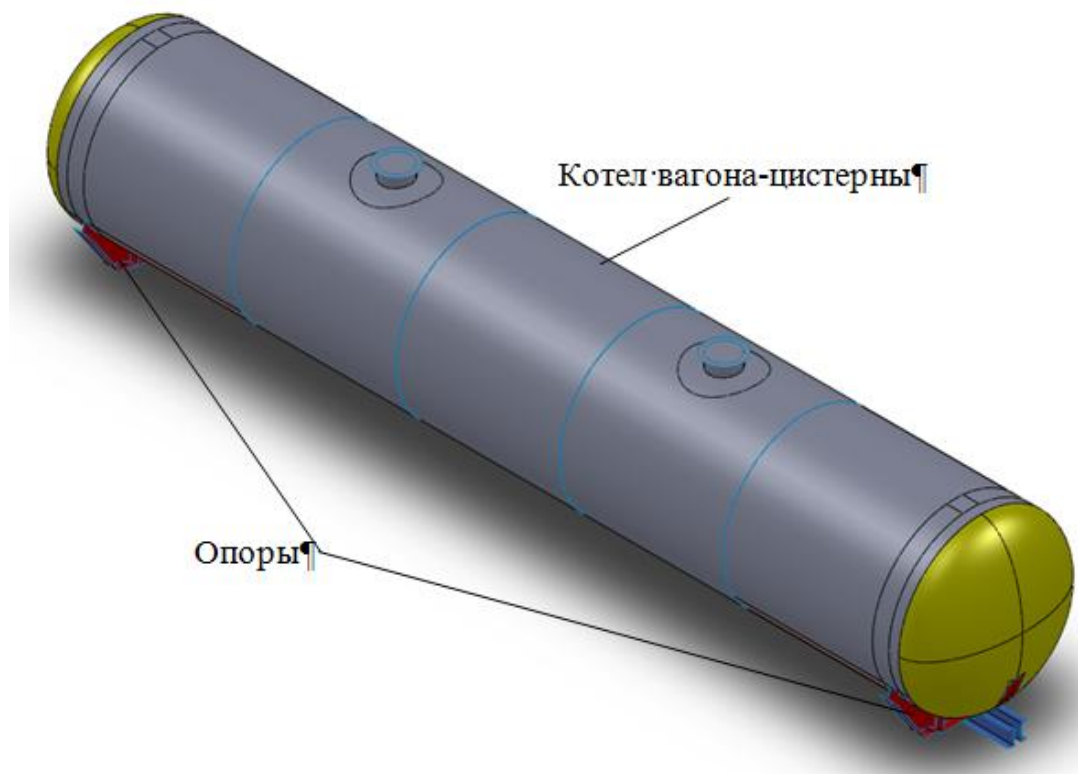


Рис.2.а. Объемная модель котла вагона-цистерны с опорами. Изометрическая проекция.

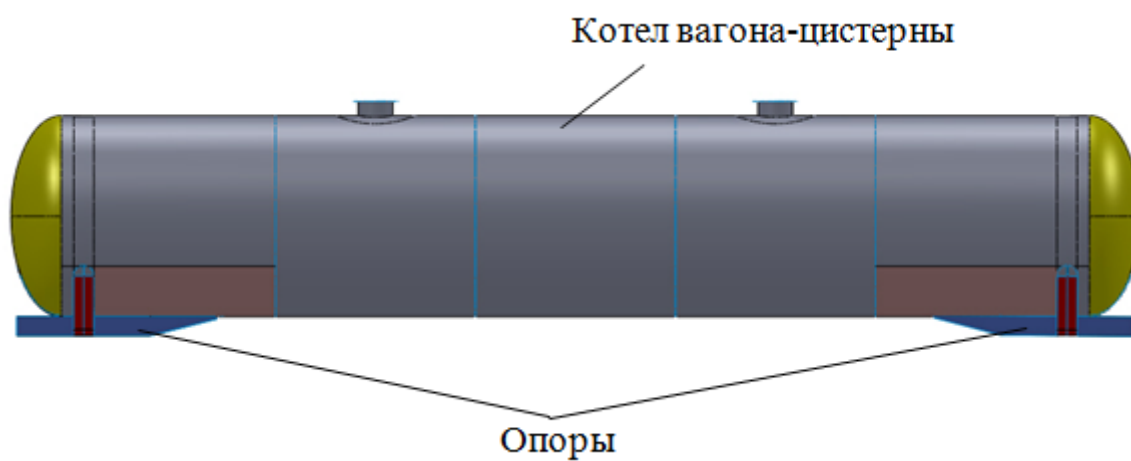
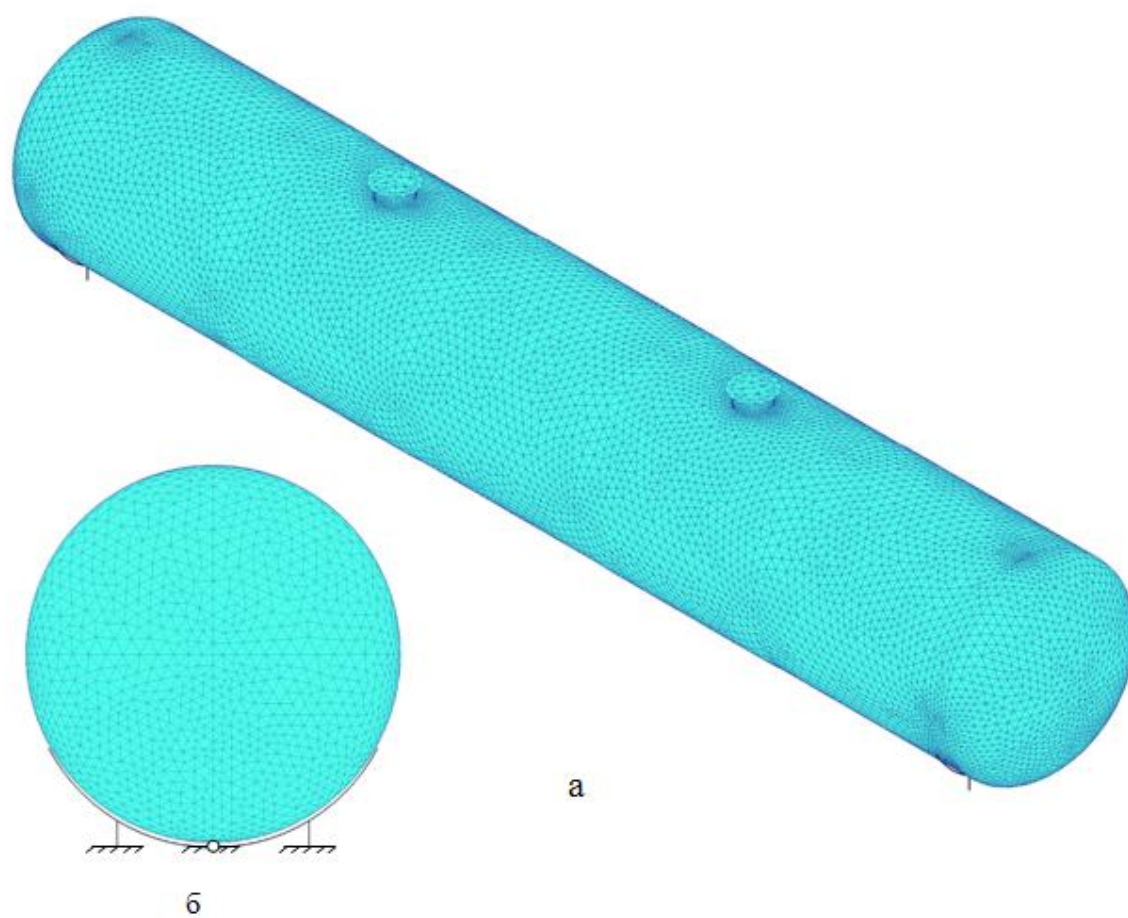


Рис.2.б. Объемная модель котла вагона-цистерны с опорами. Фронтальная проекция.



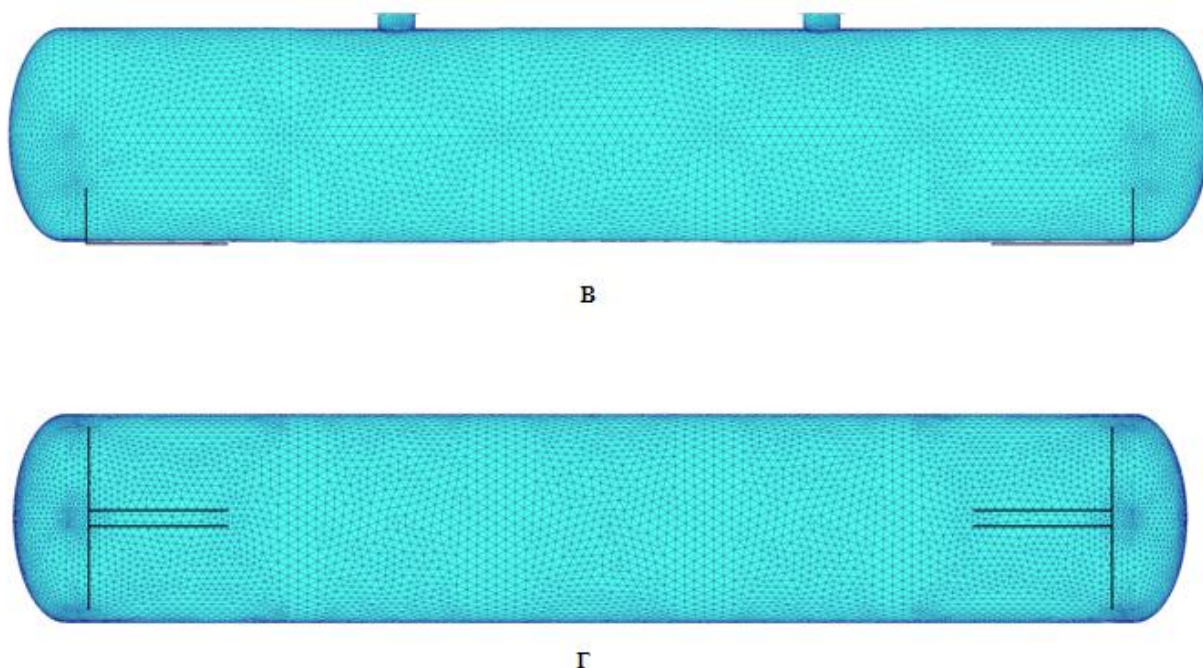


Рис.3. Модель котла вагона-цистерны с опорами: а – изометрическая проекция, б – вид сзади; в - вид сбоку, г – вид снизу

Проведенные расчеты на прочность при испытании котлов вагона-цистерны в вариантах №3 и №4 пробным давлением $R_{пр}$, равным 3 МПа и при их движении при рабочем внутреннем давлении величиной 2 МПа с ускорением $21,4 \text{ м/с}^2$, подтвердили их соответствие общей прочности с коэффициентам запаса по пределу текучести материала котла (440 МПа):

- для режимов гидравлических испытаний – не менее 1,1 (за исключением мест соединений оболочки котла с горловинами);
- для рабочих нагрузок при движении – не менее 1,65 (за исключением мест соединений оболочки котла с горловинами и днищ на участках с наибольшей кривизной).

Распределение напряжений в расчётных моделях показано на рис. 4...8.

По результатам проведенного анализа можно сделать заключение, что вариант исполнения котла вагона-цистерны №4 может быть рекомендован для дальнейших расчетно-конструкторских работ для создания вагона-цистерны для перевозки СУГ с улучшенными характеристиками.

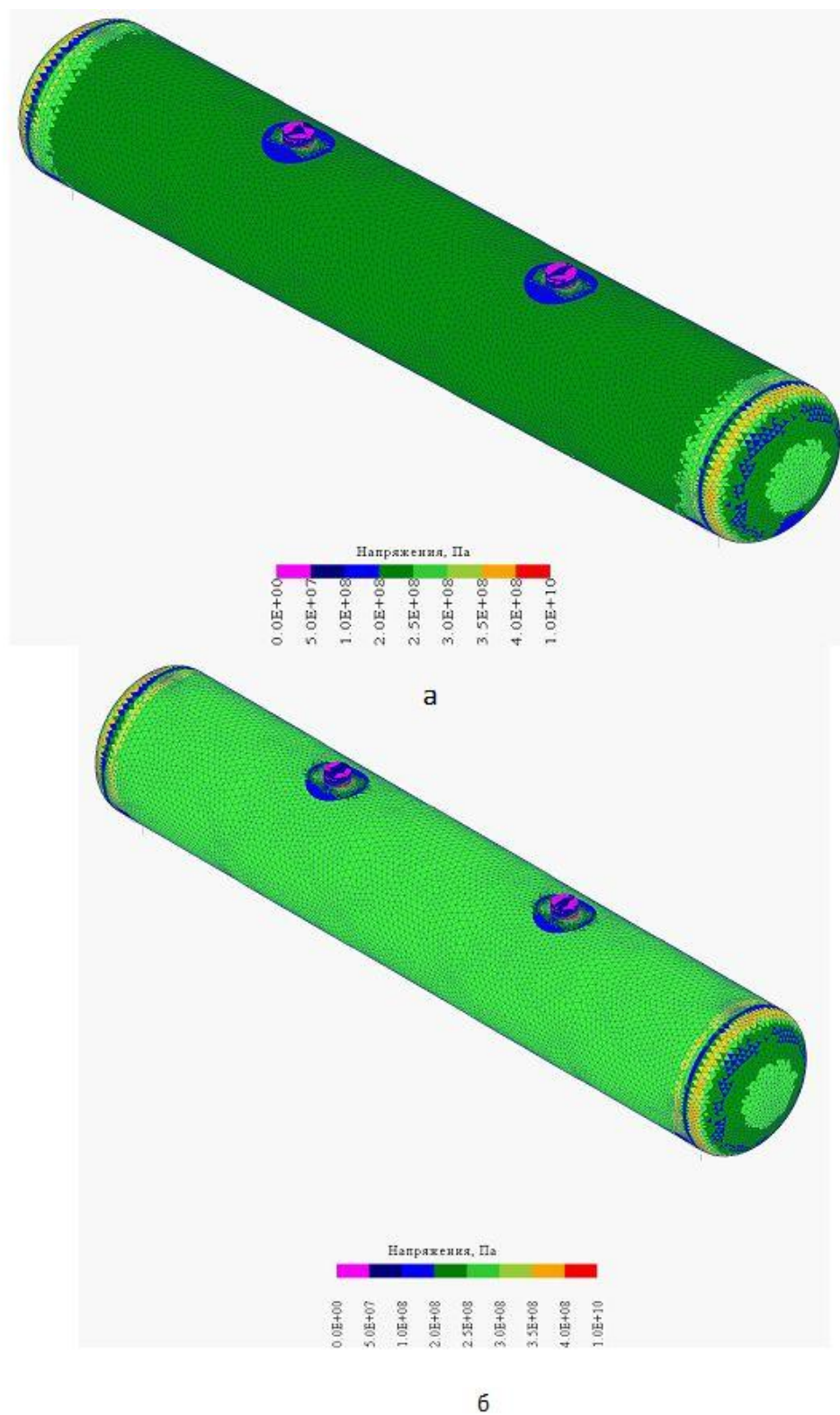
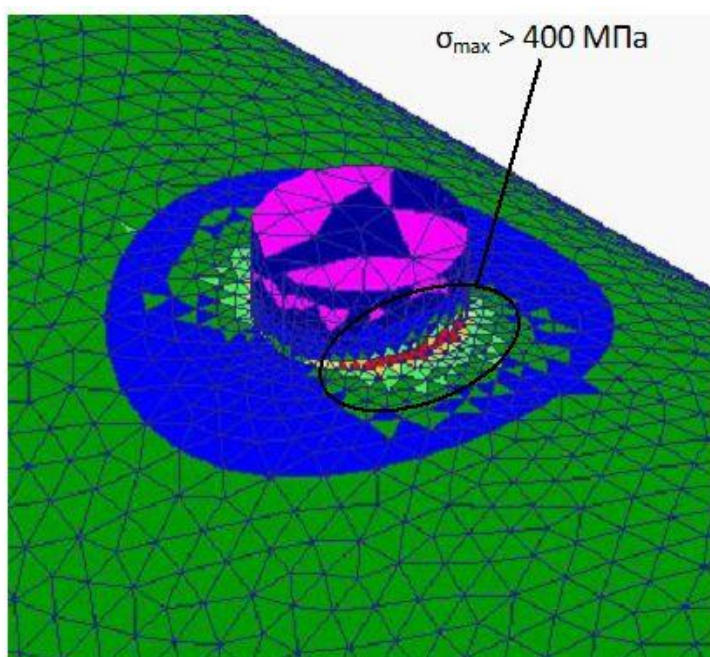
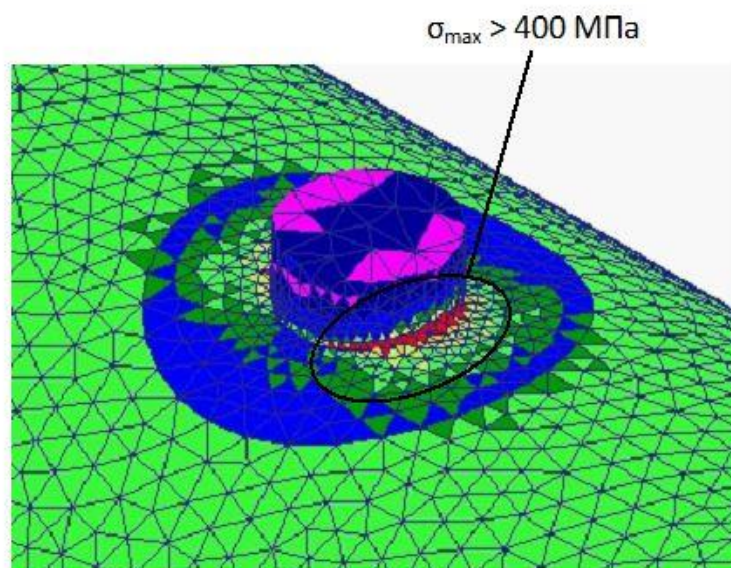


Рис.4. Общее распределение напряжений в модели котла вагона-цистерны при нагружении пробным давлением 3 МПа. а - вариант исполнения №3; б - вариант исполнения №4.



а



б

Рис.5. Наиболее нагруженный участок модели котла вагона-цистерны при нагружении пробным давлением 3 МПа. а - вариант исполнения №3; б - вариант исполнения №4.

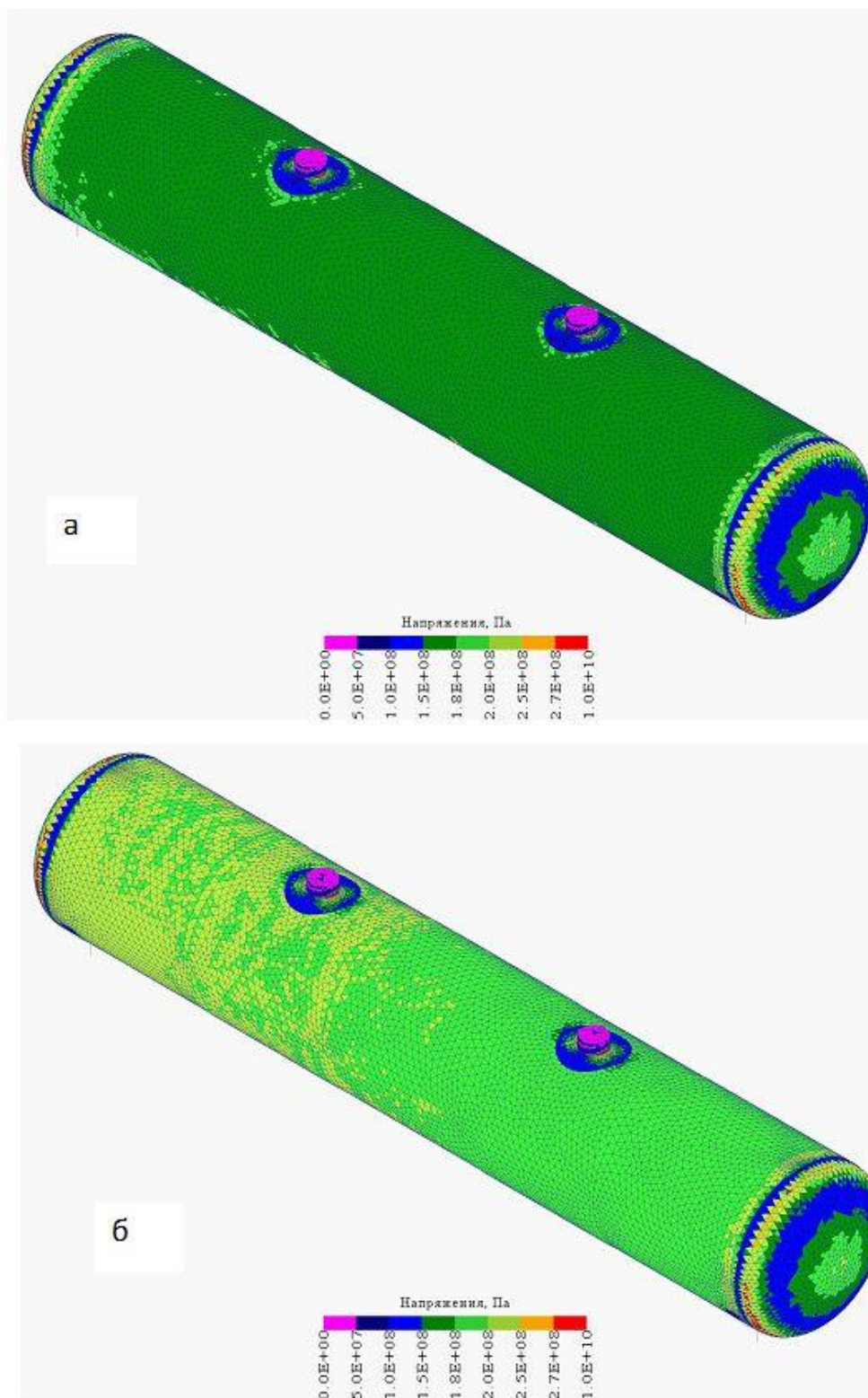


Рис.6. Общее распределение напряжений в модели котла вагона-цистерны. Движение цистерны при рабочем давлении и заданном ускорении. а - вариант исполнения №3; б - вариант исполнения №4

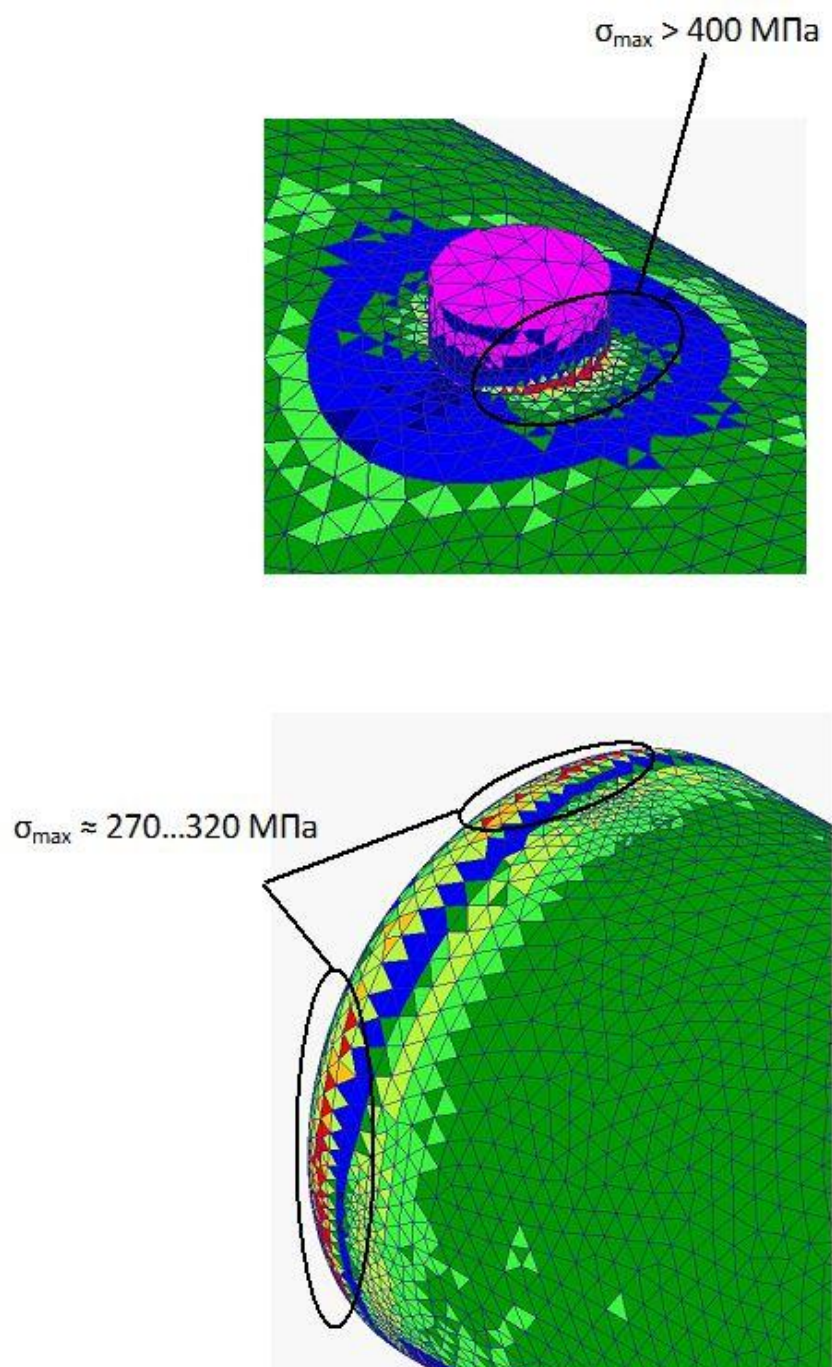


Рис.7. Наиболее нагруженные участки модели котла вагона-цистерны. Вариант исполнения №3. Движение цистерны при рабочем давлении и заданном ускорении

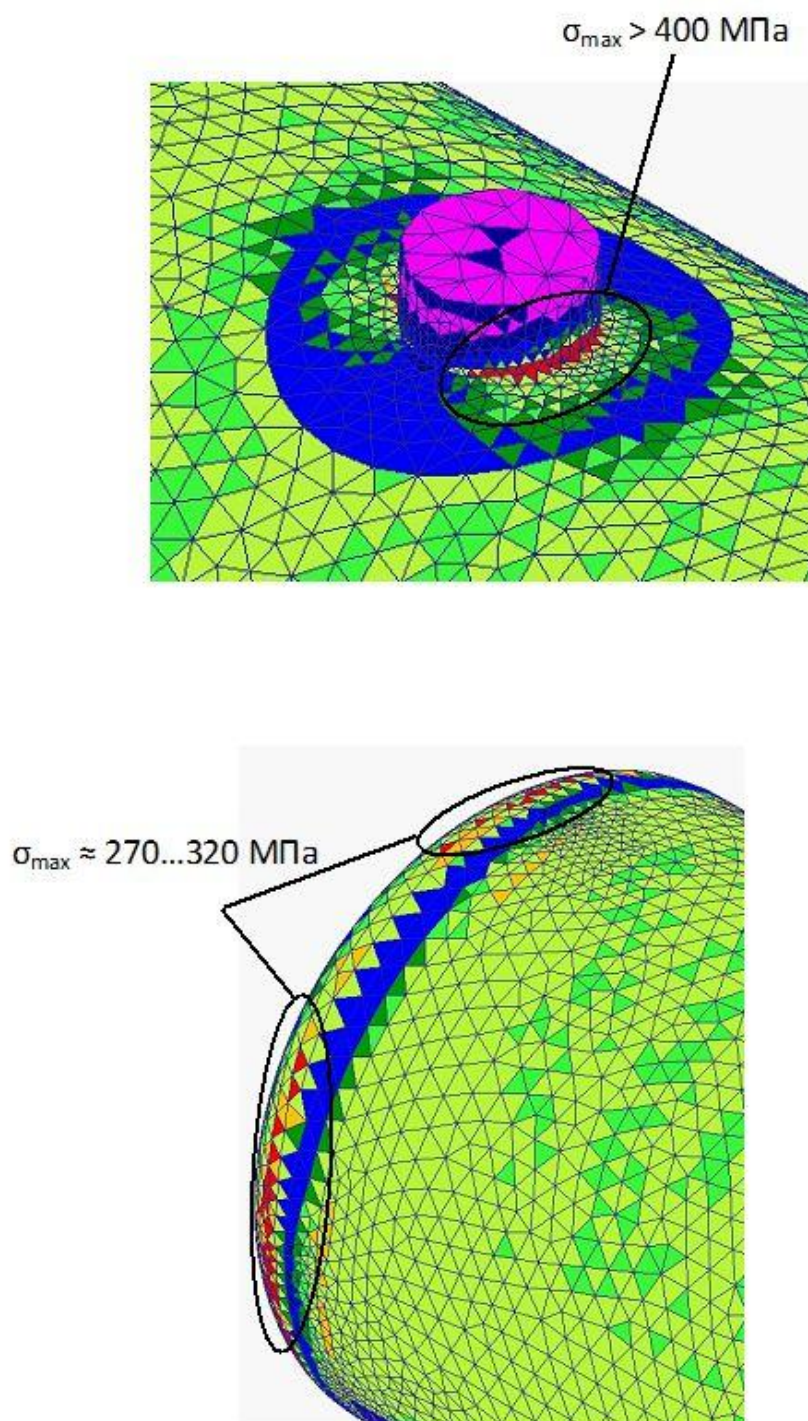


Рис.8. Наиболее нагруженные участки модели котла вагона-цистерны. Вариант исполнения №4. Движение цистерны при рабочем давлении и заданном ускорении

Список литературы

1. И. Афанасьев / "Союзы" новые и старые. Интервью с Д.А. Барановым, "Новости космонавтики", 2013г., №10, с.54
2. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов. Справочное пособие. М.- Изд-во стандартов 1993.
3. <http://www.nvzm.ru/index.php/2-kh-osnye-telezhki> Дата обращения: 30.08.2014г.
4. ГОСТ 14249-89. Расчет на прочность сосудов и аппаратов.
5. ГОСТ 25859-83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках.
6. ГОСТ 6533-78. Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов.
7. Заправочно-нейтрализационная станция. Разработка и эксплуатация /О.Е. Денисов, Р.Н. Кузнецов, О.П. Матвеева, Н.А. Морозов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006 – 240 с.;
8. Батэ К., Вилсон Е., Численные методы анализа и метод конечных элементов. –М.: Изд-во «Озон», 2012. – 445 с.