

УДК 622.692.23

ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОЙ ОСАДКЕ ФУНДАМЕНТА

Карпунин Вячеслав Григорьевич,

к.т.н., доцент кафедры конструкций зданий и сооружений,
Уральский государственный
архитектурно-художественный университет
г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 23.
e-mail: sl.karpunin@yandex.ru

Аннотация

Целью статьи является анализ прочности и долговечности стальных резервуаров при неравной осадке фундамента, возникающей в процессе их эксплуатации. Рассмотрен пример расчета напряжений в стенках резервуара РВС-5000 для хранения нефти. Расчетная модель резервуара построена методом конечных элементов в программном комплексе ЛИРА-САПР. Расчеты показывают, что при неравномерном осадке фундамента, возникает локальная концентрация напряжений в нижней части стенок резервуара. Концентрация напряжений может вызвать разрушение резервуара при накоплении малоциклового усталости. На основе расчетной модели дан прогноз срока эксплуатации резервуара.

Ключевые слова: цилиндрический стальной резервуар; осадка фундамента; расчетная модель; метод конечного элемента, концентрация напряжений; малоцикловая усталость.

STRENGTH AND DURABILITY OF VERTICAL CYLINDRICAL STEEL TANKS FOR OIL AND PETROLEUM PRODUCTS WITH UNEVEN FOUNDATION SEDIMENTATION

Vyacheslav G. Karpunin,

Associate Professor of the Department of Construction of Buildings and Structures
Ural State University of Architecture and Art, Yekaterinburg, Karl Liebknecht str., 23.

ABSTRACT

The purpose of the article is to analyze the strength and durability of steel tanks with uneven foundation sedimentation that occurs during their operation. An example of calculating stresses in the walls of the RVS-5000 tank for oil storage is considered. The calculation model of the reservoir is constructed by the finite element method in the LIRA-CAD software package. Calculations show that with uneven foundation sedimentation, a local stress concentration occurs in the lower part of the tank walls. Stress concentration can cause the destruction of the reservoir

with the accumulation of low-cycle fatigue. Based on the calculation model, it is possible to give a forecast of the service life of the tank.

Keywords: cylindrical steel tank; foundation sediment; calculation model; finite element method, stress concentration; low-cycle fatigue.

При эксплуатации стальных резервуаров под действием гидростатических нагрузок при сливе – наливке хранимых нефтепродуктов в стенках резервуаров возникают циклические напряжения. Одновременно происходит коррозионный износ стенок, приводящий к увеличению напряжений. Другим опасным фактором для длительной прочности резервуаров, является неравномерная осадка фундамента, которая появляется в процессе эксплуатации резервуара. Неравномерная осадка вызывает неравномерную по окружности концентрацию напряжений в стенках резервуара. Косвенным признаком неравномерной осадки фундамента является отклонение от вертикали стенок резервуара.

Коррозионный износ стенок и осадка фундамента совместно с давлением от налива нефтепродуктов могут послужить причиной аварийного разрушения резервуара. Разрушение резервуара и разлив нефтепродуктов несет большие экономические потери и вред природе. Так разлив в мае 2020 года дизтоплива из резервуара ОАО «Норникель» принёс ущерб природе, оцениваемый более ста миллиардов рублей.

В целях обеспечения надежности, механической (конструкционной) безопасности и долговечности металлоконструкций вертикальных цилиндрических стальных резервуаров их проектирование, изготовление, монтаж и испытания проводится в соответствии с техническими условиями [1].

Согласно [1], номинальные толщины листов стенки резервуаров определяются в соответствии с расчетом на прочность и устойчивость по действующим нормативным документам с учетом циклических напряжений и прибавок на коррозию стенок в течение нормативного срока эксплуатации резервуара. Нормативный расчетный срок службы резервуаров назначает заказчик или определяется при проектировании и указывается в нормативно-технической документации, паспорте или инструкции по эксплуатации. При отсутствии указаний о величине нормативного расчетного срока он принимается равным 20 годам [1]. Коррозионный износ стенок закладывается в расчетный срок службы резервуаров. После определения номинальной толщины стенок резервуара из расчета на прочность ее значение увеличиваются на припуск на коррозию металла стенки за весь расчетный срок службы резервуара и на минусовой допуск листового проката.

Неравномерную осадку фундамента, возникающую в процессе эксплуатации резервуара, невозможно учесть при его проектировании из-за сложности процесса осадки. При этом повышение напряжений обусловлено не только величиной осадки, а и его распределение по окружности фундамента.

В литературе есть работы по прогнозу осадки грунта с фундаментом резервуара [2-4]. Эти прогнозы имеют статистический характер и не учитываются нормативными документами.

Согласно нормативным документам общий срок службы резервуара должен обеспечиваться проведением регулярного двухуровневого диагностирования с оценкой технического состояния и проведением ремонтов (при необходимости) [1]. Двухуровневое диагностирование резервуаров включает в себя:

- частичное техническое диагностирование (без выведения из эксплуатации) - не реже одного раза в 5 лет.

- полное техническое диагностирование (с выводом из эксплуатации, очисткой и дегазацией) - не реже одного раза в 10 лет [1].

Техническое диагностирование сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов проводится в соответствии с Положением о системе технического диагностирования [5].

В основу оценки технического состояния положены следующие накопленные дефекты резервуаров:

- наличие дефектов в металле и сварных швах;
- изменение геометрических размеров и формы элементов, вызывающие превышение действующих в металле напряжений над расчетными;
- накопление усталостных повреждений в металле;
- нарушение герметичности листовых конструкций в результате коррозионных повреждений.

Для оценки опасных отклонений геометрических размеров и формы от начальных значений в [5] приводятся таблицы предельных отклонений от вертикали образующих стенок резервуара, допускаемые стрелы прогиба выпучин или вмятин на поверхности стенок вдоль образующей и предельные отклонения наружного контура днищ резервуаров.

После проведенных замеров отклонений геометрических размеров и формы проводится поверочный расчет несущих металлоконструкций резервуара на прочность и устойчивость с учетом коррозионного уменьшения толщин листов и реального изменения геометрии формы по результатам проведенных в ходе обследований измерений.

Следует отметить, что в пределах расчетного срока коррозионный износ является предсказуемым, он учитывается при проектировании резервуара и не является причиной для исключения резервуара из эксплуатации.

Наиболее опасным для нарушения прочности и устойчивости резервуара является неравномерная осадка фундамента в процессе эксплуатации резервуара. Величина дополнительных напряжений, появляющихся в корпусе резервуара от неравномерной осадки фундамента, зависит не только от величины предельного отклонения контура днища, но и от формы изменения отклонений по окружности днища резервуара. Именно эти дополнительные напряжения в сочетании с напряжениями от налива могут быть причиной разрушения резервуара.

В литературе имеются расчеты влияния неравномерной осадки фундамента на напряженно-деформированное состояние резервуара [6-7]. Эти расчеты могут быть приближенными [7] или с использованием конечно-элементных моделей [6]. Однако во всех случаях используется какая-либо модель осадки фундамента резервуара.

В настоящей статье разработана методика расчета дополнительных напряжений, возникающих в стенках резервуара от неравномерной осадки его фундамента, с заданием величин осадки в фиксированных узлах по окружности фундамента. Данная методика позволяет определить напряжения в стенках резервуара по реальным замерам осадки его фундамента в процессе эксплуатации.

Компьютерная модель резервуара для хранения нефтепродуктов строится методом конечного элемента в программном комплексе ЛИРА-САПР. Для моделирования вертикальных стенок и днища резервуара применяются пластинчатые 3-х и 4-х узловые конечные элементы. В нижней части резервуара в зоне сопряжения корпуса и днища введено местное сгущение конечных элементов. Толщина стенок задается на основе натурных замеров с учетом коррозионного износа.

Для задания осадки фундамента в узлах конечных элементов используются сплайны, построенные на численных значениях замеренного осадка по окружности основания.

На основе построенной методики проведен расчет остаточной прочности резервуара РВС-5000 для хранения нефти, смонтированный и эксплуатируемый на нефтяных месторождениях ПАО «Татнефть». Дата ввода резервуара в эксплуатацию: 1986 г. Дата полного технического диагностирования – 2018 г. (срок эксплуатации более 20 лет).

На рисунке 1 показан эскиз резервуара и проектные толщины боковых стенок резервуара. Толщина стенки кровли составляет 4 мм, а толщина листа днища, (окрайка днища) – 8 (10) мм. Все листовые конструкции изготовлены из стали СтЗсп5.

Вследствие коррозионного износа толщины стенок резервуара уменьшилась. Фактические значения замеренных толщин стенок резервуара показана в таблице 1.

В процессе эксплуатации произошла неравномерная осадка фундамента. По этой причине боковые стенки резервуара отклонились от вертикали. На рисунке 2 показан эскиз с геодезическими измерениями осадков фундамента и отклонений образующих резервуара от вертикали.

Таблица 1.

Фактические толщины стенок резервуара

Расстояние от днища расчетного сечения, м	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	11,5	13,0	14,5	15,0
Фактическая минимальная толщина листов пояса, мм	9,0	9,1	7,9	6,9	6,0	5,8	5,7	6,0	5,9	5,6

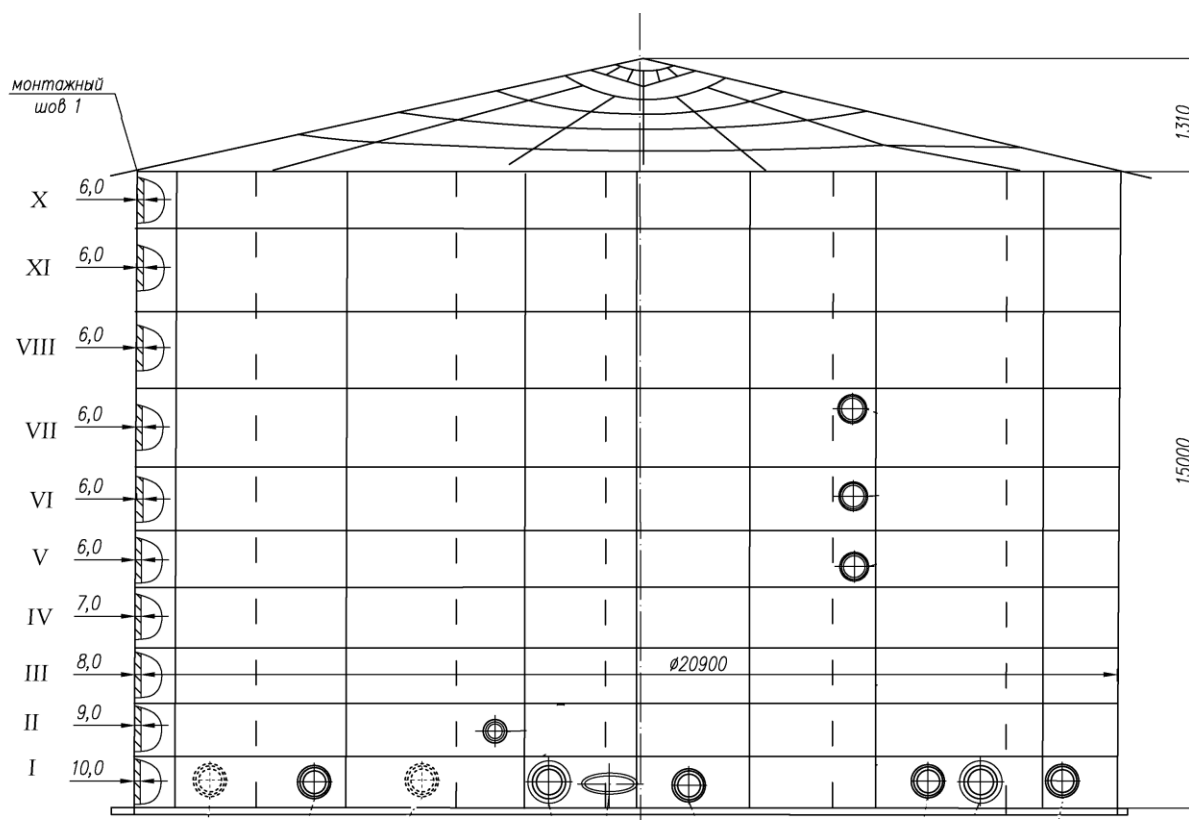


Рисунок 1. Эскиз резервуара РВС-5000

Расчетными нагрузками являются: собственный вес металлоконструкций резервуара, гидростатическая нагрузка от налива жидкости и неравномерная осадка фундамента.

Коэффициент рабочих условий $\gamma_c = 1,05$. Коэффициент надежности $\gamma_n = 1$.

Основной конструкционный материал сталь Ст3сп5. Расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию и изгибу $R_y = 235 \text{ Н/мм}^2$ [1]. Допускаемое напряжение вычисляется по формуле

$$[\sigma] = R_y \cdot \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = 235 \cdot \frac{1,05}{1} = 247 \text{ Н/мм}^2$$

Коэффициент постели принят равным 50000 кН/м^3 , что соответствует плотно слежавшемуся песку.

Конечно-элементная компьютерная модель состоит из 5880-ти конечных 3-х и 4-х узловых конечных элементов, соединенных в 5401-х узлах. Матрица жесткости имеет размерность 28080. Компьютерная модель резервуара показана на рисунке 2.

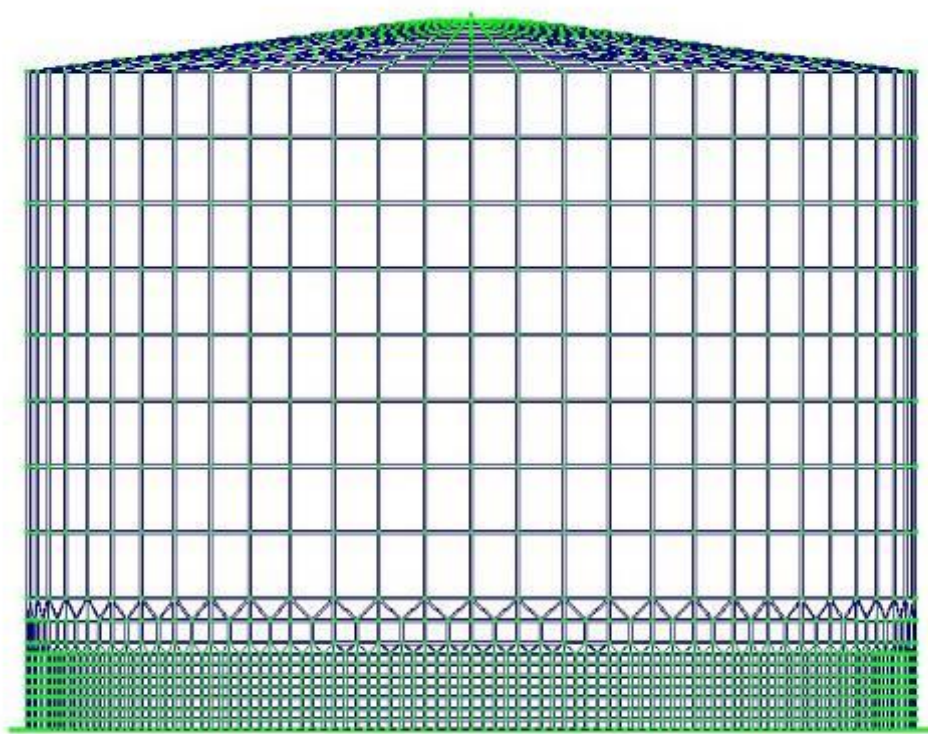


Рисунок 2. Компьютерная конечно-элементная модель резервуара

На рисунке 3 показаны результаты расчета на прочность резервуара под действием собственного веса металлоконструкций и гидравлического давления жидкости без учета неравномерного осадка фундамента. Для расчета приняты толщины стенок после коррозионного износа (табл.1). Из рисунка 3 видно, что напряженно-деформированное состояние резервуара является осесимметричным. Максимальная величина напряжений соответствует темно красному цвету. Максимальные эквивалентные напряжения

возникают в нижней части резервуара и составляют:

$$\sigma_e = 110,4 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} = 110,4 \text{ МПа}.$$

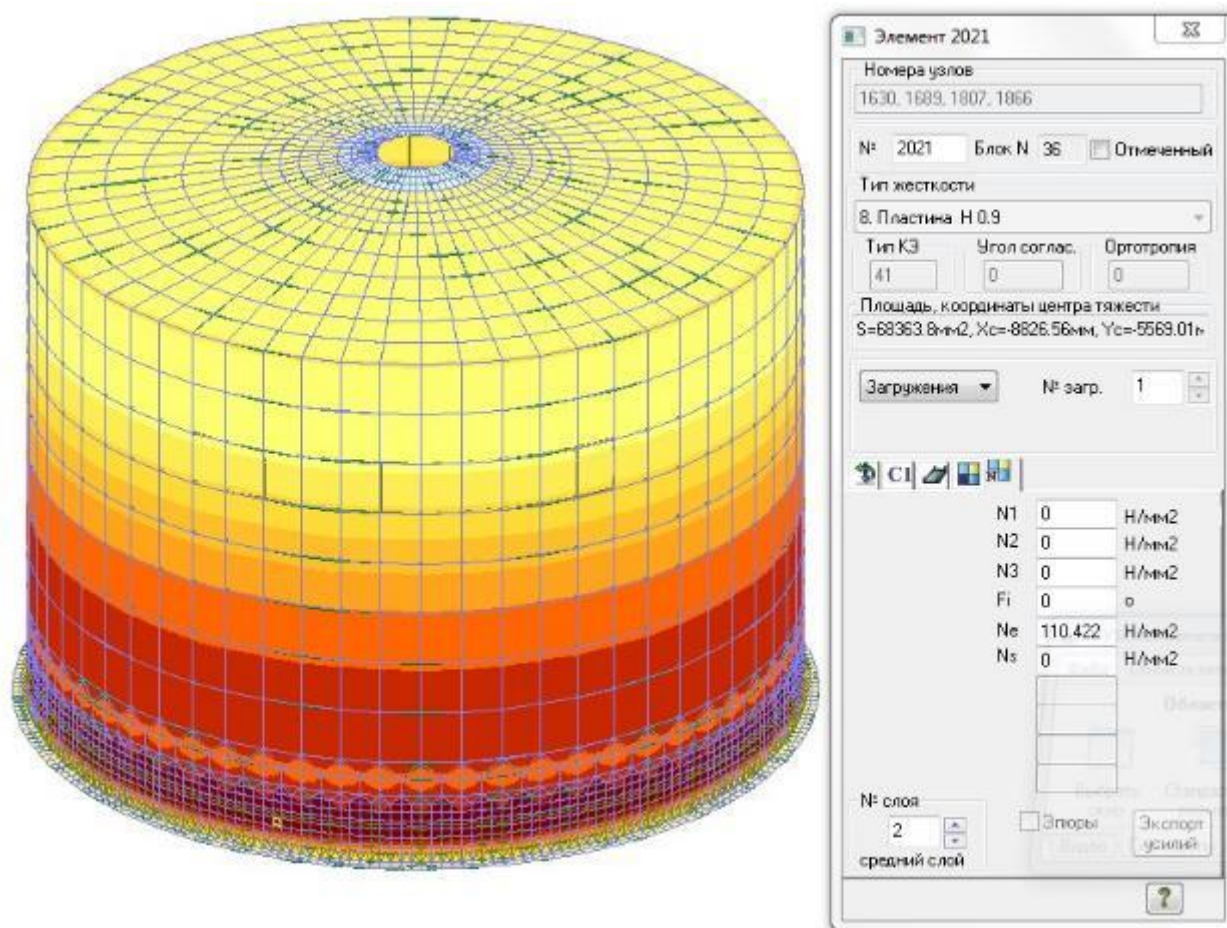


Рисунок 3. Резервуар под наливом без осадки фундамента.

Условие прочности по напряжениям выполняется

$$\sigma_e = 110,4 \text{ МПа} \leq [\sigma] = 247 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} = 247 \text{ МПа}.$$

На рисунке 4 показаны результаты геодезических измерений резервуара.

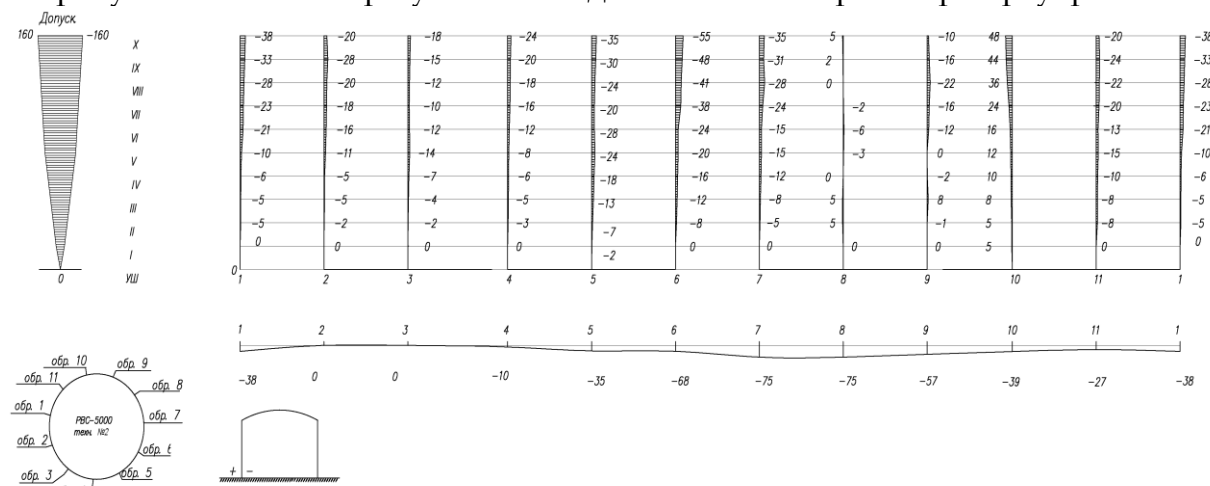


Рисунок 4. Геодезические измерения резервуара РВС-5000

Точки измерения отклонений от вертикали и осадки фундамента отстоят друг от друга на расстоянии 6 м. Так как размеры конечного элемента в стыке составляют 0,3 м для задания осадки в узлах используется сплайновая аппроксимация функции осадки в узлах.

Из рисунка 4 видно, что максимальные отклонения от вертикали составляют -55 мм и не превосходят допусковых, равных 160 мм. Вместе с тем максимальные неравномерные осадки фундамента составляют 75 мм и превышают допусковую величину 50 мм.

При неравномерной осадке фундамента появляются неосесимметричные локальные деформации и напряжения. На рис. 5 и 6 показаны результаты расчета резервуара для фрагмента резервуара с учетом осадки фундамента под действием собственного веса металлоконструкций без учета гидравлической нагрузки.

Как результат неравномерной осадки фундамента стенки резервуара получают отклонения от вертикали. На рисунке 5 показаны перемещения по оси ОХ узлов фрагмента резервуара от 1 до 9 м по высоте. Из этого рисунка видно, что боковые перемещения неравномерны по окружности. На боковой поверхности резервуара образуется выпучина. Узлы выпучины окрашены в розовый цвет. Максимальные отклонение узлов выпучины составляют 194 мм и превышают предельные отклонения от вертикали, составляющие 90 мм (табл.1).

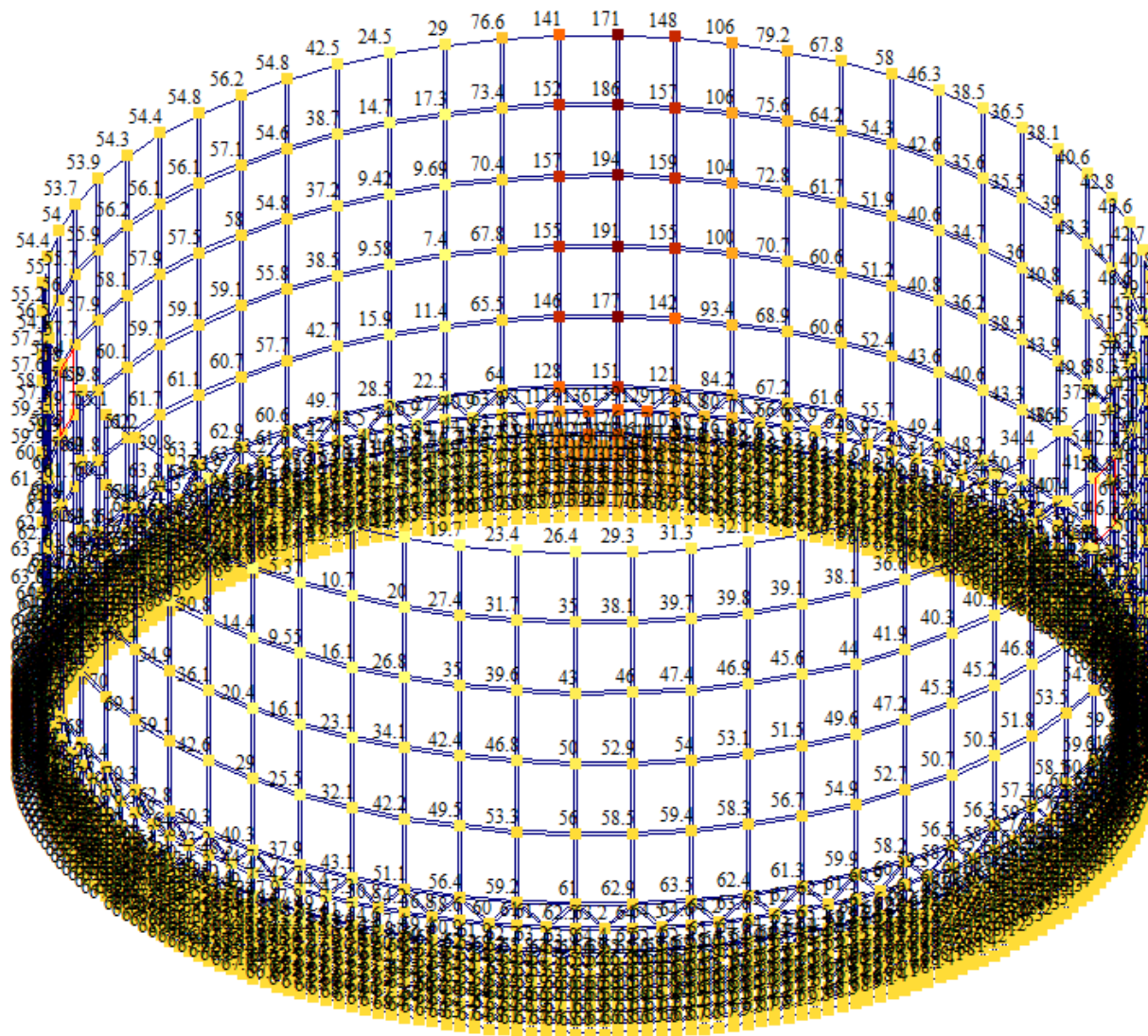


Рисунок 5. Неравномерные боковые перемещения при осадке фундамента

На рисунке 6 показаны результаты расчета эквивалентных напряжений в стенках резервуара по энергетической теории Мизеса. Из него видно, что напряжения распределены несимметрично по окружности резервуара. В окрестности выпучины возникает локальная концентрация напряжений (рис.6).

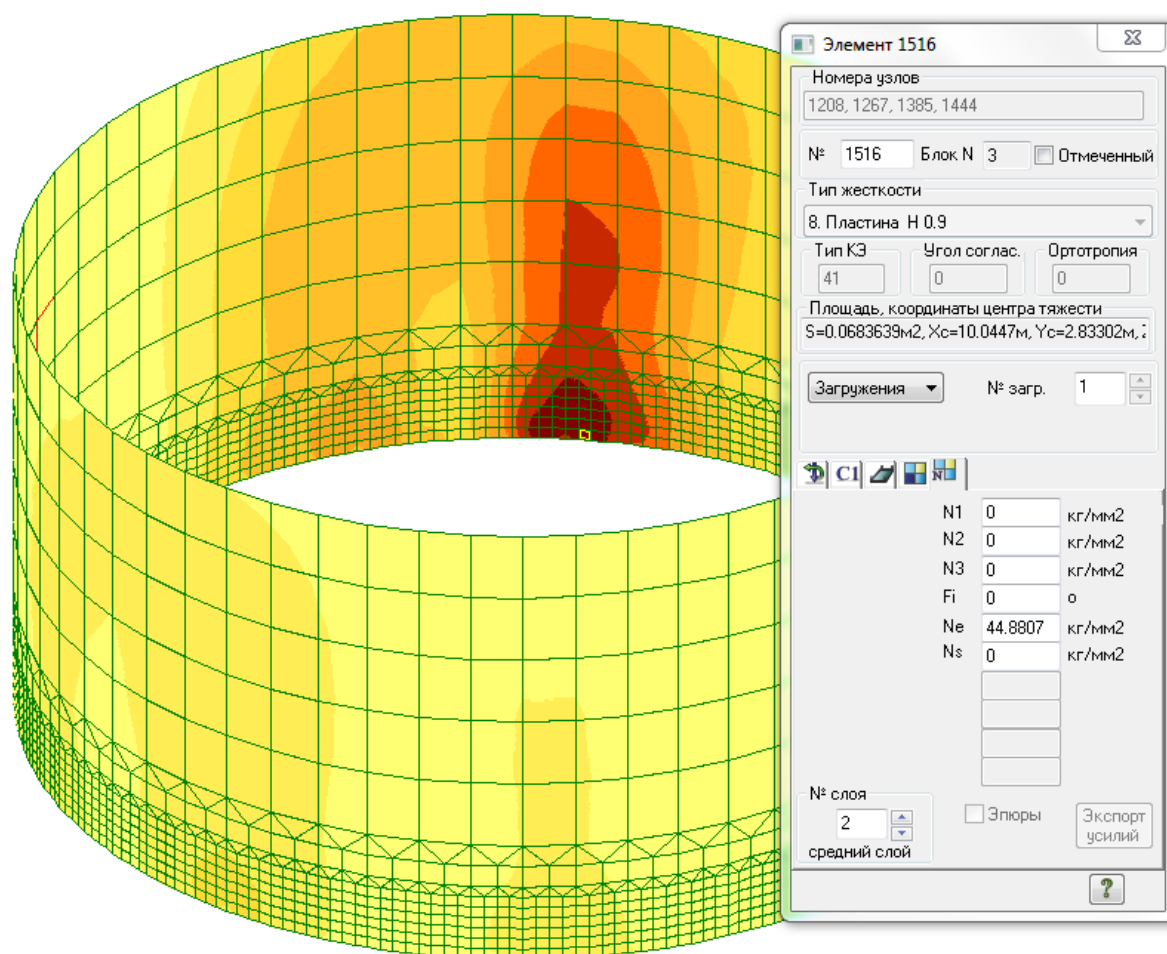


Рисунок 6. Эквивалентные напряжения в резервуаре при осадке фундамента

Максимальные величины эквивалентных напряжений при просадке фундамента составляют $44,9 \text{ кг/мм}^2$ (рис.6), что на 82% превышает допустимые напряжения. Условие прочности нарушается.

$$\sigma_e = 44,9 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 449 \text{ МПа} \geq [\sigma] = 247 \text{ МПа}.$$

Напряжения от гидростатического давления жидкости складываются с напряжениями от неравномерной осадки фундамента и приводит к появлению пластических деформаций.

Осадка фундаментов проходит постепенно в течение долгого времени. Осадка создает вынужденные дополнительные деформации и напряжения в стенках резервуара. В течение времени в металле проходит релаксация напряжений, вызванных неравномерной осадкой фундамента. При релаксации уровень напряжений уменьшается с одновременной заменой упругих деформаций на вязко пластические.

Превышение напряжений предела текучести и релаксация напряжений при осадке фундамента вызывает появление в металле резервуара вязко пластических деформаций. При циклическом (слив-налив) нагружении резервуара гидростатической нагрузкой возможно разрушение вследствие малоциклового усталости металла.

Согласно СП 16.13330.2017, стальные конструкции и их элементы, непосредственно воспринимающие нагрузки с количеством циклов нагружений менее 10^5 , следует проверять расчетом на малоцикловую усталость.

Указанные выше СП не приводят методики расчета на малоцикловую усталость. Поэтому расчеты проводятся в соответствии с [8].

На рисунке 7 показан график изменения напряжений в резервуаре при сливе-наливе жидкости. При этом величина напряжений возрастает от $(\sigma)_{\min}$ до $(\sigma)_{\max}$ и после некоторого промежутка времени убывает от $(\sigma)_{\max}$ до $(\sigma)_{\min}$.

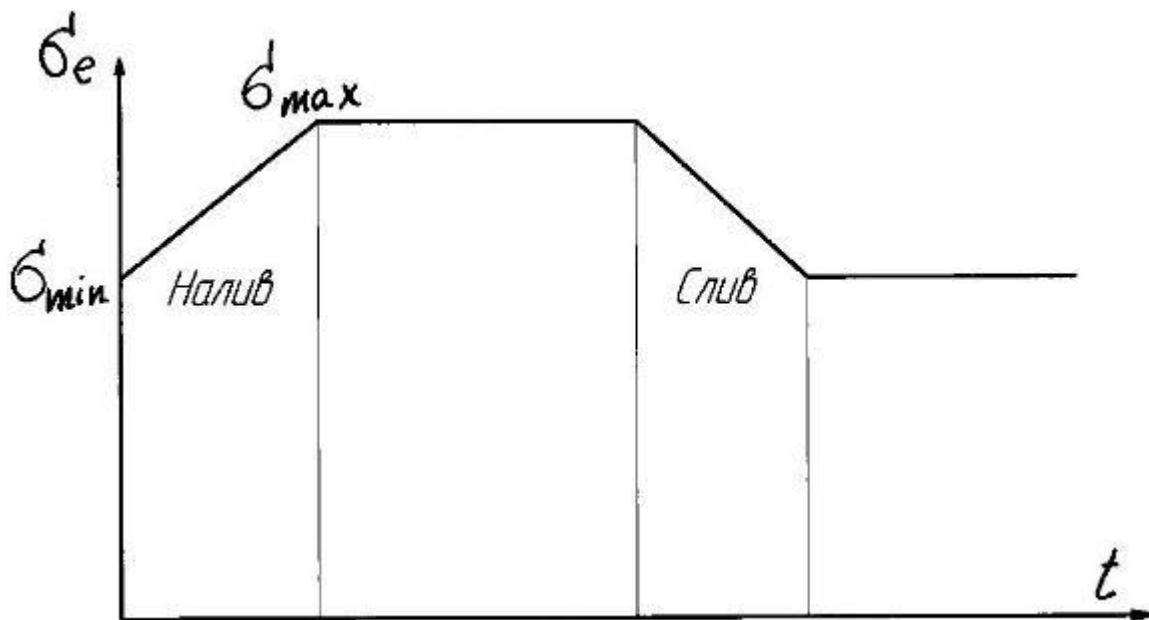


Рисунок 7. График циклического изменения напряжений

Максимальное $(\sigma)_{\max}$ и минимальное $(\sigma)_{\min}$ приведенные напряжения, вычисленные ранее, равны

$$(\sigma)_{\max} = 449 + 110,4 = 559,4 \frac{H}{\text{мм}^2}; \quad (\sigma)_{\min} = 449 \frac{H}{\text{мм}^2}.$$

Наибольшая амплитуда цикла напряжений равна:

$$(\sigma_a) = 0,5 \cdot [(\sigma)_{\max} - (\sigma)_{\min}] = 0,5 \cdot [559,4 - 449] = 55,2 \frac{H}{\text{мм}^2}.$$

Амплитуда приведенного местного условного упругого напряжения (σ_{aF}) вычисляется по формуле [8]:

$$(\sigma_{aF}) = K_F \cdot (\sigma_a), \quad (1)$$

где K_F - коэффициент концентрации напряжений определяют по формуле:

$$K_F = R_{p0,2}^T \left(1 + 0,5 \cdot \left\{ \left[\frac{K_\sigma(\sigma_a)}{R_{p0,2}^T} \right]^2 - 1 \right\} \right) / (\sigma_a). \quad (2)$$

$$R_{p0,2}^T = 235 \frac{H}{\text{мм}^2} - \text{предел текучести металла при расчетной температуре.}$$

Подстановка значений конкретных величин в формулы (1) и (2) даёт:

$$K_F = 235 \cdot \left(1 + 0,5 \cdot \left\{ \left[\frac{4,56 \cdot 55,2}{235} \right]^2 - 1 \right\} \right) / 55,2 = 4,57$$

$$(\sigma_{aF}) = 4,57 \cdot 55,2 = 252 \frac{H}{\text{мм}^2}. \quad (3)$$

Циклическую прочность проверяют по кривым усталости [8] (рис. 8). Для вычисленного значения амплитуды циклических напряжений, количество циклов накопления повреждений до разрушения $[N_0] = 930$.

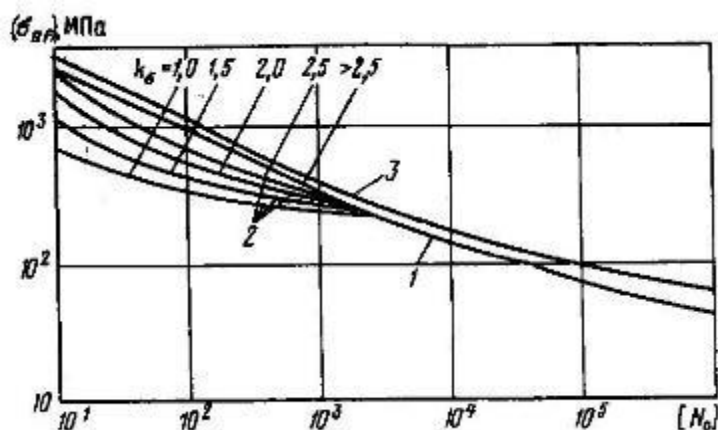


Рисунок 8. График малоциклового усталости

Проведенные расчеты показали, что напряжения от гидростатического давления и собственного веса резервуара с учетом утонения стенок составляют менее 50% от величины допускаемых напряжений.

Неравномерная осадка фундамента резервуара вызывает напряжения, превышающие на 82% величину допустимых и локализованы на небольшом участке в нижней части резервуара.

Проведенные расчеты подтвердили возможность эксплуатации резервуаров. При замеренных значениях осадки фундамента резервуара число допустимых циклов налив-слив составляют 930.

Список литературы:

1. ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. М.- Стандартинформ, 2016.
2. Потапов А.Ю. Прогноз осадка резервуара большого диаметра на основе фильтрационной консолидации слабых водонасыщенных грунтов. / Кушнир С.Я., Горелов А.С., Лебедев В.Д., Дегтярев П.А. // Мегапаскаль: Сб. научн. трудов - Тюмень, 2006. - №1. - с.49-50.

3. Тарасенко А.А., Саяпин М.В. Результаты статистической обработки измерений неравномерных осадок наружного контура днища вертикальных стальных резервуаров // Известия вузов «Нефть и газ». – 1999.-№1.-с.52-56.
4. Буренин В.А. Исследование влияния неравномерных осадок на напряженно-деформированное состояние стального вертикального цилиндрического резервуара: дисс. канд. техн. наук: 05.15.13 /Уфа. 1981. 157 с.
5. РД 08-95-95. «Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов». Утверждено постановлением Госгортехнадзора России от 25.07.95, №3.
6. Чепур П.В. Исследование влияния величины выступа окрайки на напряженно-деформированное состояние вертикального стального цилиндрического резервуара при развитии неравномерной осадки наружного контура днища // Фундаментальные исследования. 2013. №10-15. с.3441-3445.
7. Потапов А.Ю. Влияние деформационных характеристик грунтов основания на работу стенки и днища резервуара.: автореф. дисс. канд. техн. Наук: 25.00.19: Тюмень. 2006. 24 с.
8. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР.-М.: Энергоатомиздат, 1989.-525 с.

References:

1. GOST 31385-2016. Vertical cylindrical steel tanks for oil and petroleum products. General technical conditions. M.- Standartinform, 2016.
2. Potapov A.Y. Forecast of large-diameter reservoir sediment based on filtration consolidation of weak water-saturated soils. / Kushnir S.Ya., Gorelov A.S., Lebedev V.D., Degtyarev P.A. // Megapascal: Collection of scientific works - Tyumen, 2006. - No. 1. - pp.49-50.
3. Tarasenko A.A., Sayapin M.V. Results of statistical processing of measurements of uneven sediments of the outer contour of the bottom of vertical steel reservoirs // Izvestiya vuzov "Oil and gas". – 1999.-No.1.-pp.52-56.
4. Burenin V.A. Investigation of the influence of uneven sediments on the stress-strain state of a steel vertical cylindrical tank: dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.15.13 /Ufa. 1981. 157 p. 5. RD 08-95-95. "Regulations on the system of technical diagnostics of welded vertical cylindrical tanks for oil and petroleum products".
5. RD 08-95-95. "Regulations on the system of technical diagnostics of welded vertical cylindrical tanks for oil and petroleum products". Approved by the resolution of Gosgortekhnadzor of Russia dated 07/25/95, No. 3.
6. Chepur P.V. Investigation of the influence of the size of the protrusion of the staining on the stress-strain state of a vertical steel cylindrical tank with the development of uneven precipitation of the non-arc contour of the bottom // Fundamental Research. 2013. No.10-15. pp.3441-3445.

7. Potapov A.Yu. Influence of deformation characteristics of the base soils on the work of the wall and bottom of the tank.: abstract. Diss. Candidate of Technical Sciences. Sciences: 25.00.19: Tyumen. 2006. 24 p.
8. Calculation standards for the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants (PNAE G-7-002-86) / Gosatomenergondzor of the USSR.-M.: Energoatomizdat, 1989.-525 p.