

Асламов Александр Анатольевич,
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: aaa_mx@angtu.ru
Рыхвалов Денис Сергеевич,
магистрант, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: denangarsk@yandex.ru

АНАЛИТИЧЕСКИЙ И ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА

Aslamov A.A., Rykhvalov D.S.

ANALYTICAL AND NUMERICAL CALCULATION OF THE STRESSED-DEFORMED STATE OF THE WALL OF A RESERVOIR

Аннотация. При численном моделировании в Autodesk Inventor Professional 2018 напряженно-деформированного состояния стенки нефтяного резервуара найдены зоны с наибольшей концентрацией напряжений. Результаты численного моделирования сопоставлены с аналитическим расчётом, расхождение между ними не превысило 2,21%.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, нефтяной резервуар, метод конечных элементов.

Abstract. In the numerical simulation in Autodesk Inventor Professional 2018 of the stress-strain state of the oil reservoir wall, the zones with the highest stress concentration were found. The results of numerical simulation are compared with analytical calculations, the discrepancy between them did not exceed 2.21%.

Keywords: stress-strain state, oil reservoir, finite element method.

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.

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.

Аналитический расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) стенки резервуара представляет собой решение частной задачи общей теории

цилиндрических оболочек. Для случая осесимметричного нагружения и одинаковой по всей протяженности толщины стенки может быть получено достаточное простое аналитическое решение, позволяющее определить все характеристики НДС стенки резервуара. Одно из таких решений было получено Тимошенко С.П.

Однако при сооружении резервуаров для экономии металла используется листовая металл с различной толщиной листов. В результате по высоте резервуара толщина стенки меняется ступенчато и аналитическое решение, исходя из теории цилиндрических оболочек, является достаточно сложным и громоздким. Поэтому для случая осесимметричного нагружения резервуара наибольшее распространение получило представление стенки резервуара в виде ступенчатой балки на упругом основании.

Рассчитаем аналитически значения радиальных перемещений по высоте стенки идеального резервуара (в его строгом проектном положении) объемом 20000 м^3 согласно представленной выше методике и численно методом конечных элементов. Для расчета в Autodesk Inventor Professional 2018 в качестве конечного элемента (КЭ) выбран КЭ SHELL181 (рисунок 1), при соответствующих настройках идентичный выбранному ранее КЭ.

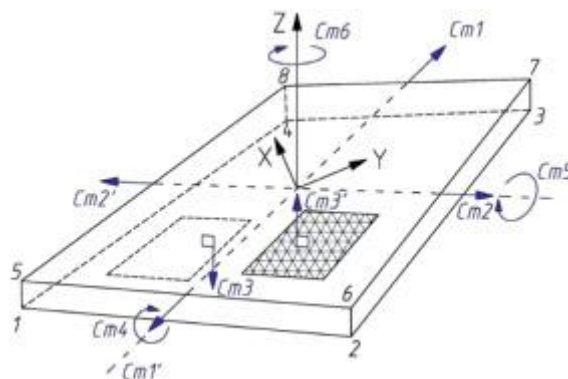


Рисунок 1 – Конечный элемент SHELL181: Ст1-Ст6 – обозначение степеней свободы; 1–8 – узловые точки

Элемент SHELL181 имеет свойства линейной упругости, упругопластичности материала. Из упругих материалов могут применяться изотропные, анизотропные и линейные ортотропные. Пластическое поведение предполагает упругие изотропные свойства материала (то есть если ортотропный материал подвергается пластическому деформированию, комплекс Autodesk Inventor Professional 2018 будет использовать изотропный материал с модулем Юнга E и коэффициент Пуассона μ). Элемент SHELL181 учитывает влияние поперечных сдвиговых деформаций. На рисунке 1 изображен конечный элемент SHELL181, обозначено 8 узловых точек и 6 степеней свобод элемента в орто-

гональной системе координат XYZ. Плотность генерируемой сетки влияет на погрешность в вычислениях, поэтому определение оптимальных параметров сетки во многом определяет точность расчетов. В узле сопряжения стенки и дна автором предлагается сгущать конечно-элементную сетку до 0,1 м (сторона квадрата элемента SHELL181).

Расчетная схема (рисунок 2) резервуара строилась в соответствии со значениями, принятыми в типовом проекте для РВС-20000 (ТП 704-1-60). Радиус резервуара составляет 22,85 м, высота стенки 11,92 м. Толщина стенки для первого пояса – 13 мм, для 2–8 поясов – 11 мм. Листы стенки выравниваются по внутреннему краю. Для задания гидростатической нагрузки выбраны следующие параметры: высота разлива нефти $h_{\text{вз}} = 10,88$ м, плотность хранимой нефти $\rho = 875 \text{ кг/м}^3$, значение гравитационной постоянной принимается $9,81 \text{ м/с}^2$. Значение ветрового давления принимается в соответствии с СП 20.13330.2011 для I ветрового района $q_{\text{вemp}} = 230 \text{ Па}$. В предложенной расчетной схеме не моделируется конструкция кольца жесткости и кровли, но для большей достоверности результатов их вес необходимо учитывать. Равномерно распределенная нагрузка от веса кровли, снега, оборудования кровли, кольца жесткости составляет $q = 1200 \text{ кН}$. Данная сила приложена по нормали к верхнему ребру стенки РВС. Отметим, что все нагрузки, указанные в расчетной схеме, прикладываются одновременно.

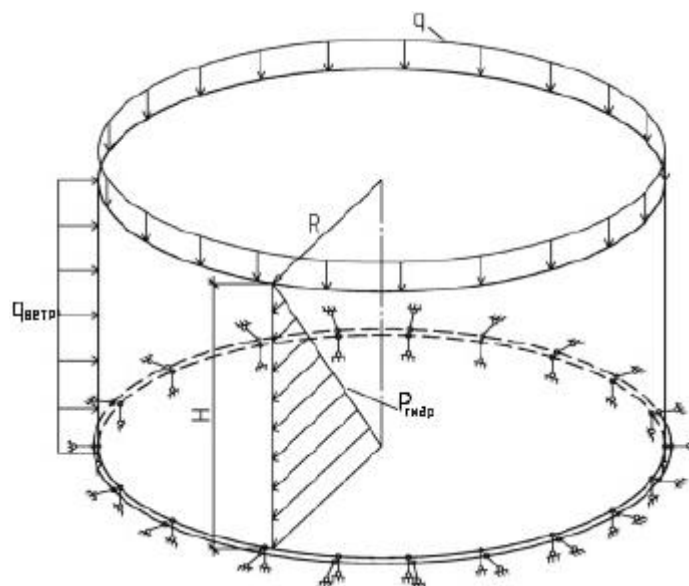


Рисунок 2 – Расчетная схема резервуара: $P_{\text{гидр}}$ – гидростатическое давление на стенку и днище резервуара; $q_{\text{вemp}}$ – ветровая нагрузка; q – нагрузка от веса металлоконструкций кровли, снега; R – радиус резервуара; H – высота резервуара.

Материал металлоконструкций – сталь конструкционная низколегированная 09Г2С с пределом текучести $\sigma = 300$ МПа.

Анализ НДС показал, что концентратором напряжения является 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.

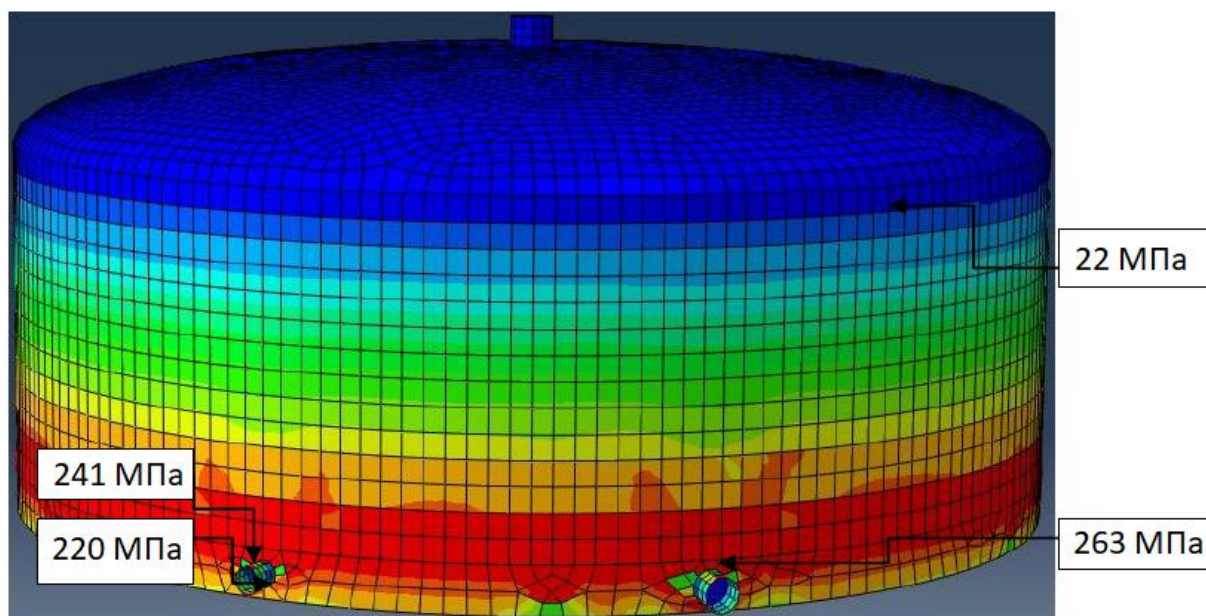


Рисунок 3 – Области распределения напряжений в обечайке

В результате численного эксперимента видно, что концентратором напряжений и местом зарождения трещин является самый нагруженный — первый пояс резервуара, а именно линия врезки приемо-раздаточных патрубков. На рисунке 3 выделены места зарождения трещин в первую очередь, а также — вдоль всего сварного шва первого и второго поясов во вторую. На модели, построенной по типовому проекту, 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.

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

– максимальное напряжение в стенке при максимальной нагрузке: $\sigma = 182,8$ МПа;

– коэффициент концентрации напряжений в упругопластической зоне $K_{\sigma}=1,26$;

– амплитуда напряжений в расчетной точке: $\sigma_a = 230$ МПа.

На рисунке 4 изображены графики зависимостей радиального перемещения стенки «идеального» резервуара по ее высоте, полученные при аналитическом и численном (реализованном в программном комплексе Autodesk Inventor Professional 2018) решениях.

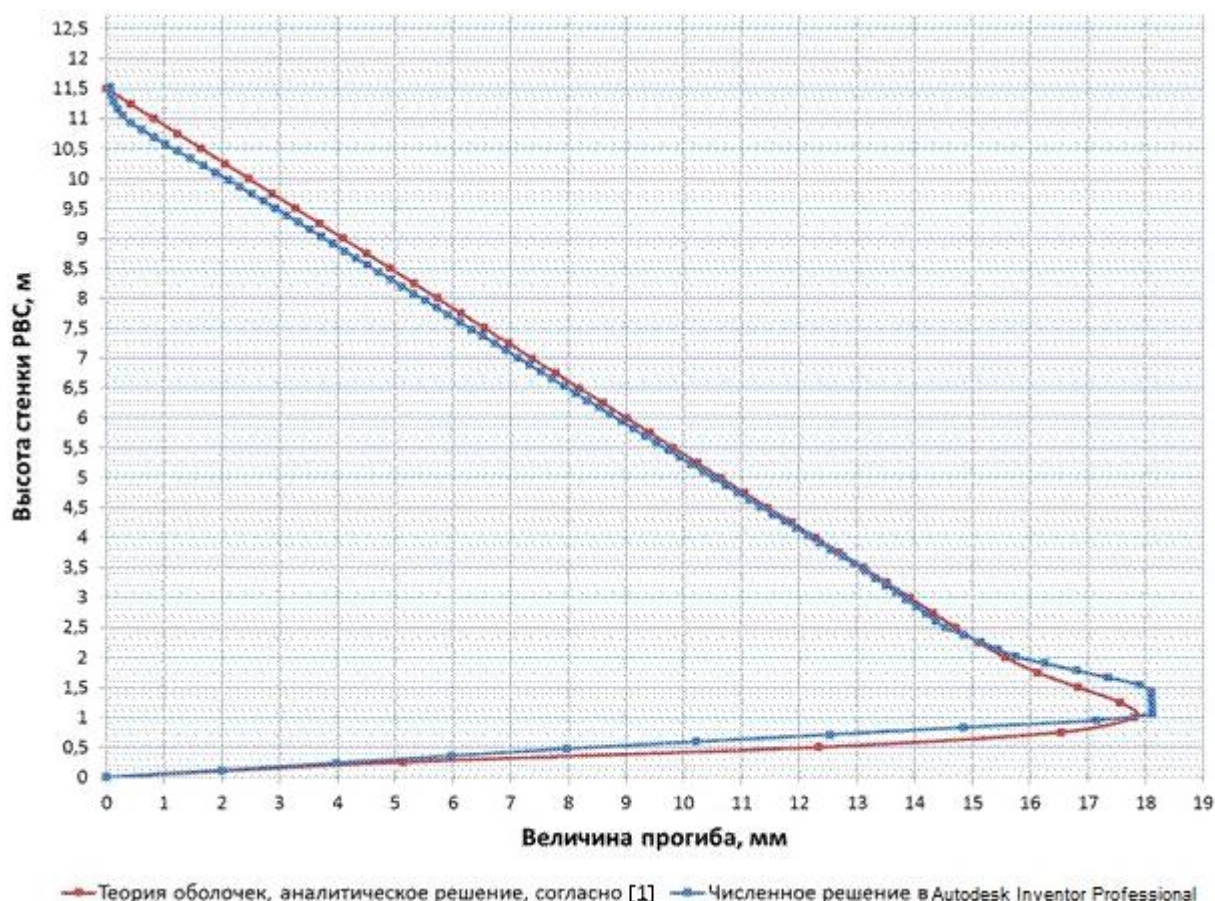


Рисунок 4 – Перемещения стенки в радиальном направлении

Максимальная разница результатов аналитического и численного моделирования радиальных перемещений стенки идеального резервуара составила 2,21%. Высокая степень воспроизводимости результатов моделирования позволяет рекомендовать к использованию программный комплекс Autodesk Inventor Professional 2018.

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

Анализ НДС при помощи метода конечных элементов показал, что происходит увеличение и перераспределение напряжений обечайки. Вследствие этого возникают зоны концентрации напряжений, располагающиеся непосред-

ственно 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.

Проведено сравнение результатов расчета НДС стенки «идеального» резервуара объемом 20000 м³ аналитическим способом и методом конечных элементов по разработанной методике. Установлено, что максимальная разница перемещений стенки в радиальном направлении составляет 2,21%. Данные результаты подтверждают правильность разработанной методики, так как отличие от аналитического решения не превышает 5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 31385-2016 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. М., Стандартинформ, 2010. – 56 с.
2. СА-03-008-08 Резервуары вертикальные стальные сварные для нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование и анализ безопасности. М., Ростехэкспертиза, НПК «Изотермик», 2009. – 288 с.
3. Сафарян М.К., Иванцов О.М. Проектирование и сооружение стальных резервуаров. М., Гостопттехиздат, 1961. – 328 с.
4. Сафарян М.К., Шутов В.Е. Расчет стальных вертикальных цилиндрических резервуаров большой емкости на действие ветровой нагрузки. // Экспресс-информация ВНИИГазпрома, 1968, №1. – С. 15-22
5. Сафарян М.К. Металлические резервуары и газгольдеры. М., Недра, 1987. – 200 с.