

УДК 621.642.39.03

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЪЕМА РЕЗЕРВУАРА ПРИ РЕМОНТЕ КОЛЬЦЕВОГО ФУНДАМЕНТА

Тарасенко А.А., Чирков С.В.

«Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень,  
e-mail: a.a.tarasenko@gmail.com; chirkov0210@mail.ru

Рассмотрена практика выполнения ремонта вертикальных стальных резервуаров с подъемом и временным перемещением, проанализирован опыт таких технологий, освоенный американской фирмой MTS (Mix bros. Tank services). Выполнено численное моделирование подъема вертикального стального цилиндрического резервуара РВС-20000, подкрепленного элементами дополнительной жесткости, в программном комплексе ANSYS APDL. Предложена и обоснована схема усиления оболочек резервуара вертикальными рамами жесткости, треугольными косынками (укрепление узла сопряжения стенки и окрайки). Рассчитаны значения действующих напряжений и перемещений в оболочечной конструкции РВС и в дополнительно установленных усиливающих элементах. Произведено сравнение действующих напряжений и перемещений по критериям работоспособности, получено заключение о не превышении критических значений. Полученный запас прочности имеет трехкратный запас. Также рассчитан коэффициент запаса устойчивости. С учетом реальной геометрии стенки резервуара коэффициент запаса устойчивости равен 5,963.

**Ключевые слова:** резервуар, РВС, НДС, подъем, основание, МКЭ, прочность, подъем домкратами.

## NUMERICAL SIMULATION OF LIFT TANK FOR REPAIR RING FOUNDATION

Tarasenko A.A., Chirkov S.V.

«Tyumen State Oil and Gas University», Tyumen,  
e-mail: a.a.tarasenko@gmail.com; chirkov0210@mail.ru

The practical implementation of the repair of vertical steel tanks with the rise and temporary relocation, analyzed the experience of such technologies, earned the American firm MTS (Mix bros. Tank services). Numerical simulation of vertical lifting steel cylindrical tank RVS-20000, supported by elements of the additional stiffness in the software package ANSYS APDL. Proposed and justified amplification circuit tank shells vertical frames stiffness, triangular scarves (strengthening node interface wall and selvages). The values of the effective stresses and displacements in the shell structure of the Tank and additionally installed reinforcing elements. The comparison of the effective stresses and displacements on the criteria of efficiency, obtained conclusion not exceeding critical values. The resulting margin is three-time reserve. Also calculated the stability factor. Taking into account the real geometry of the vessel wall stability factor is equal to 5.963.

**Keywords:** tank, aboveground tank, stress-strain state, tank rise, base, FEM, strength, lifting jacks.

При назначении способов ремонта вертикальных стальных цилиндрических резервуаров (РВС) в последнее время нередко возникает необходимость выполнения ремонта железобетонного кольца, являющегося фундаментом резервуара [4–5, 13]. Практика ремонта фундамента захватками с уда-

лением части металлоконструкций широко известна (рис. 1а) и не вызывает затруднений у ремонтных подразделений. Гораздо сложнее выполнить ремонт с подъемом или даже временным перемещением резервуара, освоенным американской фирмой MTS (Mix bros. Tank services) (рис. 1б) [8, 10].



а)



б)

Рис. 1. Примеры ремонта фундамента захватками (а) и с полным подъемом (б).

После выполнения дефектоскопии на одном из предприятий магистрального транспорта нефти возникла необходимость в полной замене фундамента под резервуаром РВС-20000. Было принято решение выполнить подъем резервуара по всему периметру, заменить фундамент и впоследствии опустить РВС. Поскольку конструкция резервуара представляет собой тонкостенную оболочку и не рассчитывалась при проектировании на сосредоточенные нагрузки от подъемных устройств, возникла необходимость выполнить теоретическое обоснование возможности выполнения такого ремонта [11]. Для проверки проектного решения необходимо выполнить расчет напряженно-деформированного состояния стенки при различных этапах подъема резервуара и ремонта фундамента. Расчет выполнен методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS.

Для создания расчетной модели были использованы значения толщины листов стенки резервуара по результатам ультразвуковой толщинометрии (УЗТ). Толщина стенки для 1–8 поясов и ремонтных вставок первого пояса дифференцируется от 12,3 мм до 9,1 мм. Конечно-элементная модель стенки (рис. 2) представляет собой стальную цилиндрическую оболочку с диаметром  $D = 45600$  мм и высотой  $H = 11920$  мм. Конструкции сферической крыши в расчетной схеме моделируются приложением вертикальной нагрузки от собственного веса элементов крыши и установленного оборудования к верхнему поясу стенки. Действие на крышу нагрузки от снега не учитывалось. Моментная и распорная составляющие нагрузки от веса крыши в расчетной схеме не учтены, т.к. они создают моментную нагрузку только в зоне действия краевого эффекта в верхних поясах стенки. При составлении расчетной схемы рассматривался подъем резервуара при отказе в работе четырех домкратов как наиболее неблагоприятная, с точки зрения нагрузок, операция.

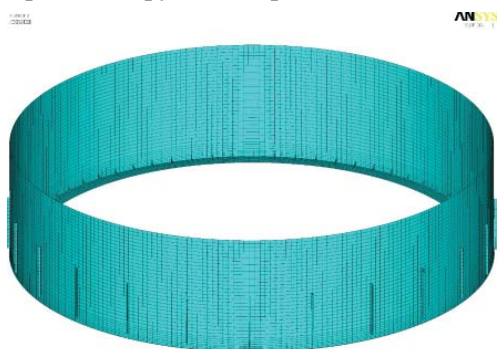


Рис. 2. Конечно-элементная модель РВС-20000

В модели использовано 48974 оболочечных элемента SHELL181, 1924 балочных элемента BEAM188 и 30740 элементов типа SURF 154 для задания ветровой нагрузки [9, 12, 15].

Толщины поясов стенки соответствуют минимальным значениям, полученным по результатам ультразвуковой толщинометрии.

Опорные балки под установку подъемных устройств смоделированы стойками из двух швеллеров № 27 и ригелями из двух швеллеров № 12.

Граничные условия задавались на нижней линии уторного узла как ограничение вертикальных и радиальных перемещений. Комбинация нагрузок определена в соответствии с [1] и включает в себя собственный вес стенки и крыши, ветровое давление, включающее статическую и импульсивную составляющие (рис. 3).

Необходимо отметить, что, исходя из приведенных нагрузок, [1] предусматривает ремонт резервуара в условиях расчетного снега при штормовом ветре.



Рис. 3. Эпюра ветрового давления

В расчетах учтен коэффициент надежности по нагрузке  $\gamma_f$  [2]:

- для ветрового давления: при расчете перемещений – 1, при расчете на прочность – 1,4;
- для веса металлоконструкций – 1,05.

Коэффициент надежности по назначению  $\gamma_n$  принят равным 1,1 [2].

Прочностные критерии определены в соответствии с [1] и представлены в таблице.

Условия жесткости для РВС-20000 принимают следующие значения:

- вертикальные перемещения не должны превышать 4 мм;
- радиальные перемещения не должны превышать 10 мм;
- окружные перемещения не должны превышать 10 мм.

Элемент модели	Критерий работоспособности
Стенка	1. Срединные главные напряжения в кольцевом направлении не должны превышать предела текучести стали с учетом коэффициентов запаса: $\sigma_2 \leq \gamma_c \frac{R_{yn}}{\gamma_m \cdot \gamma_n} \quad (1)$ <p>где <math>R_{yn}</math> – минимальное значение предела текучести материала стенки;  <math>\gamma_m</math> – коэффициент надежности по материалу, равный 1,025;  <math>\gamma_c</math> – коэффициент условий работы, равный для первого пояса стенки, – 0,7, для остальных – 0,9.</p>
	2. Поверхностные (фибровые) главные напряжения в кольцевом направлении не должны превышать предела текучести стали: $\sigma_\phi \leq R_{yn} \quad (2)$
	3. Эквивалентные напряжения по Мизесу не должны превышать предела текучести стали: $\sigma_e \leq R_{yn} \quad (3)$

Для стали 09Г2С, приведенное условие прочности принимает вид:

– для листов толщиной от 2 до 10 мм (4):

$$\sigma_2 \leq \gamma_c \frac{R_{yn}}{\gamma_m \cdot \gamma_n} = \begin{cases} 214 \text{ МПа для первого пояса} \\ 275 \text{ МПа для остальных поясов} \end{cases}$$

Условие прочности для стержневых элементов каркаса рамы принято в соответствии с требованиями [3]:

$$\sigma \leq \gamma_c \frac{R_{yn}}{\gamma_m} \quad (5)$$

где  $\gamma_c = 0,75$  – коэффициент условия работы (табл. 1 [3]).

Для стали С245 предельное напряжение равно: 179,3 МПа.

Расчет проводился в геометрически нелинейной постановке в три этапа.

– первый этап: приложены нагрузки от собственного веса стенки, крыши, оборудования и вертикальных рам жесткости;

– на втором этапе заданы граничные условия перемещения резервуара вдоль оси Z;

– на третьем этапе приложена нагрузка от ветрового давления.

В результате расчетов получены параметры напряженно-деформированного состояния в стенке резервуара и элементах рамы жесткости. Величины и распределение перемещений и напряжений в стенке резервуара и вертикальных рамах жесткости приведены на рис. 4 – 5.

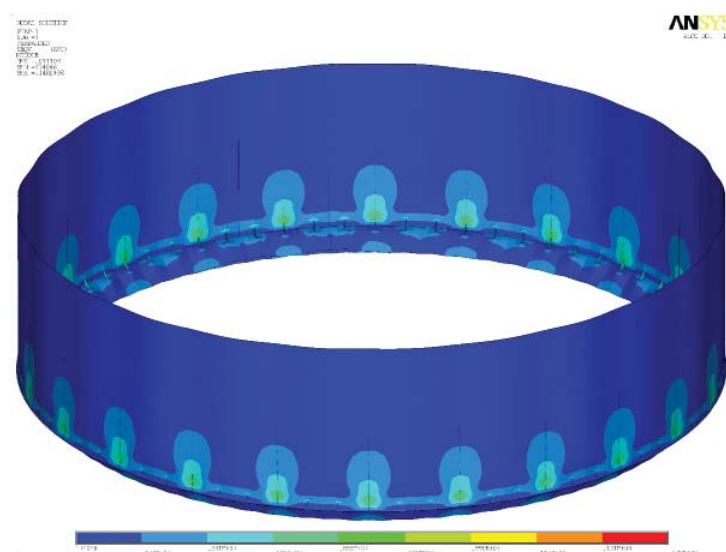


Рис. 4. Эквивалентные по Мизесу напряжения в стенке (мембранные напряжения), Па

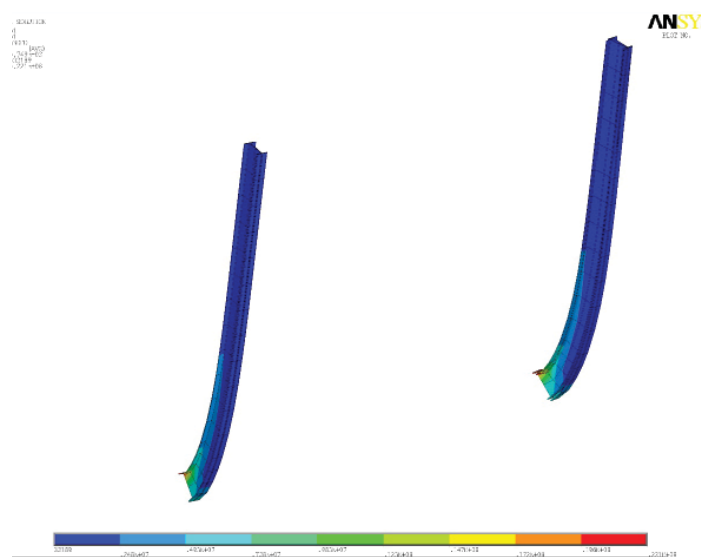


Рис. 5. Эквивалентные по Мизесу напряжения в элементах рамы жесткости, Па

Значения максимальных напряжений и перемещений лежат в допустимых пределах. Максимальные напряжения в стенке 1-го пояса составляют 17,2 МПа, 2–8 поясов – 6,13 МПа, в конструкциях усиливающего каркаса – 22,8 МПа, при допускаемых: 214 МПа, 275 МПа и 179,3 МПа соответственно. Максимальные радиальные, окружные и вертикальные перемещения стенки РВС не превышают 1,17 мм при минимально допустимом значении 4 мм, что говорит о достаточном обеспечении жесткости конструкции.

Поскольку при решении нелинейной задачи потери устойчивости конструкции не наблюдалось, коэффициент запаса устойчивости стенки по Эйлеру был определен стандартным образом, т. е. при решении задачи о собственных значениях [6–7, 14]. Коэффициент запаса при этом равен 5,963.

В результате расчетов установлено, что несущая способность стенки и рам жесткости при подъеме исследуемого резервуара для принятого проектного решения является обеспеченной.

### Вывод

1. Выполнено численное моделирование подъема резервуара РВС-20000, подкрепленного элементами дополнительной жесткости, в программном комплексе ANSYS APDL.

2. Предложена и обоснована схема усиления оболочек резервуара вертикальными рамами жесткости, треугольными косынками (укрепление узла сопряжения стенки и окрайки).

3. Рассчитаны значения действующих напряжений и перемещений в оболочечной конструкции РВС и в дополнительно установленных усиливающих элементах. Согласно приведенным в таблице 1 критериям работоспособности, действующие напряжения и перемещения не превышают критические значения более чем с 3-кратным запасом по прочности.

4. С учетом реальной геометрии стенки резервуара коэффициент запаса устойчивости равен 5,963.

### Список литературы

1. РД-23.020.00-КТН-283-09. Правила ремонта и реконструкции резервуаров для хранения нефти объемом 1000–50000 куб. м.
2. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия: актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. – Изд. офиц. – Взамен СП 16.13330.2010. – М., 2011. – 81 с.
3. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции: актуализированная редакция СНиП П-23-81\*. – Изд. офиц. – Взамен СП 16.13330.2010. – М., 2011. – 171 с.
4. Тарасенко А.А. Напряженно-деформированное состояние крупногабаритных резервуаров при ремонтных работах: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 1991. – 254 с.
5. Тарасенко А.А. Разработка научных основ методов ремонта вертикальных стальных резервуаров: дис. ... докт. техн. наук. – Тюмень, 1999. – 299 с.
6. Тарасенко А.А., Николаев Н.В., Хоперский Г.Г., Саяпин М.В. Напряженно-деформированное состояние стенки резервуара при неравномерных осадках основания // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень. – 1997. – №3. – С. 75-79.
7. Тарасенко А.А., Саяпин М.В. Результаты статистической обработки измерений неравномерных осадок наружного контура днища вертикальных стальных резервуаров // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень. – 1999. – №1. – С. 52-56.
8. Тарасенко А.А., Сильницкий П.Ф., Тарасенко Д.А. Противоречия в современной нормативно-технической базе при ремонте резервуаров // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-15. – С. 3400-3403.



9. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Тарасенко Д.А. Деформирование верхнего края оболочки при развитии неравномерных осадок резервуара // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 6-3. – С. 485-489.
10. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В. Исследование изменения напряженно-деформированного состояния вертикального стального резервуара при развитии неравномерной осадки наружного контура днища // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 10-15. – С. 3409-3413.
11. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В. Обоснование необходимости учета истории нагружения конструкции при ремонте фундамента с подъемом резервуара // *Безопасность труда в промышленности*. – Москва. – 2014. – №5. – С. 60-63.
12. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В., Тарасенко Д.А. Модель резервуара в среде ANSYS Workbench 14.5 // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 10-15. – С. 3404-3408.
13. Тиханов Е.А., Тарасенко А.А., Чепур П.В. Оценка экономической эффективности капитального ремонта основания вертикального стального резервуара методом перемещения // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 6-2. – С. 330-334.
14. Хоперский Г.Г., Овчар З.Н., Тарасенко А.А., Николаев Н.В. Определение неравномерной составляющей осадки резервуаров, вызывающей неосесимметричную деформацию // *Известия вузов "Нефть и газ"*. – Тюмень, – 1997. – № 5. – С. 80-85.
15. Чепур П.В., Тарасенко А.А., Тарасенко Д.А. 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.
4. Tarasenko A.A. Stress-strained state of large-sized tanks during repairs. Candidate technical sciences dissertation. Tyumen, 1991. 254 p.
5. Tarasenko A.A. Razrabotka nauchnyh osnov metodov remonta vertikal'nyh stal'nyh rezervuarov: dis. doct. tehn. nauk. Tyumen, 1999. 299 p.
6. Tarasenko A.A., Nikolaev N.V., Hoperskij G.G., Sajapin M.V. Izvestijavysshihuchebnyhzavedenij.Neft'igaz. 1997, no.3, pp. 75-79.
7. Tarasenko A.A., Sajapin M.V. Izvestijavysshihuchebnyhzavedenij.Neft'igaz. 1999, no.1, pp. 52-56.
8. Tarasenko A.A., Sil'nickij P.F., Tarasenko D.A. Fundamental research, 2013, no.10 part 15, pp. 3400-3403.
9. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Tarasenko D.A. Fundamental research, 2014, no.6 part 3, pp. 485-489.
10. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V. Fundamental research, 2013, no.10 part 15, pp. 3409-3413.
11. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V. Bezopasnost' trudavpromyshlennosti, 2014, no.5, pp. 60-63.
12. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V., Tarasenko D.A. Fundamental research, 2013, no.10 part 15, pp. 3404-3408.
13. Tihanov E.A., Tarasenko A.A., Chepur P.V. Fundamental research, 2014, no.6 part 2, pp. 330-334.
14. Hoperskij G.G., Ovchar Z.N., Tarasenko A.A., Nikolaev N.V. Izvestijavysshihuchebnyhzavedenij.Neft'igaz. 1997, no.5, pp. 80-85.
15. Chepur P.V., Tarasenko A.A., Tarasenko D.A. Fundamental research, 2013, no.10 part 15, pp. 3441-3445.

#### Рецензенты:

Мерданов Ш.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Транспортные и технологические системы», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;

Иванов В.А., д.т.н., профессор кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.  
Работа поступила в редакцию 29.07.2014.