

УДК 621.642.39.03-025.71-034.14-047.74

МОДЕЛЬ РЕЗЕРВУАРА В СРЕДЕ ANSYS WORKBENCH 14.5**¹Тарасенко А.А., ¹Чепур П.В., ²Чирков С.В., ¹Тарасенко Д.А.**¹ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет»,
Тюмень, e-mail: a.a.tarasenko@gmail.com, chepur@me.com, zuleen@mail.ru;²ОАО «Гипротрубопровод», Москва, e-mail: chirkov0210@mail.ru

Существующие аналитические решения не позволяют в полной мере реализовать поставленные авторами задачи. В статье рассмотрен вопрос моделирования конструкций вертикального стального резервуара для хранения товарной нефти вместимостью 20000 м³. Проведен анализ имеющихся исследований, посвященных неравномерным осадкам наружного контура днища. Приведены аналитическое и численное решения изгиба замкнутой круговой цилиндрической оболочки, находящейся под действием осесимметричной гидростатической нагрузки. Предложена конечно-элементная модель резервуара РВС-20000 для осесимметричного случая нагружения. Графически представлены зависимости возникающих напряжений и прогибов от высоты стенки при действии эксплуатационных нагрузок. Путем сравнения широко известного аналитического решения и предложенного авторами численного решения подтверждена адекватность полученной конечно-элементной модели. Обоснована возможность применения предложенной расчетной схемы и модели для расчетов неравномерной осадки резервуаров в неосесимметричной постановке.

Ключевые слова: резервуар, неравномерные осадки наружного контура днища, ANSYS, САПР**STEEL STORAGE OIL TANK SIMULATED USING ANSYS WORKBENCH 14.5****¹Tarasenko A.A., ¹Chepur P.V., ²Chirkov S.V., ¹Tarasenko D.A.**¹Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen,

e-mail: a.a.tarasenko@gmail.com, chepur@me.com, zuleen@mail.ru;

²OJSC «Giprotruboprovod», Moscow, e-mail: chirkov0210@mail.ru

Existing analytical solutions do not allow to realize the challenges posed by the authors. The matter of modeling vertical steel storage tank with a capacity of 20,000 m³ considered in this article. The analysis of the available researches devoted to differential settlement of outer contour of the bottom is conducted. The analytical and computational solutions of bending a closed circular cylindrical shell under the axisymmetric hydrostatic load are presented. Proposed finite element model of the tank RVS-20000 for the axisymmetric case of loading is described in detail. The dependences of the stresses and deformations of the tank wall height under the action of operating loads are graphically shown. By comparison, the well-known analytical solutions and numerical method proposed by the authors, verified the proposed finite element model. The opportunity of application of the proposed design scheme and models for the calculation of differential settlement of the tanks in non-axisymmetric formulation is justified.

Keywords: aboveground oil tank, differential settlement outer circuit of the bottom, ANSYS, CAD

Многолетняя практика эксплуатации резервуаров показывает, что имеются случаи разрушения металлоконструкций РВС в узле сопряжения стенки и днища. Это ведет к утечке нефти и, как следствие, к значительным материальным затратам, а также наносится вред экологии. Поэтому исследования неравномерных осадок наружного контура днища и окрайки, оценка напряженно-деформированного состояния стенки в зоне нижнего узла позволят обеспечить повышение эксплуатационной надежности вертикальных стальных резервуаров. Однако существующие аналитические методы не позволяют учесть физическую и геометрическую нелинейность при расчете НДС конструкций, поэтому для получения более точных результатов, авторами предлагается использовать метод конечных элементов. Таким образом, предполагается получить численную модель резервуара, максимально отражающую нелинейность, возникающую при воздействии различных факторов, представленных ниже.

В настоящее время эксплуатируется большое количество резервуаров с имеющимися отклонениями от проектной геометрии и дефектами в области нижнего узла, появившихся в результате различных факторов. С момента ввода в эксплуатацию большинства резервуарных парков Западной Сибири изменилась технологическая схема перекачки нефти. Факторами изменения НДС резервуара в области сопряжения стенки и окрайки являются ошибки в проектировании и строительстве. Так, раньше изыскания включали в себя бурение только одной скважины для получения данных об инженерно-геологическом строении грунтового основания под строительство резервуара. Это приводило к снижению точности расчета основания и фундамента. В настоящее время инженерно-геологические изыскания включают в себя бурение минимум 5 скважин. Также произошли изменения в нормативных величинах ветровой и снеговой нагрузок, поэтому многие резервуары, изначально рассчитанные для одних ветровых

и снеговых районов, перестали выполнять условие прочности и устойчивости для новых нормативных значений. На напряженно-деформированное состояние нижнего узла резервуара также могут влиять изменения в свойствах металла (хрупкости, прочности, пластичности), обусловленные длительным сроком эксплуатации и колебаниями температур. Районы эксплуатации резервуаров характеризуются сложными грунтовыми условиями: заболоченность территории, наличие слабых водонасыщенных грунтов, что увеличивает вероятность возникновения неравномерных осадок резервуарных конструкций.

Вопросы неравномерных осадок наружного контура днища РВС рассматриваются в трудах [1, 2, 3]. В их работах получены подробные аналитические решения по данной проблеме. Вопросы напряженно-деформированного состояния конструкций резервуаров широко описаны в трудах [4, 5, 6]. Теория цилиндрической оболочки подробно представлена в [7]. Расчетная схема в общем случае, в которой описываются действующие нагрузки в области нижнего узла резервуара, представлена на рис. 1.

Общее дифференциальное уравнение изгиба замкнутой круговой цилиндрической оболочки, находящейся под действием осесимметричной гидростатической нагрузки, выглядит следующим образом:

$$D \frac{d^4 \omega}{dx^4} + \frac{E \delta}{r^2} \omega = P(x), \quad (1)$$

где D – цилиндрическая жесткость; E – модуль упругости для стали; δ – толщина стенки; r – радиус резервуара; x – координата

нута высоты прогиба; ω – значение прогиба в радиальном направлении; $P(x)$ – интенсивность внешней нагрузки.

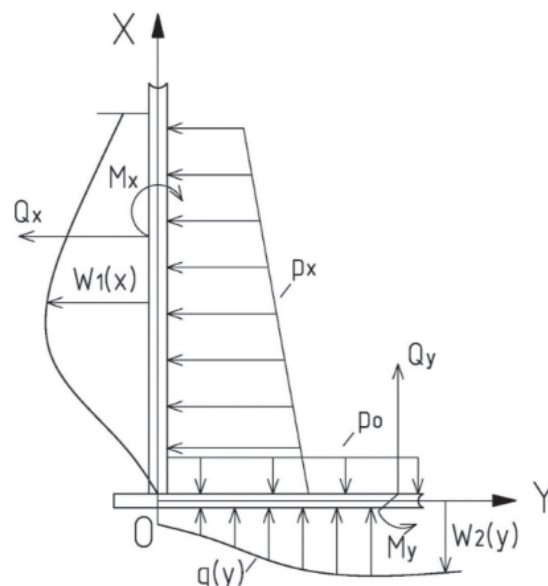


Рис. 1. Расчетная схема нижнего узла резервуара:

$W_1(x)$ – радиальное перемещение стенки;
 $W_2(y)$ – вертикальное перемещение днища;
 $p_x = p_0(1 - x/H)$ – давление жидкости на отметке x ; p_0 – давление жидкости на отметке $x = 0$; $q(y)$ – реактивный отпор грунта под днищем;
 M_x, M_y, Q_x, Q_y – изгибающие моменты и поперечные силы в стенке и днище

Частным интегралом приведенного выше уравнения с учетом граничных условий является уравнение прогибов стенки по [6]:

$$\omega = -\frac{\rho r^2}{E \delta} \left\{ H - x - e^{-\beta x} \left[H \cos \beta x + \left(H - \frac{1}{\beta} \right) \sin \beta x \right] \right\}, \quad (2)$$

где ρ – плотность нефтепродукта; H – высота резервуара; β – коэффициент деформации стенки.

Дифференциальные уравнения и их аналитические решения получены для осесимметричного случая нагружения идеальной цилиндрической оболочки гидростатическим давлением без учета физической и геометрической нелинейности материала конструкции. Для исследования процессов развития неравномерной осадки резервуаров для хранения нефти предлагается использовать численные методы расчета, реализованные в программном комплексе ANSYS. Однако для дальнейшего использования модели резервуара в расчетах необходимо убедиться в адекватности созданной модели.

Автором предлагается решить численным методом рассмотренную выше аналитическую задачу при осесимметричном нагружении в линейной постановке. Таким образом, будет проверена предлагаемая расчетная схема и конечно-элементная модель, которую можно будет использовать в дальнейшем для решения более сложных задач в неосесимметричной постановке.

Расчетная схема (рис. 2) включает в себя действие гидростатической, ветровой нагрузок, а также учитывается вес снегового покрова, кровли. В предложенной модели принимается условие абсолютно жесткого защемления стенки в уторном шве (fixedsupport), кровля не защемлена.

Геометрическая модель 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 взлива нефти $h = 10,88$ м, плотность хранимой нефти $\rho = 875$ кг/м³, значение гравитационной постоянной принимается 8,91 кг/м·с². Значение ветрового давления принимается в соответ-

ствии с СП 20.13330.2011 для I ветрового района $q_{\text{ветр}} = 230$ Па. В предложенной расчетной схеме не моделируется конструкция кольца жесткости и кровли, но для получения достоверных результатов их вес необходимо учитывать. Равномерно распределенная нагрузка от веса кровли, снега, оборудования кровли, кольца жесткости (q) составляет 1200 кН. Данная сила приложена по нормали к верхнему ребру стенки РВС. Отметим, что все силы, рассмотренные в расчетной схеме, прикладываются одновременно.

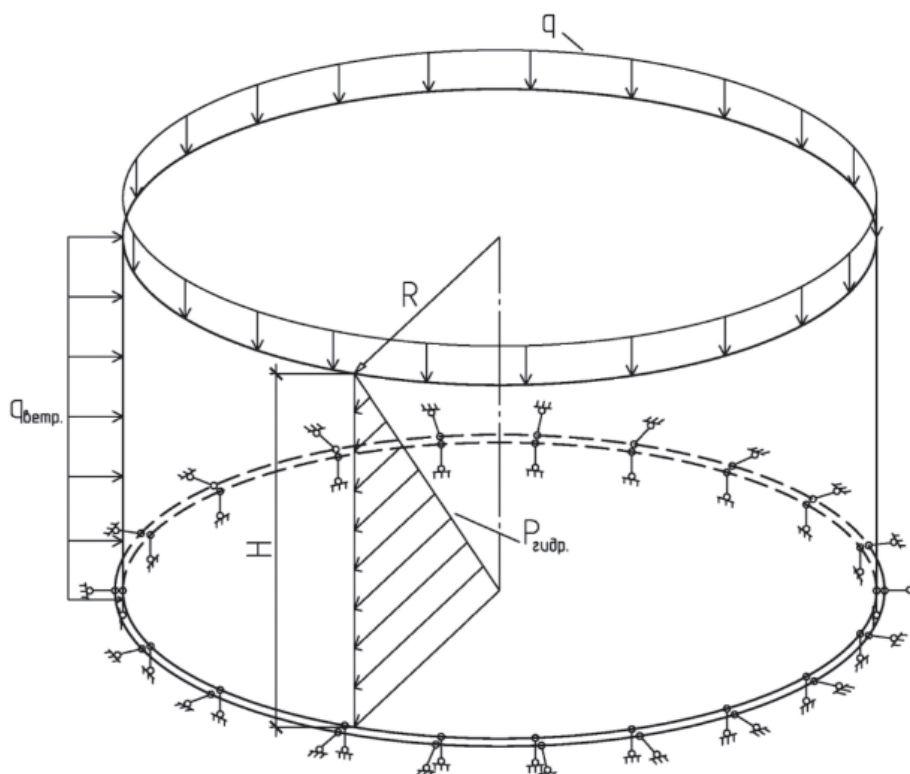


Рис. 2. Расчетная схема резервуара:

$P_{\text{гидр}}$ – гидростатическое давление на стенку и днище резервуара;
 $q_{\text{ветр}}$ – ветровая нагрузка; q – нагрузка от веса металлоконструкций кровли, снега;
 R – радиус резервуара; H – высота резервуара

Материал металлоконструкций – сталь конструкционная низколегированная 09Г2С с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 300$ МПа.

Для построения конечно-элементной сетки выбран элемент SHELL181 (рис. 3), имеющий ряд особенностей, присущих тонкостенным оболочкам, к которым относится конструкция стенки РВС.

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 ANSYS будет использовать изотропный материал с модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона). Элемент SHELL181 учитывает влияние поперечных сдвиговых деформаций. На рис. 3 изображен конечный элемент SHELL181, обозначено 8 узловых точек и 6 степеней свободы элемента в ортогональной 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 днища автором предлагается сгущать конечно-элементную сетку 0,1 м (сторона квадрата элемента SHELL181).

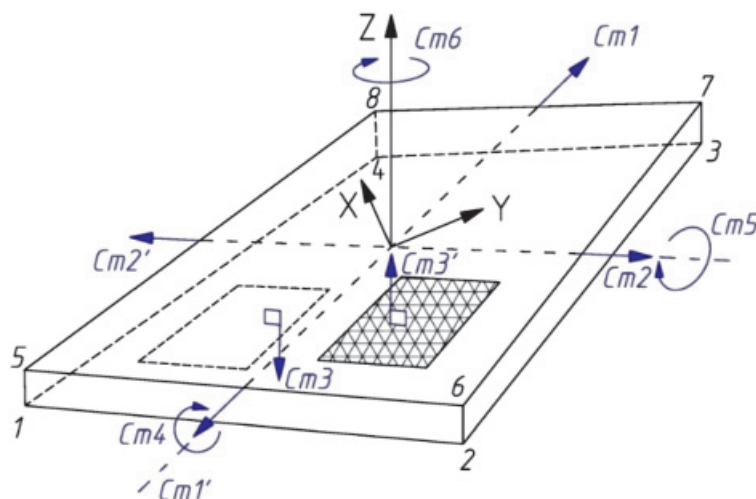


Рис. 3. Конечный элемент SHELL181:
Cm1-Cm6 – обозначение степеней свободы; 1-8 – узловые точки

В постпроцессорной обработке результатов получены значения эквивалентных напряжений и матрица перемещений. Рас-

пределение напряжений в стенке резервуара РВС-20000 по высоте представлено на графике (рис. 4).

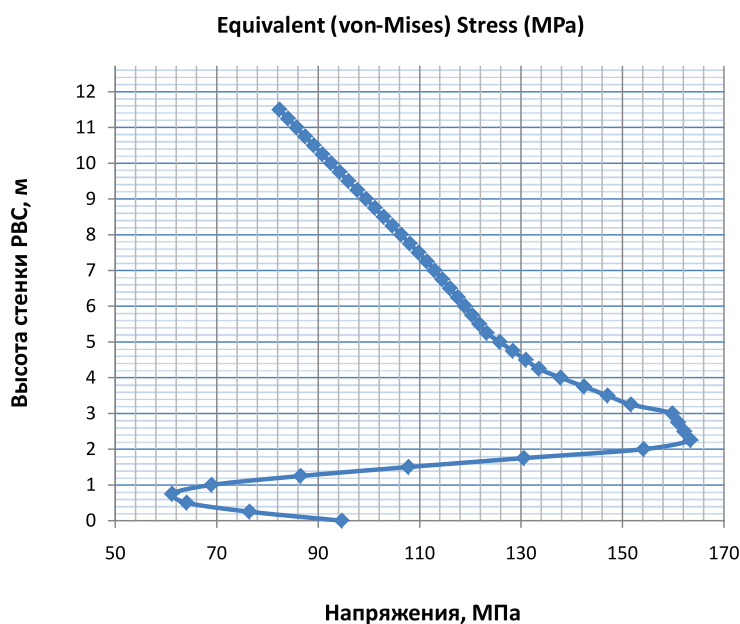


Рис. 4. Напряжения, возникающие в стенке резервуара при действии эксплуатационных нагрузок

Если проанализировать график на рис. 4, то можно сделать вывод о том, что с точки зрения теории прочности скачок напряжений на высоте $h = 0,5-3$ м объясняется моментным напряженно-деформированным состоянием конструкции стенки. Максимальные напряжения находятся на высоте 2,5 м и составляют 165 МПа. Перемещения стенки в радиальном направлении по высоте от действия эксплуатационных нагрузок изображены на графике (рис. 5).

На графике дополнительно нанесено решение для прогибов, полученных из аналитического выражения (2).

Выводы

– Авторами получена численная модель резервуара, позволяющая выполнять расчеты НДС конструкций в неосесимметричной постановке с учетом физической и геометрической нелинейности.

– Проверена адекватность предложенной модели, разница результатов задачи

в осесимметричной постановке, решенной аналитическим и численным методами, составляет 1,76%. Таким образом, предло-

женную модель можно считать адекватной, т.к. отличие от аналитического решения составило не более 2%.

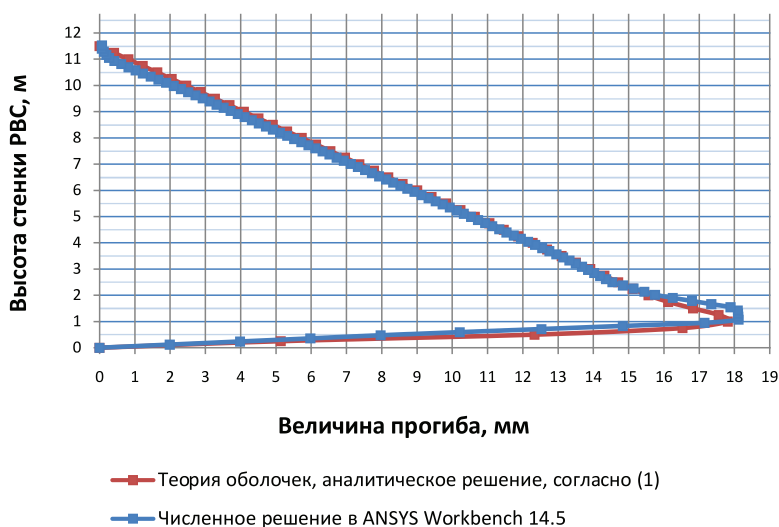


Рис. 5. Перемещения стенки в радиальном направлении от действия эксплуатационных нагрузок

– Данная расчетная схема и полученная модель будут использованы автором для более сложных исследований, а именно для расчета неравномерной осадки резервуаров в неосесимметричной постановке.

Список литературы

1. Коновалов П.А., Мангушев Р.А., Сотников С.Н., Землянский А.А., Тарасенко А.А. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований. – М.: Изд-во «АСВ», 2009. – 336 с.
2. Сафарян М.К. Металлические резервуары и газгольдеры. – М.: Недра, 1987. – 200 с.
3. Слепнев И.В. Напряженно-деформированное упруго-пластическое состояние стальных вертикальных цилиндрических резервуаров при неравномерных осадках основания: дис. ... канд. техн. наук. – М.: Московский Инженерно-Строительный Институт им. В.В.Куйбышева, 1988. – 222 с.
4. Тарасенко А.А. Напряженно-деформированное состояние крупногабаритных резервуаров при ремонтных работах: дис. ... д-ра техн. наук. – Тюмень, 1999. – 254 с.
5. Тарасенко А.А. Напряженно-деформированное состояние вертикальных стальных резервуаров при ремонтных работах. – М.: ОАО Изд-во «Недра», 1999. – 271 с.
6. Тарасенко А.А., Тюрин Д.В. Моделирование нефтяных стальных вертикальных цилиндрических резервуаров // Известия вузов «Нефть и газ». – 2001, – № 4. – Тюмень. С. 31.
7. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки. – М., Изд-во «Наука», 1966. – 636 с.

References

1. Konovalov P.A., Mangushev R.A., Tarasenko A.A. Fundamenty stal'nyh rezervuarov i deformacii ih osnovanij [The foundations of vertical storage steel tanks and deformations of their bases]. Moscow, Izdatel'stvo ASV, 2009. 336 p.

2. Safarjan M.K. Metallicheskie rezervuary i gazgol'dery [Steel storage tanks and gasholders]. Moscow, Nedra, 1987. 200 p.

3. Slepnev I.V. Naprjazhenno-deformirovannoe uprugoplasticheskoe sostojanie stal'nyh vertikal'nyh cilindricheskikh rezervuarov pri neravnomernyh osadkah osnovanija. Diss. kand. tehn. nauk [Stress-strain elastic-plastic state steel vertical cylindrical tanks with irregular settlement base. Candidate technical sciences dissertation]. Moscow, MISIm. V.V. Kujbysheva, 1988. 222 p.

4. Tarasenko A.A. Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie krupnogabaritnyh rezervuarov pri remontnyh rabotah: dis. dokt. tehn. Nauk [Stress-strained state of large-sized tanks during repairs. Doctor technical sciences dissertation]. Tyumen, 1999. 254 p.

5. Tarasenko A.A. Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie vertikal'nyh stal'nyh rezervuarov pri remontnyh rabotah [Stress-strained state of storage steel tanks during repairs]. Moscow. OAO Izdatel'stvo «Nedra». 1999. 271 p.

6. Tarasenko A.A., Tjurin D.V. Modelirovanie nef'tjanyh stal'nyh vertikal'nyh cilindricheskikh rezervuarov [The modeling of vertical oil steel storage tanks] Tyumen: Izvestija vuzov. 2001. no. 4. pp. 31.

7. Timoshenko S.P. Plastinki i obolochki [Plates and shells]. Moscow. Izdatel'stvo «Nauka». 1966. 636 p.

Рецензенты:

Обухов А.Г., д.ф.м.н., профессор кафедры «Высшая математика», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;

Мерданов Ш.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Транспортные и технологические системы», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, г. Тюмень.

Работа поступила в редакцию 05.12.2013.