

УДК 622.692.23:620.194.2

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
СТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗЕРВУАРА
С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК**

**CYLINDRICAL STEEL TANK STRESS-STRAIN STATE
EVALUATION WITH OPERATIONAL LOADS
TAKEN INTO ACCOUNT**

Мансурова С.М., Тляшева Р.Р., Ивакин А.В.,
Шайзаков Г.А., Байрамгулов А.С.,
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет», г. Уфа, Российская Федерация

S. M. Mansurova, R. R. Tlyasheva,
A.V. Ivakin, G. A. Shayzakov, A.S. Bayramgulov,
FSBEI NPE “Ufa State Petroleum Technological University”,
Ufa, the Russian Federation
e-mail: mansurova.s.m@yandex.ru

Аннотация. 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, также образуются несовершенства геометрической формы, что приводит к существенному уменьшению несущей способности

конструкции, снижению эксплуатационной надежности и сокращению долговечности резервуарных конструкций. Методы численного моделирования, в отличие от стандартных методов расчета на прочность и устойчивость, позволяют на этапе разработки геометрической модели создать адекватную конечно – элементную модель. В статье описан анализ напряженно-деформированного состояния резервуара с учетом эксплуатационных нагрузок при помощи ПК ABAQUS. На основании анализа НДС при помощи моделирования методом конечных элементов на примере резервуара вертикального стального было показано, что напряжения в обечайке распределяются неравномерно, образуя локальные повышенные напряженные зоны, которые при утонении стенки значительно возрастают. Зоны концентрации напряжений, располагающиеся непосредственно в местах сопряжения обечайки и штуцера, а также в области сварного шва первого и второго поясов, не учитываются при расчете по стандартным методикам. Учитывая, что данный объект периодически работает в режиме заполнения и опорожнения, металл обечайки испытывает знакопеременные нагружения, которые в локальных областях в процессе эксплуатации могут достигать малоциклового области.

Abstract. Current regulations (in particular, GOST R 52910-2008 "Vertical cylindrical steel tanks for oil and oil-products") don't specify a service limit for the tanks. The tank can be dismantled only on the basis of the results of diagnostic examination – both instrumental and calculating (for example, determination of strain-stress state of the tank and its structures). In the process of operation the tanks are exposed to a complex of stresses: static loads, low-cycle fatigue, snow and wind loads, temperatures and aggressive operational conditions. Besides, some geometrical imperfections are created. All this leads to substantial reduction of load bearing capacity, in-service reliability decrease and reduction of the tank structural durability. Numerical modeling methods, unlike the standard methods of strength and stability calculation, make it

possible to create an adequate finite element model at the stage of development of a geometric model. The article describes a tank strain-stress state analysis with the help of ABAQUS software suite, taking into account operational loads. The strain-stress state analysis by finite element modeling method through the example of a vertical cylindrical steel tank showed nonuniform stress distribution in the shell, producing overstressed local areas which considerably increase with the wall thinning. The stress concentration zones which are located directly in the places of shell/nozzle junction as well as in the first and second ring weld area which are not considered in standard methods of calculation.

Considering that this unit periodically works in filling and emptying mode, the shell metal experiences reversed loadings which can reach low-cycle area when used in local zones.

Ключевые слова: резервуар, напряжение, напряженно-деформированное состояние, численный эксперимент, конечно-элементная модель.

Key words: tank, stress, stress-strain state, numerical experiment, finite element model.

Резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов являются одним из основных технологических объектов нефтебаз и магистральных нефтепродуктопроводов [1]. От их нормальной работы и эксплуатационной надежности зависит экологическая обстановка района, где расположена база хранения нефти и нефтепродуктов, центральные и промежуточные резервуарные парки. Обеспечение необходимого уровня надежности стального вертикального цилиндрического резервуара закладывается на этапах проектирования и сооружения, а осуществляется – на этапе эксплуатации.

При авариях резервуаров разлившиеся нефтепродукты загрязняют прилегающие территории и водные бассейны. Экономический ущерб от

аварий с утечкой нефтепродуктов включает не только прямые потери, но и затраты на экологические мероприятия по восстановлению окружающей среды, а также затраты на восполнение запаса нефтепродуктов.

Современные нормативные документы, в частности, ГОСТ Р 52910 – 2008 не устанавливают предельного срока службы резервуаров. Основанием для демонтажа резервуара являются лишь результаты диагностического обследования – приборного и расчетного. Резервуар представляет собой вертикальную оболочку с днищем, поэтому аналитические расчеты таких объектов связаны с безмоментной теорией оболочек. Однако, наличие геометрических особенностей (изменение сечения элементов конструкции, наличие люков, место врезки штуцеров, наличие неукрепленных отверстий и т.д.) существенно меняет симметрию конструкции, распределение напряжений и деформаций в локальных зонах, что сложно учесть при проведении аналитических расчетов [2].

Традиционный подход к оценке остаточного ресурса заключается в обработке данных замеров толщины стенки резервуара и выявлении средней и максимальной величин коррозионного разрушения. Далее для получения величины ресурса используется простая модель, основанная на гипотезе линейного (по времени) характера коррозионного разрушения.

Расчеты проводятся в соответствии с РД 153–112–017–97, РД 08–95–95 [3,4].

Для определения остаточного ресурса проводятся следующие расчеты:

- поверочный расчет стенки резервуара на прочность;
- поверочный расчет стенки резервуара на устойчивость;
- расчет остаточного ресурса по критерию коррозионного износа;
- расчет остаточного ресурса по критерию малоциклового усталости (при необходимости).

Прогнозирование остаточного ресурса

Остаточный ресурс резервуара определяется на основании анализа условий эксплуатации, результатов технического диагностирования и критериев предельного состояния. Стальные резервуары подвергаются при эксплуатации периодическим нагрузкам и коррозионно-эрозионному разрушению, поэтому предельное состояние может наступить либо от малоцикловой усталости, либо вследствие потери несущей способности, вызванной утонением стенки. Эти критерии положены в основу расчета остаточного ресурса стальных резервуаров [3]. Остаточный ресурс определяется отдельно по каждому критерию, а в качестве окончательного назначается минимальное из двух найденных значений.

Прогнозирование ресурса по критерию коррозионного износа

Гарантированный (гамма – процентный) ресурс определяется по формуле:

$$T_1 = T_p (1 - U_\gamma v_t), \quad (1)$$

где U_γ — квантиль нормального распределения, соответствующий доверительной вероятности $\gamma = 0,99$; v_t — коэффициент вариации ресурса; T_p — расчетный средний ресурс, определяемый по формуле:

$$T_p = \frac{h_{пред} k_b}{c (-\ln \beta)^{1/b}}, \quad (2)$$

где k_b и b — параметры распределения Вейбулла; c — средняя скорость коррозии; β — показатель масштаба, зависящий от объема измерений; $h_{пред}$ — предельно допустимая глубина повреждения.

Прогнозирование ресурса по критерию малоциклового усталости

Остаточный ресурс определяется по формуле:

$$T_2 = N_{oc} / n_o, \quad (3)$$

где $N_{oc} = N_o(1 - \beta_{kc})$, β_{kc} — коэффициент влияния среды, определяемый формуле $\beta_{kc} = \lambda \lg N_o$, λ — коэффициент коррозии, n_o — годовая оборачиваемость резервуара 1/год.

Величина N_o равна:

$$N_o = \min\{N_1; N_2\},$$

где

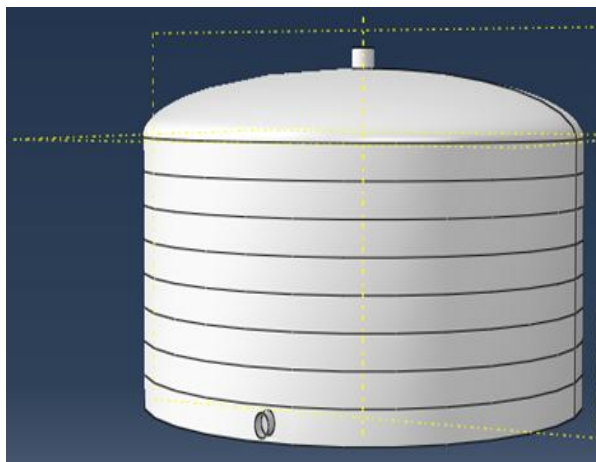
$$N_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{1,28E \ln \frac{1}{1-\psi}}{1,28n_\sigma \sigma_a^* / \phi_c - \sigma_{-1}} - 1 \right)^2, \quad N_2 = \frac{1}{4n_N} \left(\frac{1,28E \ln \frac{1}{1-\psi}}{1,28\sigma_a^* / \phi_c - \sigma_{-1}} - 1 \right)^2,$$

где ψ — относительное сужение; n_σ — коэффициент запаса по напряжениям, равный 2; n_N — коэффициент запаса по долговечности, равный 10; σ_a^* — амплитуда условных напряжений.

Достоинства традиционных подходов к оценке остаточного ресурса заключается в простоте расчетов и достаточно адекватной оценке остаточного ресурса при правильном использовании методик. При расчетах не учитывается характер распределения разрушения по поверхности резервуара, что в ряде случаев приводит к серьезным ошибкам, и является основным **недостатком**.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что оценка напряженно — деформированного состояния (НДС) резервуаров типа РВС проводится по безмоментной теории расчета оболочек, и при расчете по данной теории учитываются только кольцевые и меридиональные напряжения, а значит, представляется затруднительным оценить реальную картину распределения всех действующих напряжений.

На примере резервуара РВС — 10 000 м³, материал — Ст3 [5] с количеством поясов 8 и двумя приемо-раздаточными патрубками. Модель РВС представлена на рисунке 1.



- 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.

Рисунок 1. Модель РВС

Значения толщин стенок представлены в таблице 1, в соответствии с паспортом технического устройства [5]. В ходе работы были созданы две модели с максимальными толщинами стенок — проектная модель и с учетом утонения стенок в условиях эксплуатации РВС.

Таблица 1. Толщины стенок резервуара

Номер пояса	Паспортные значения толщин стенок, мм	Значения толщин с учетом утонения стенок, мм
1	13	6,5
2	11	5,5
3	10	5,5
4	9	5,5
5	9	5,5
6	9	5,5
7	9	5,5
8	9	5,5

В настоящее время получить приемлемо точную оценку НДС в зоне локальных концентраторов напряжений различных типов можно с использованием метода конечных элементов [6]. Метод конечных элементов позволяет учесть такие факторы, как конструктивные особенности обечайки, при этом получить напряженно – деформированное

состояние резервуара в условиях приближенных к действительным [2].

Построение конечно-элементной модели

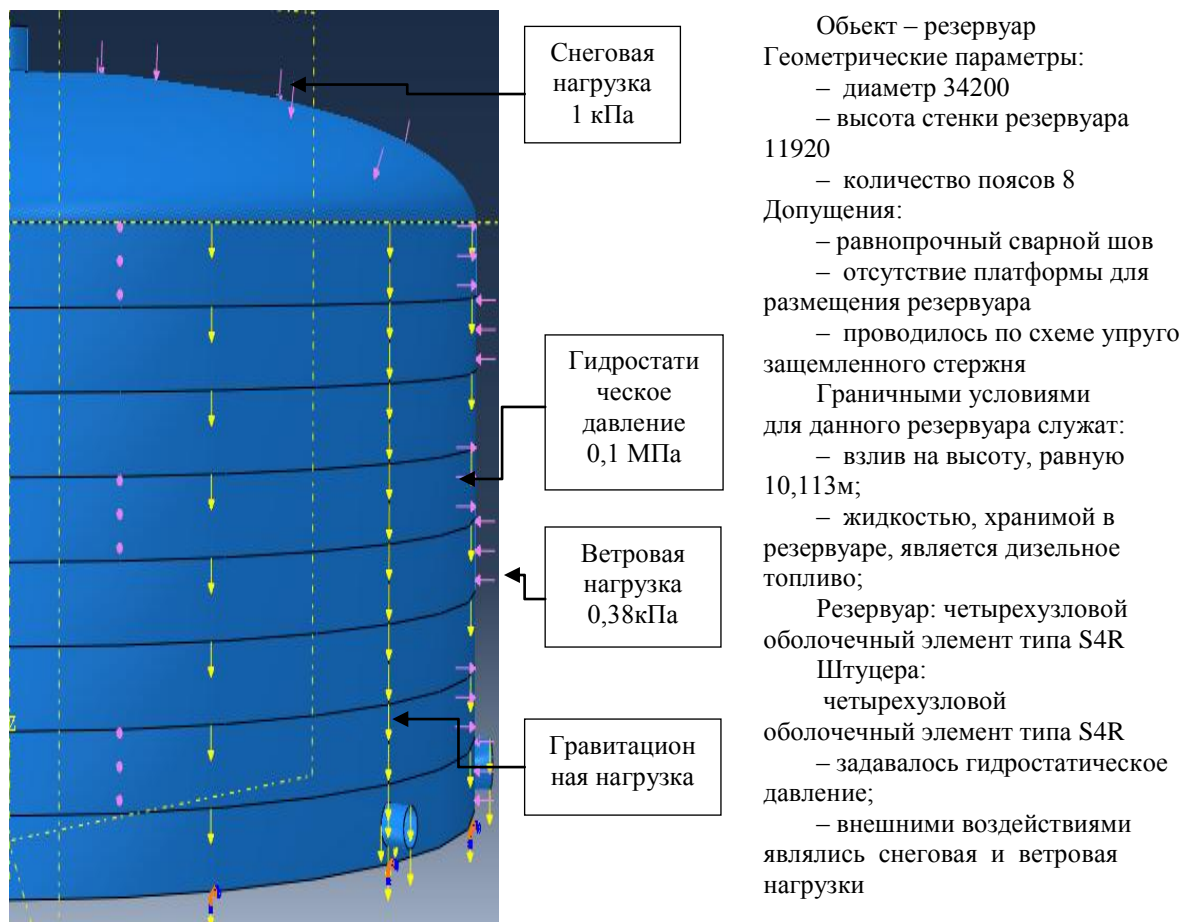


Рисунок 2. Конечно-элементная модель резервуара

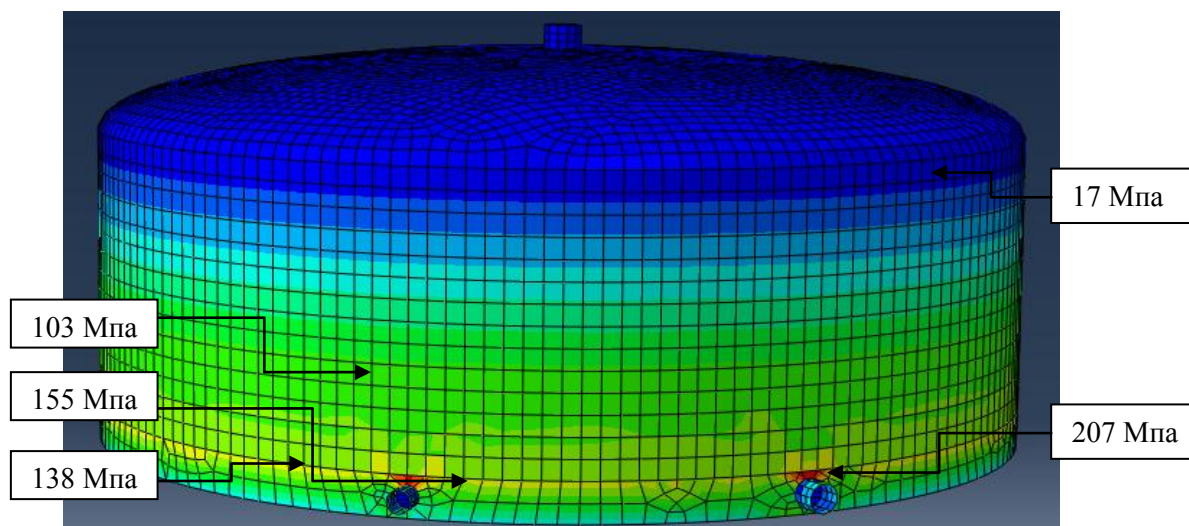
Для моделирования принимался модуль Part ПК ABAQUS. Свойствами, задававшимися в модуле Property, являлись: плотность материала 780 кг/м^3 ; модуль Юнга $2e^{11}$; коэффициент Пуассона — 0,3; предел текучести — 260–370 МПа; пластическая деформация — 0–0,236.

В модуле Mesh проводилась разбивка 3д модели на сетку конечных элементов, после чего программа была запущена на счет.

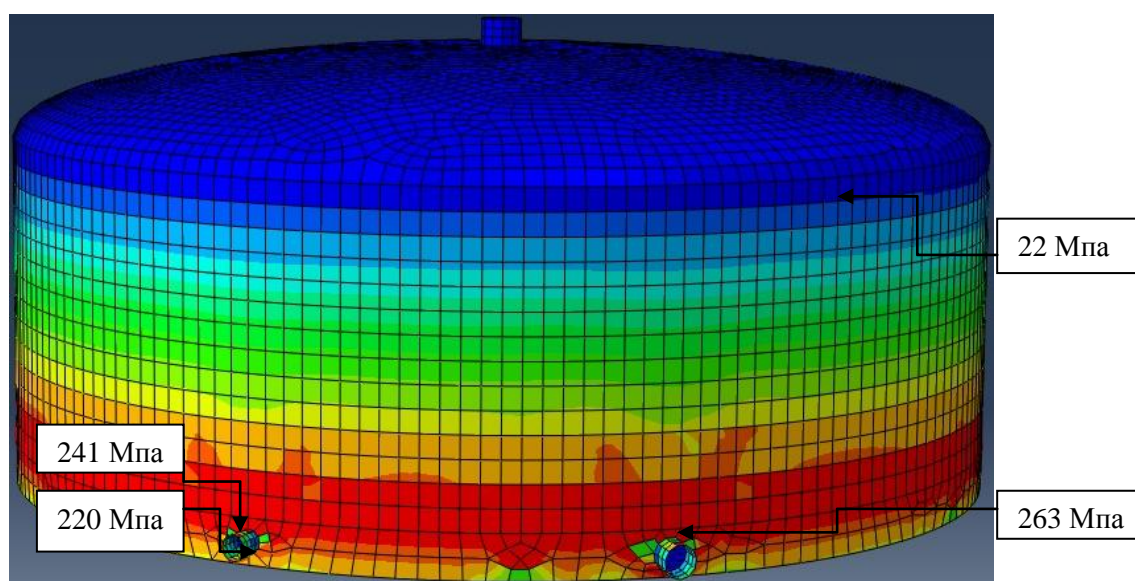
Анализ напряженно-деформированного состояния РВС

В результате проведенных вычислительных экспериментов в ПК Abaqus, получили модели НДС резервуара, которые представлены на рисунке 3.

Анализ НДС показал, что концентратором напряжения является выделенная красным цветом область стенки резервуара в месте врезки приемо-раздаточных патрубков; а также выявлено, что в модели с утонением стенки появляется еще один концентратор напряжения — сварной шов первого и второго поясов, что показано на рисунке 3.



а) без утонения



б) с утонением

Рисунок 3. Области распределения напряжений в обечайке

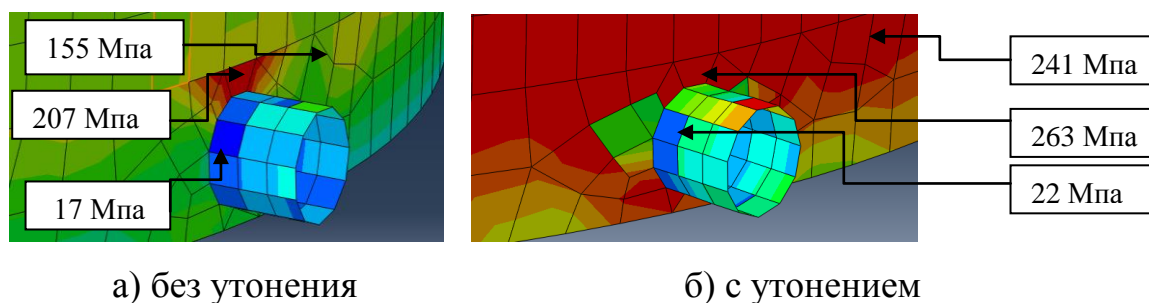


Рисунок 4. Области распределения напряжений на первом и втором поясах

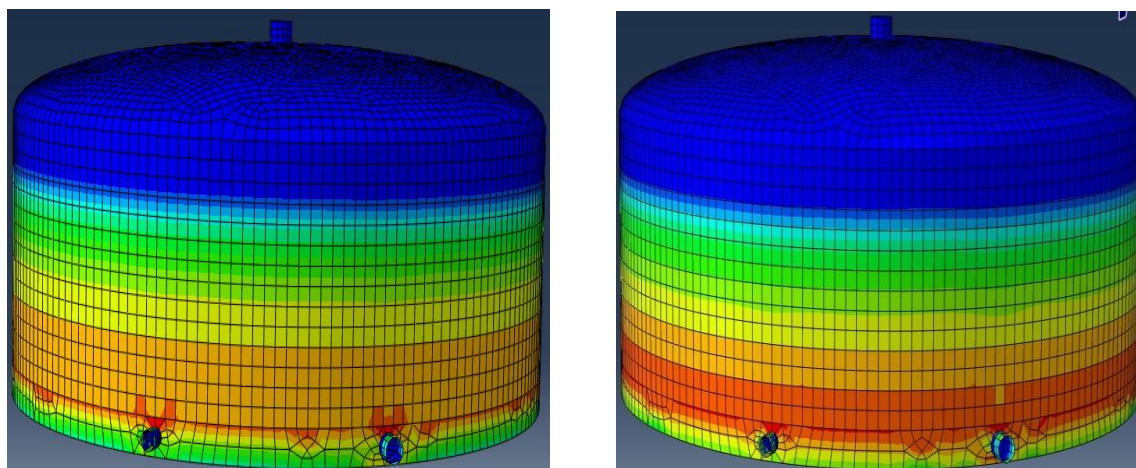
Для анализа долговечности конструкции, а так же для определения наиболее вероятного места зарождения трещин, полученные данные в ПК ABAQUS в качестве граничных условий были интегрированы в модуль Fe-safe.

Алгоритм расчета Fe-safe представляет собой следующую последовательность: полученные в программном комплексе ПК ABAQUS данные интегрируются в модуль Fe-safe, далее следует выбор параметров расчета модуля, а так же их размерности. Затем следует выбор материала, алгоритм вычисления и запуск модуля на расчет [6].

Параметрами расчета модуля было выбрано воздействие внутреннего давления на стенки резервуара и его размерность, а так же размерность других параметров.

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.

В результате численных экспериментов в Fe-safe были получены модели, представленные на рисунке 5.



а) без утонения

б) с утонением

Рисунок 5. Результат численного эксперимента в Fe-safe

В результате численного эксперимента в модуле Fe-safe видно, что концентратором напряжений и местом зарождения трещин является самый нагруженный — первый пояс резервуара, а именно линия врезки приемораздаточных патрубков. На рисунке с утонением стенки красным цветом выделены места зарождения трещин в первую очередь, а ярко оранжевым — вдоль всего сварного шва первого и второго поясов во вторую. На модели, построенной по паспортным данным, такая особенность проявляется меньше, следовательно, со временем эксплуатации характер напряженно – деформированного состояния меняется, что может привести к преждевременному отказу, разгерметизации и повлечь за собой развитие аварии. Так же расчет в модуле Fe-safe показал, что до зарождения трещины в резервуаре с утонением стенки осталось 1097,2 цикла, что соответствует 2,2 года.

Для сравнения результатов, полученных численным экспериментом, был проведен аналитический расчет данного резервуара в соответствии с [3]:

– максимальное напряжение в стенке при максимальной нагрузке:

$$\sigma = 182,8 \text{ МПа};$$

– коэффициент концентрации напряжений в упругопластической зоне:

$$K_{\sigma} = 1,26;$$

– амплитуда напряжений в расчетной точке:

$$\sigma_a = 230 \text{ МПа};$$

– число циклов работы резервуара до образования макротрещины:

$$N_0 = 2921,5;$$

– остаточный срок службы при частоте циклов заполнения 500 раз в год составил:

$$T = 4,1 \text{ года.}$$

В таблице 2 представлены значения эквивалентных напряжений для двух моделей.

Таблица 2. Значения эквивалентных напряжений и предела текучести

Номер пояса	Значение эквивалентных напряжений, МПа		Значение предела текучести σ_T , МПа
	Проектная модель	Модель с учетом утонения стенок	
1	121,3	240,9	250
2	155,9	262,7	250
3	138,6	219	250
4	121,3	197,1	250
5	103,9	153,3	250
6	86,61	109,5	250
7	51,97	65,69	250
8	17,32	21,9	250

В данном случае численный эксперимент не показывает полной картины напряженно – деформированного состояния, а высчитывает ресурс по сути одной конкретно взятой области, например, одного пояса или участка пояса с наименьшей толщиной. Однако, наличие геометрических особенностей (изменение сечения элементов конструкции, наличие люков, место врезки штуцеров, наличие неукрепленных отверстий и т.д.) существенно меняет симметрию конструкции, распределение напряжений и деформаций в локальных зонах, что сложно учесть при проведении аналитических расчетов.

На основании анализа НДС при помощи моделирования методом конечных элементов на примере резервуара вертикального стального было показано, что напряжения в обечайке распределяются неравномерно,

образуя локальные повышенные напряженные зоны, которые при утонении стенки значительно возрастают. 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 области.

Анализ результатов показал (рисунки 3,4), что после утонения стенки на стыке цилиндрической обечайки первого и второго поясов увеличилось количество пиков напряжений. Максимальные эквивалентные напряжения в резервуаре после утонения превышают напряжения в резервуаре до утонения. Картина напряжений в зоне над штуцерами осталась прежней, а их максимальное значение возросло после утонения.

Исходя из полученных результатов, рекомендуется при проведении технического освидетельствования резервуара проводить расчет методом конечных элементов с целью выявления зон с максимальной концентрацией напряжений и выявления дефектов металла.

Выводы

В результате анализа напряженно – деформированного состояния РВС с учетом эксплуатационных нагрузок моделей резервуаров установлено, что напряжение в обечайке при эксплуатации резервуара возрастает.

Анализ НДС при помощи методов конечных элементов показал, что происходит увеличение и перераспределение напряжений обечайки. Вследствие этого возникают зоны концентрации напряжений, располагающиеся непосредственно в зоне сопряжения обечайки и штуцера, а также в области сварного шва первого и второго поясов, которые не учитываются при расчете по стандартным методикам. Зоны концентрации напряжений совпадают с местами возникновения трещин в резервуаре.

Список используемых источников

1 ГОСТ Р 52910–2008. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2008. 56 с.

2 Повышение безопасности РВС, длительно эксплуатируемых в условиях низких температур / Шерстобитова Р.Т. [и др.] Уфа: УГНТУ, 2008. 131 с.

3 РД 153–112–017–97. Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров, Уфа: 1997. 100 с.

4 Рд 08–95–95. Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов, М.: Госгортехнадзор России, 1995. 39 с.

5 Технический паспорт вертикального цилиндрического стального резервуара РВС – 10000 №47.: Уфа: Нефтезаводпроект, 1981. 35 с.

6 Методика определения напряженно – деформированного состояния стального цилиндрического резервуара /Кузеев И.Р. [и др.] // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2013. №4. С. 339–347. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Kuzeev/Kuzeev_8.pdf

References

1 GOST R 52910–2008. Rezervuary vertikal'nye cilindricheskie stal'nye dlja nefti i nefteproduktov. Obshhie tehniczeskie uslovija. M.: Standartinform, 2008. 56 s. [in Russian].

2 Povyshenie bezopasnosti RVS, dlitel'no jekspluatiruemyh v uslovijah nizkih temperatur / Sherstobitova R.T. i dr. Ufa: UGNTU, 2008. 131 s. [in Russian].

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

4 RD 08–95–95. Polozhenie o sisteme tehničeskogo diagnostirovanija svarnyh vertikal'nyh cilindričeskikh rezervuarov dlja nefti i nefteproduktov, M.: Gosgortehnadzor Rossii, 1995. 39 s. [in Russian].

5 Tehničeskij pasport vertikal'nogo cilindričeskogo stal'nogo rezervuara RVS –10000 №47. Ufa: Neftezavodproekt, 1981. 35 s. [in Russian].

6 Metodika opredelenija naprjazhenno – deformirovannogo sostojanija stal'nogo cilindričeskogo rezervuara / Kuzeev I.R. [i dr.]. // Neftegazovoe delo: jelektron. nauch. zhurn. 2013. №4. S. 339–347. http://www.ogbus.ru/authors/Kuzeev/Kuzeev_8.pdf. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

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

R. R. Tlyasheva, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair “Technological Machines and Equipment” FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

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

S. M. Mansurova, Postgraduate Student of the Chair “Technological Machines and Equipment” FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

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

A.V. Ivakin, Master Student of the Chair “Technological Machines and Equipment” FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

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

G. A. Shayzakov, Master Student of the Chair “Technological Machines and Equipment” FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

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

A.S. Bairamgulov, Postgraduate Student of the Chair “Technological Machines and Equipment” FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: mansurova.s.m@yandex.ru