

УДК 622.692.23:620.194.2

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗЕРВУАРА**

**TECHNIQUE OF DEFINITION THE STRESS-STRAIN STATE
OF THE STEEL CYLINDRICAL TANK**

Кузеев И.Р., Тляшева Р.Р., Мансурова С.М.,
Ивакин А.В., Шайзаков Г.А., Байрамгулов А.С.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация

I.R. Kuzeev, R.R. Tlyasheva, S.M. Mansurova,
A.V. Ivakin, G.A. Shayzakov, A.S. Bayramgulov

FSBEI HPE “Ufa state petroleum technological university”, Ufa, Russian Federation

e-mail: vikinggirl@yandex.ru

Аннотация. В статье описано построение конечно – элементной модели стального цилиндрического резервуара объемом 10 000 м³ для хранения нефтепродуктов в программном комплексе ABAQUS. На основании созданной трехмерной модели проведен расчет напряженно-деформированного состояния стенки резервуара с учетом реальной толщины стенки в каждом поясе, веса конструкции и наличия штуцеров. Расчет НДС показал, что напряжения распределены неравномерно по стенке резервуара. В результате обозначены наиболее опасные зоны, в которых значение напряжений максимальное. Для точного определения места зарождения трещины применялся модуль FE-SAFE, который показал, что концентратором напряжений является приемо-раздаточный патрубок, вблизи которого образуется трещина.

На основании созданной трехмерной модели проведен анализ результатов численных экспериментов, которые показали необходимость учета изменения напряженно-деформированного состояния при его эксплуатации.

Abstract. In article construction certainly – element model of the 10 000 m³ steel cylindrical tank for storage of oil products in the program ABAQUS complex is described. On the basis of the created three-dimensional model calculation intense the deformed condition of a wall of the tank taking into account the real thickness of a wall in each belt, the weight of a design and existence of unions is carried out. Calculation of the VAT showed that tension is distributed unevenly on a tank wall. The most dangerous zones, in which value of tension the maximum are as a result designated. The FE-SAFE module which showed was applied to exact definition of a place of origin of a

crack that the concentrator of tension is the receiving-distributing branch pipe near which the crack is formed.

On the basis of the created three-dimensional model the analysis of results of numerical experiments which showed need of the accounting of change intense the deformed condition at its operation is carried out.

Ключевые слова: резервуар, напряжение, напряженно-деформированное состояние, численный метод, взлив.

Keywords: the tank, tension, intense the deformed condition, a numerical method.

Резервуарные парки являются неотъемлемой частью системы трубопроводного транспорта жидких углеводородов и технологического процесса нефтяного производства и нефтепереработки. Основной объем отечественных резервуарных парков для хранения нефти и нефтепродуктов был построен в 60-70 годы прошлого века по строительным нормам того времени. В настоящее время в ремонте постоянно находится около 20% всех резервуаров. По имеющимся данным 70% существующих стальных вертикальных резервуаров (РВС) эксплуатируются более 20 лет, более 10% из них – свыше 30 лет. Средний возраст сооружений постоянно растет, а ремонтные мероприятия, осуществляемые в настоящее время, полностью не обеспечивают восстановления их несущей способности.

Анализ статистики разрушений конструкций показал, что отказы и аварии наблюдались на стадии строительства – 3%; отказы при испытании – 32%; при эксплуатации – 64% и при ремонте – 1%. Причем, на первые три – пять лет эксплуатации приходится почти половина аварий. На период эксплуатации от пяти до пятнадцати лет приходится не более 25% аварий. После истечения двадцатилетнего срока эксплуатации число разрушений начинает резко увеличиваться.

Современные нормативные документы (в частности, ГОСТ Р 52910-2008 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов») не устанавливают предельного срока службы резервуаров. Основанием для демонтажа резервуара являются лишь результаты диагностического обследования – приборного и расчетного (например, определение напряженно-деформированного состояния (НДС) резервуара и его конструкций).

В процессе эксплуатации резервуары подвергаются комплексу воздействий статических, малоцикловых, снеговых и ветровых нагрузок, температур и агрессивных рабочих сред, а также образуются несовершенства геометрической формы, что приводит к существенному уменьшению несущей способности конструкции, снижению эксплуатационной надежности и сокращению долговечности резервуарных конструкций.

Оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) резервуаров типа РВС проводится по безмоментной теории расчета оболочек согласно [3]. При расчете по данной теории учитываются только кольцевые и меридиональные напря-

жения, а значит, представляется затруднительным оценить реальную картину распределения всех действующих напряжений.

Не секрет, что многие программные коды программ для расчета НДС основаны на методах пяти, десяти, или даже пятнадцатилетней давности. Эти методы, подходы и допущения были разработаны с учетом прежней производительности и стоимости компьютеров. Однако сегодня моделирование не может основываться только на традиционных линейных методах, которые применялись ранее. Бурное развитие современной вычислительной техники, использование многоядерных процессоров, 64-битной архитектуры, прогресс в развитии конечно-элементного анализа, жесткая конкурентная борьба подталкивают современные компании к использованию программных продуктов, удовлетворяющих новым требованиям.

Поэтому возникает необходимость в разработке метода оценки НДС, который позволит учесть реальное распределение напряжений от действующих нагрузок.

Для решения данной задачи был выбран ПК ABAQUS, в котором развитие методов базируется на поиске современных подходов в области конечно-элементного анализа.

ABAQUS является универсальным продуктом в области прочностного инженерного анализа, обеспечивая пользователей инструментом для моделирования реального мира с большой точностью и за меньшее время.

При разработке конечно-элементной модели с помощью ПК ABAQUS проведен статический анализ НДС стенки резервуара с учетом взлива нефтепродукта. Такой анализ позволяет получить дополнительную информацию о возможных причинах разрушения конструкции.

Расчет НДС оболочки резервуара проводился методом конечных элементов. Для этого создана модель резервуара с учетом реальной толщины стенки в каждом поясе, веса конструкции и наличия штуцеров.

Для моделирования принимался модуль Part ПК ABAQUS.

Перед началом расчета были заданы нагрузки и граничные условия в виде ограничений на перемещения. При первом этапе моделирования для упрощения расчета были применены следующие допущения:

- равномерный сварной шов;
- отсутствие «внутренностей» резервуара;
- отсутствие внешних воздействий на резервуар:
- температурное воздействие;
- сейсмическое воздействие;
- ветровое воздействие;
- отсутствие платформы для размещения резервуара, вследствие чего для закрепления днища использовалась схема упруго заземленного стержня.

Граничными условиями для данного резервуара служат:

- взлив на высоту равную 10,113 м;

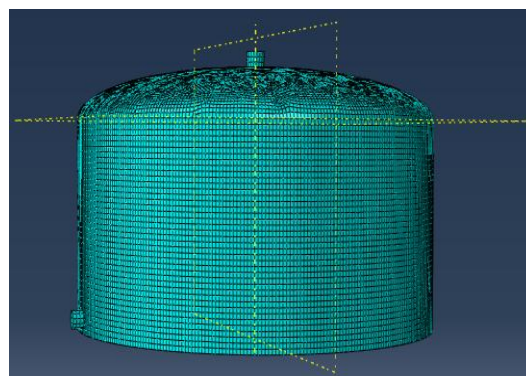
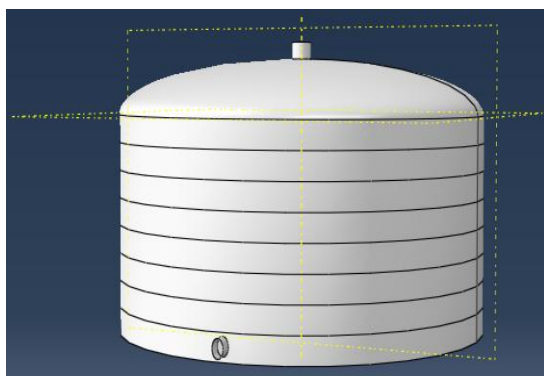
- закрепление днища резервуара осуществлялось по схеме упруго-зашемленного стержня;

- жидкостью хранимой в резервуаре является дизельное топливо;

- давление задавалось отдельно на каждый пояс резервуара.

Результаты, полученные при расчете созданной модели с условием максимального разлива нефтепродукта равного 10,113м, приведены на рисунке 2. Из рисунка 2, видно, что интенсивность напряжений распределяется неравномерно по всей поверхности рассматриваемой обечайки. В местах врезки штуцеров возникают наиболее напряженные участки, причем в процессе расчета в ПК ABAQUS задавалось жесткое закрепление штуцеров.

На рисунке 3 представлена схема с произвольно выбранными областями в обечайке резервуара, по которым получены значения напряжений, рассчитанные в ПК ABAQUS, с учетом уровня разлива нефтепродукта и толщины стенки.



а) высота резервуара от днища до верхней полки обвязочного уголка, мм: 11920; диаметр резервуара по нижнему поясу, мм: 34200; толщина стенки изменялась от 0,013м до 0,009м, толщина кровли резервуара: 0,004м, толщина днища резервуара: 0,005м

б) твердотельная модель и сетка конечных элементов. Для расчета построена трехмерная модель с учетом влияния собственного веса аппарата принята плотность металла $\rho=7800 \cdot \text{кг}/\text{м}^3$; модуль упругости при температуре 20°C $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

а) 3D модель резервуара; б) конечно-элементная модель резервуара
Рисунок 1. Расчетная модель резервуара

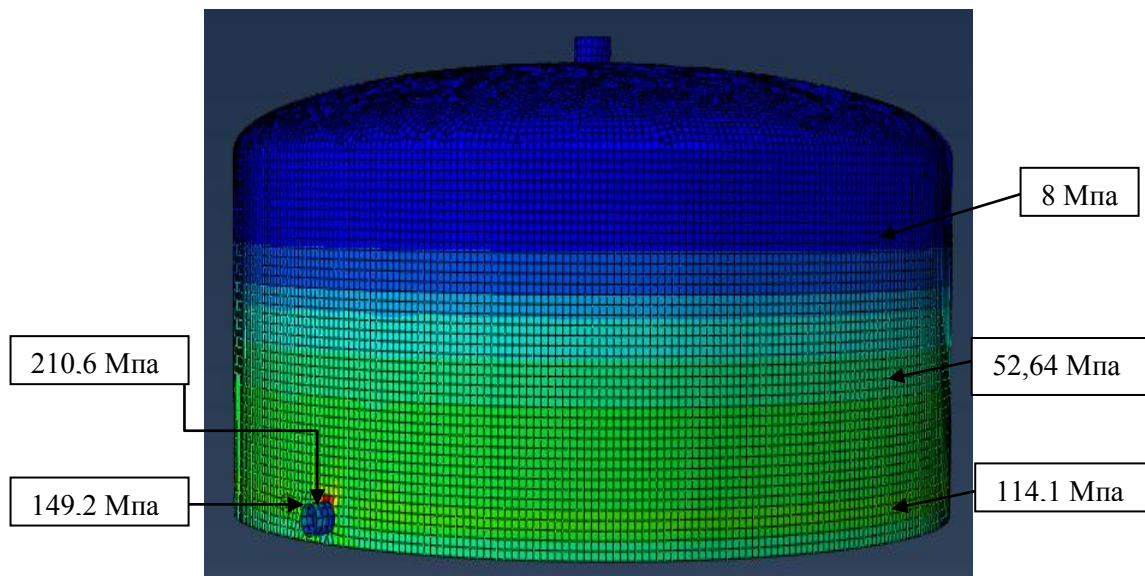


Рисунок 2. Напряженно-деформированное состояние цилиндрической обечайки резервуара при максимальном взливе нефтепродукта

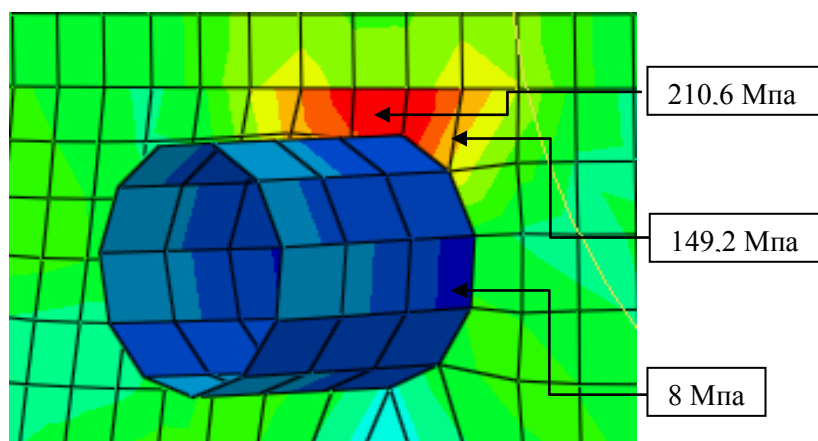


Рисунок 3. Области расчета напряжения в обечайке

Сталь 09Г2с, из которой изготовлен исследуемый резервуар, имеет следующие прочностные характеристики:

- предел текучести $\sigma_T = 325 - 345$ МПа;
- предел прочности $\sigma_B = 470 - 490$ МПа;
- и допускаемое напряжение при 20 °С $[\sigma] = 300$ МПа.

На основании результатов численного моделирования на примере резервуара вертикального стального было показано, что напряжения в обечайке распределяются неравномерно, образуя локальные повышенные напряженные зоны. Учитывая, что данный объект периодически работает в режиме заполнения и опорожнения, металл обечайки испытывает знакопеременные нагрузки, которые в локальных областях в процессе эксплуатации могут достигать малоциклового объема.

Так как полученные результаты в ПК ABAQUS не дают точного определения места зарождения трещин, предлагается использование дополнительного модуля FE-SAFE.

Целью расчета в модуле FE-SAFE является анализ долговечности резервуара и исследования поведения резервуара с появлением трещин.

FE-SAFE – это модуль предназначенный для анализа долговечности конструкции. FE-SAFE получает напряжения или деформации для различных случаев нагружения, а также использует данные для материалов при циклических нагрузках для предсказания ресурса конструкции. Алгоритм расчета fe-safe представляет собой следующую последовательность, полученные в программном комплексе Abaqus данные интегрируются в модуль fe-safe, далее следует выбор параметров расчета модуля, а также их размерность. Затем следует выбор материала, алгоритм вычисления и запуск модуля на расчет.

Полученные в программном комплексе Abaqus данные были интегрированы в модуль FE-SAFE для определения наиболее вероятного места возникновения трещины в резервуаре. Параметрами расчета модуля выбрано воздействие внутреннего давления на стенки резервуара и его размерность, а также размерность других параметров. В качестве материала была выбрана сталь марки 09Г2С.

Вследствие того, что модуль FE-SAFE не имеет возможности наглядно продемонстрировать результат в виде рисунка, полученные данные из него импортируются в модуль Visualization ПК ABAQUS. Из которых видно, что концентратором напряжений является приемо-раздаточный патрубок, вблизи которого образуется трещина. Жизненный цикл резервуара до зарождения трещины составил 28000 циклов, что приблизительно соответствует сорока годам его эксплуатации.

Согласно расчётам, проведенным в соответствии с РД 153-112-017-97 [8] остаточный ресурс стенки резервуара определяется по формуле:

$$N_c = N_o + N_p,$$

где N_o - число циклов до образования макротрещин;

N_p - число циклов до образования лавинообразной трещины.

Таким образом,

$$N_c = 17283,95 + 3499,96 = 20783,91 \text{ циклов.}$$

При частоте циклов заполнения взятой с большим запасом и равной 500 циклов в год, срок службы резервуара составит приблизительно 41 год.

Результат обработки в модуле FE-SAFE с последующим импортированием в ПК ABAQUS показан на рисунке 4.

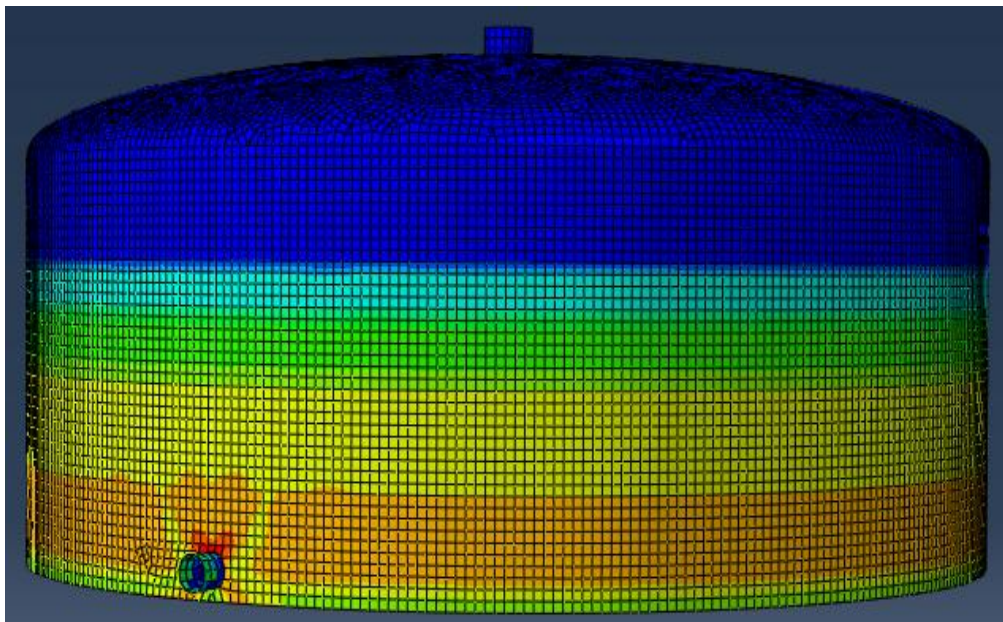


Рисунок 4. Результат обработки в модуле FE-SAFE с последующим импортированием в ПК ABAQUS

Из рисунка 4 следует что, выделенная красным цветом область является местом зарождения трещины, а остальные цвета восходящие к верху резервуара предполагают последующее развитие трещин при увеличении количества циклов разлива.

Напряженно-деформированное состояние резервуара на стадии проектирования отличается от НДС при эксплуатации из-за целого ряда причин. Например, при изготовлении резервуара наиболее распространённым способом является метод рулонирования. При сворачивании и разворачивании стенки резервуара возникают пластические деформации. Учитываются ли повреждения, которые могут быть нанесены при данном методе изготовления? Остаточные пластические деформации приводят к остаточным напряжениям, изменению напряженного состояния по отношению к напряженному состоянию на стадии проектирования. Современные методы 3д - сканирования позволяют более точно отразить его особенности, что позволит просчитать реальный резервуар и определить, где могут возникнуть трещины.

Вторым этапом оценки НДС резервуара предполагается создать реальную модель резервуара путем натурной съемки, оценить НДС реальной конструкции с учетом параметров эксплуатации.

Выводы

На основании созданной конечно-элементной модели резервуара в программном комплексе Abaqus показано реальное распределение напряженно-деформированного состояния стенки резервуара. При помощи модуля FE-SAFE

показана зона возникновения трещины, а также численными методами подсчитан жизненный цикл резервуара, который составил 28 000 циклов, что соответствует 40 годам его эксплуатации.

Литература

1. Кандаков Г.П. Проблемы отечественного резервуаростроения и возможные пути их решения // Промышленное и гражданское строительство. 1998. № 5. С. 253.
2. Шерстобитова Р.Т., Тляшева Р.Р. Интеграция науки и высшего образования в области био- и органической химии и механики многофазовых систем. // Материалы III Всерос. науч. INTERNET-конф. Уфа: УГНТУ, 2005. С. 88.
3. СНиП П–23–81*. Стальные конструкции. М.: Стройиздат, 1982. 96 с.
4. ПБ 03-605-03 Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. М.: ПИО ОБТ, 2003. 90 с.
5. Оценка напряженно-деформированного состояния резервуара после его дооборудования (оптимизация расположения патрубков резервуара). Остаточный ресурс нефтегазового оборудования / Шерстобитова Р.Т. и др. Уфа: УГНТУ, 2006. С. 128-132.
6. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справоч. пособие. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.
7. Гафаров Р.Х., Шарафиев Р.Г., Ризванов Р.Г. Краткий справочник инженера-механика. Основные формулы и справочные данные по расчетам на прочность. Уфа: изд-во УГНТУ, 1995. 112 с.
8. РД 153-112-017-97. Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров, Уфа: 1997. 100 с.

References

1. Kandakov G.P. Problemy otechestvennogo rezervuarostroenija i vozmozhnye puti ih reshenija // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 1998. № 5. 253 s. [in russian].
2. Sherstobitova R.T., Tljashева R.R. Integracija nauki i vysshego obrazovanija v oblasti bio- i organicheskoi himii i mehaniki mnogofazovykh sistem // Materialy III Vseros. nauch. INTERNET-konf. Ufa: UGNTU, 2005. S. 88. [in russian].
3. SNiP P–23–81*. Stal'nye konstrukcii. M.: Strojizdat, 1982. 96 s. [in russian].
4. PB 03-605-03 Pravila ustrojstva vertikal'nyh cilindricheskikh stal'nyh rezervuarov dlja nefi i nefteproduktov. Moskva: PIO OBT, 2003. 90 s. [in russian].
5. Ocenka naprja-zhenno-deformirovannogo sostojanija rezervuara posle ego dooborudovanija (optimizacija raspolozhenija patrubkov rezervuara). Ostatochnyj resurs neftegazovogo oborudovanija / Sherstobitova R.T. i dr. Ufa: UGNTU, 2006. S. 128-132. [in russian].

6. Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smaljuk A.F ANSYS dlja inzhenerov. Spravochnoe posobie. M.: Mashinostroenie, 2004. 512 s. [in russian].

7. Gafarov R.H., Sharafiev R.G., Rizvanov R.G. Kratkij spravochnik inzheneramehanika. Osnovnye formuly i spravochnye dannye po raschetam naprochnost'. Ufa: Izd-vo UGNTU, 1995. 112 s. [in russian].

8. RD 153-112-017-97. Instrukcija po diagnostike I ocenke ostatochnogo resursa vertikal'nyh stal'nyh rezervuarov, Ufa: 1997. 100 s.[in russian].

Сведения об авторах

Кузеев И. Р., д-р техн. наук, проф., зав. кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО УГНТУ, Уфа, Российская Федерация

I. R. Kuzeev, dr. sci. tech., prof., head of chair “Technological machines and equipment” FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation

Тляшева Р. Р., д-р техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, Уфа, Российская Федерация

R. R. Tlyasheva, dr. tech. sci., associate prof. of chair “Technological machines and equipment” FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation

Мансурова С. М., аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, Уфа, Российская Федерация

S. M. Mansurova, post-graduate student of chair “Technological machines and equipment” FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation

Ивакин А. В., магистрант кафедры «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВПО УГНТУ, Уфа, Российская Федерация

A. V. Ivakin, undergraduate student of chair “Technological machines and equipment” FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation

Шайзаков Г. А., магистрант кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, Уфа, Российская Федерация

G. A. Shayzakov, undergraduate student of chair “Technological machines and equipment” FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation

Байрамгулов А. С., аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, Уфа, Российская Федерация

A. S. Bayramgulov, post-graduate student of chair “Technological machines and equipment” FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: vikinggirl@yandex.ru