

УДК 621.642.39.03

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЗЕРВУАРА С ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ НЕСОВЕРШЕНСТВАМИ ФОРМЫ СТЕНКИ**Тарасенко А.А., Чепур П.В.***Тюменский государственный нефтегазовый университет,
e-mail: chepur@me.com, a.a.tarasenko@gmail.com*

На основе данных геодезической съемки стенки РВС-20000 авторами разработана конечно-элементная модель резервуара, в которой учитывается реальная геометрия сооружения с учетом отклонений геометрической формы стенки от идеальной цилиндрической оболочки. Предложена расчетная схема РВС-20000 для анализа напряженно-деформированного состояния стенки резервуара при действующих проектных эксплуатационных нагрузках. Установлено, что результаты расчета НДС резервуара с учетом несовершенств геометрической формы дают меньшие значения запаса прочности, нежели расчет идеальной оболочки. Показано, что для достоверного определения изменения напряженно-деформированного состояния конкретного резервуара с несовершенствами геометрической формы при действующих эксплуатационных нагрузках необходимо разрабатывать модель, отражающую его реальную геометрию в соответствии с координатами точек поверхности стенки, которые могут быть получены как при традиционной теодолитной съемке, так и современными методами лазерного 3D сканирования.

Ключевые слова: резервуар, РВС, РВС-20000, МКЭ, ANSYS, НДС, прочность, напряжения**JUSTIFICATION OF EXPLOITATION TANK WITH GEOMETRICAL IMPERFECTIONS FORM WALL****Tarasenko A.A., Chepur P.V.***Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, e-mail: chepur@me.com, a.a.tarasenko@gmail.com*

On the basis of data surveying wall RVS-20000 authors developed a finite element model of the tank, which takes into account the actual geometry of the building with a view of the wall of geometric shapes of deviations from the ideal cylindrical shell. Tank's design scheme for the analysis of stress-strain state of the tank wall at the existing design of operational loads. It was found that the SST calculation of vessel taking into account the imperfections of geometric shapes give smaller values of safety margin, than the calculation of the ideal shell. Results for reliable determination of SST of the concrete tank with imperfections geometric shape when the current operational loads, it is necessary to develop a model that reflects its real geometry in accordance with the coordinates of the points of the wall surface, which can be obtained as in the traditional theodolite and modern 3D laser scanning methods.

Keywords: tank, AST, RVS-20000, FEM, ANSYS, stress-strain state, strength, stress

В практике диагностических обследований крупногабаритных вертикальных стальных резервуаров [6] установлено, что до 70% РВС требуют исправления несовершенств геометрической формы стенки и днища, отклонения которых превышают значения, регламентированные действующей нормативно-технической документацией. Для достоверной оценки влияния этих дефектов на работоспособность резервуара необходимо построение модели сооружения, которая бы отражала его реальную геометрию и напряженно-деформированное состояние при действующих эксплуатационных нагрузках.

Значительные затруднения при моделировании стенки РВС с несовершенствами геометрической формы вызывает тот факт, что определить момент появления отклонений стенки от проектного положения не всегда представляется возможным. Возникает вопрос: дефект появился на стадии строительства и монтажа металлоконструкции или получил развитие в процессе эксплуатации под воздействием постоянных, временных и циклических нагрузок?

Авторами статьи предпринята попытка оценки технического состояния реального резервуара РВС-20000, эксплуатируемого в системе магистрального транспорта нефти (рис. 1) с учетом отклонений геометрической формы стенки. Дело в том, что до вывода в очередной ремонт объект многократно ремонтировался. После проведения плановых ремонтных работ с заменой металлоконструкций РВС отклонения образующих стенки не удалось ввести в допустимые значения, предписанные нормативно-технической документацией. Тогда было принято решение выполнить экспертизу промышленной безопасности опасного производственного объекта путем оценки работоспособности конструкции по реальному техническому состоянию с использованием программного комплекса ANSYS на основе МКЭ. Отметим, что такой подход допускается в РД 08-95-95 – «Положении о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов».



Рис. 1. РВС-20000 на ЛПДС «Воронеж» в процессе ремонта

При моделировании предлагается ввести упрощение, согласно которому утверждается, что в момент окончания строительства оболочка резервуара РВС-20000 имела идеальную цилиндрическую форму в соответствии с проектом ТП-704-1-70. То есть дефекты геометрии стенки развились в процессе эксплуатации конструкции.

Для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния стенки резервуара применён программный ком-

плекс прочностного анализа ANSYS, реализующий метод конечных элементов, который утвержден в отраслевом регламенте ОАО «АК «Транснефть» – РД-23.020.00-КТН-296-07 «Руководство по оценке технического состояния резервуаров» в качестве основного по анализу НДС вертикальных стальных резервуаров.

На рис. 2 представлена расчетная схема РВС-20000, в соответствии с которой выполнялся расчет НДС сооружения.

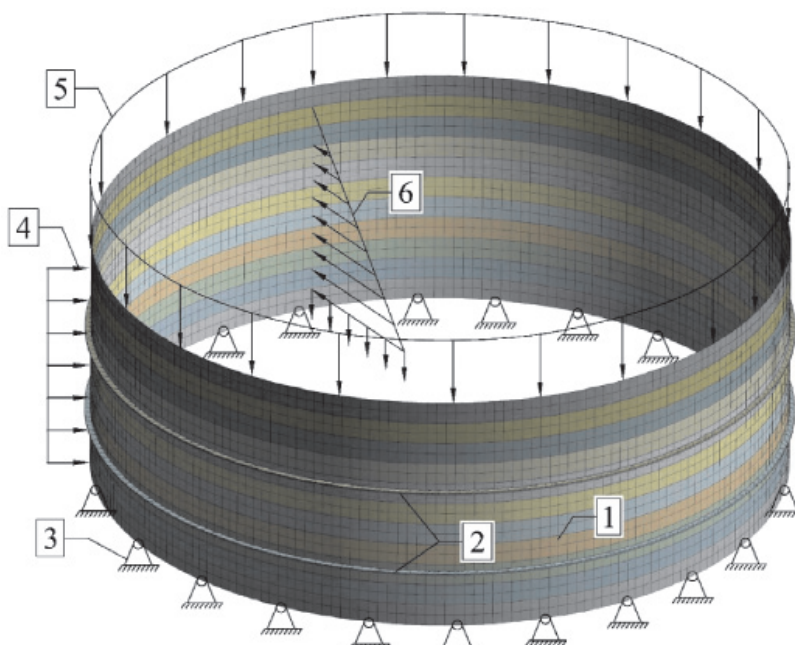


Рис. 2. Расчетная схема:

1 – стенка РВС-20000, имеющая несовершенство геометрической формы; 2 – кольца жесткости на 3-м и 7-м поясах стенки; 3 – жесткое закрепление нижнего ребра стенки; 4 – ветровая нагрузка; 5 – нагрузка от веса стационарной кровли, установленного оборудования и снегового покрова; 6 – гидростатическая нагрузка

Таблица 1

Расчетные параметры сооружения

№ п/п	Наименование параметров	Значение параметров
1	Объем резервуара	20000
2	Класс опасности	1
3	Номер проекта, по которому построен резервуар	ТП-704-1-70 № 4090-П(1)-6,7-АР
4	Нормативное значение ветрового давления, Па	300
5	Нормативная снеговая нагрузка на поверхности земли, Па	1800
6	Максимально допустимое по проекту давление (вакуум) в газовом пространстве резервуара, Па	250
7	Диаметр резервуара, мм	39905
8	Высота стенки резервуара, мм	17900
9	Верхний аварийный уровень взлива, мм	17050
10	Цикличность нагружения (приведенная годовая цикличность нагружения за последний год эксплуатации), циклов/год	30
11	Сведения о продукте, хранимом в резервуаре на момент проведения диагностики	
12	Вид продукта	дизельное топливо
13	Плотность, кг/м ³	860
14	Вес металлоконструкций крыши резервуара, кг	72800

Резервуар состоит из 11 поясов стенки разной толщины общей высотой 17,9 м. На III и VII поясах предусмотрены кольца жесткости Г-образного типа (300×300 мм). Принято, что резервуар жестко закреплен по нижнему ребру стенки. На сооружения действуют следующие нагрузки: гидростатическая от столба жидкости плотностью 860 кг/м³; ветровая (приложена к стенке равномерно) – 300 Па; вакуумметрическое давление – 250 Па; снеговая нагрузка – 2260 кН, нагрузка от веса кровли оборудования и кровли – 728 кН, которые приложены равномерно к верхнему ребру стенки РВС-20000. Расчетные параметры сооружения представлены в табл. 1.

Для того чтобы учесть отклонения от вертикали образующих стенки резервуара (по 23 вертикальным сварным швам), использовались внутренние программные алгоритмы ANSYS. С помощью функции «displacement» выполнялось покоординатное перемещение точек стенки РВС-20000 в положение, которому соответствуют данные последней диагностики – отклонений от вертикали образующих стенки резервуара. То есть из идеальной цилиндрической оболочки выполнялось преобразование в искривленную поверхность, которая соответствует действительному состоянию объекта. В табл. 2 представлены результаты теодолитной съемки стенки РВС-20000 в опорожненном состоянии, которые легли в основу построенной модели.

Таблица 2

Результаты геодезической съемки отклонений от вертикали образующих стенки РВС-20000

Номер пояса	Номер образующей																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
	Отклонение от вертикали образующих стенки резервуара, мм																						
1	35	38	33	-16	-27	-10	9	19	-32	19	21	11	0	2	-6	1	-9	-10	44	33	15	30	21
2	39	66	34	-31	-19	-16	-9	19	-65	14	12	-13	37	4	-2	-10	-22	7	32	-13	14	14	7
3	56	68	54	-27	-3	11	18	44	-86	-14	6	-11	42	13	8	-21	-9	-4	20	-14	19	18	28
4	63	84	66	-15	21	19	26	45	-84	-26	-27	-22	56	20	23	-42	4	-32	9	-32	38	9	20
5	63	82	73	-9	30	26	22	45	-77	-44	-82	-36	44	26	21	-52	-3	-38	2	-10	44	14	25
6	73	101	87	-18	32	35	37	36	-80	-85	-127	-49	78	28	22	-55	-9	-48	-1	5	40	12	37
7	80	90	92	-30	26	41	51	38	-90	-114	-141	-49	101	25	18	-59	-35	-67	-3	15	55	11	49
8	86	81	93	-57	36	45	38	25	-82	-143	-177	-35	74	25	4	-40	-57	-82	-16	-1	50	-25	51
9	84	61	68	-41	49	54	39	23	-52	-186	-224	-23	44	5	-19	-37	-56	-94	-28	-40	38	-29	36
10	61	78	39	-17	50	60	-23	-11	-62	-237	-259	-56	43	-4	-63	9	-69	-102	-56	-67	-6	-47	27
11	59	39	14	8	45	35	-39	-35	-96	-256	-264	-70	15	-9	-31	-14	-89	-130	-100	-69	-61	-24	43

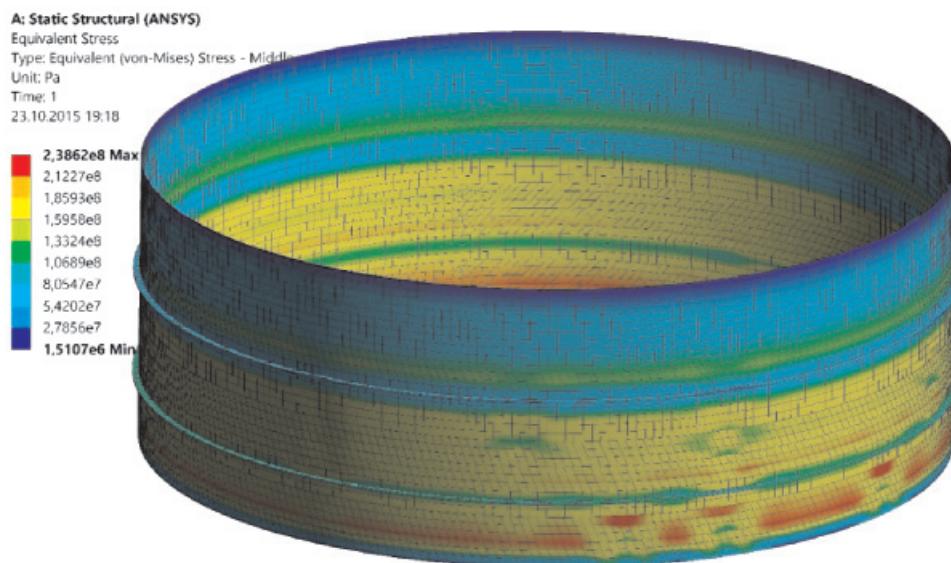


Рис. 3. Максимальные эквивалентные напряжения по фон-Мизесу $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}}$, Па

Для расчета общей устойчивости стенки резервуара проводился расчет НДС стенки опорожненного резервуара методом конечных элементов в физически и геометрически нелинейной постановке задачи при воздействии сжимающих нагрузок (снеговая, ветровая нагрузки, вес крыши, собственный вес стенки, вакуум). Расчет проводился при воздействии нормативных (проектных) значений снеговой, ветровой нагрузок, вакуума, веса металлоконструкций стенки и крыши в соответствии с РД-23.020.00-КТН-296-07 путем пошагового приложения нагрузок до уровня, при котором равнове-

сие конструкции становится нестабильным. По результатам расчета установлено, что общая устойчивость стенки резервуара обеспечивается при проектных (нормативных) значениях нагрузок. На рис. 3 показано распределение максимальных эквивалентных напряжений по фон-Мизесу в металлоконструкциях РВС-20000.

В ходе расчета установлено, что напряжения, действующие в металлоконструкциях резервуара, не превышают критических значений, установленных нормативно-техническими документами. Результаты расчета сведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные значения действующих напряжений в металлоконструкциях РВС-20000

Номер пояса стенки	Действительная толщина элемента, мм	Напряжения в конструкции $\sigma_1^{\text{cp}} / \sigma_2^{\text{cp}} / \sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{max}} / \sigma^{\text{max}}$, МПа, при уровне взлива:	Допустимое значение напряжений, МПа
		При верхнем аварийном уровне (17 050 мм)	
1	15,70	182 / 35 / 204 / 234	197 / 197 / 325 / 325
2	14,70	185 / 28 / 191 / 239	225 / 225 / 325 / 325
3	13,90	160 / 21 / 239 / 207	225 / 225 / 325 / 325
4	12,00	175 / 17 / 184 / 212	225 / 225 / 325 / 325
5	11,00	155 / 13 / 160 / 181	225 / 225 / 325 / 325
6	10,60	138 / 11 / 143 / 186	225 / 225 / 325 / 325
7	9,50	110 / 10 / 167 / 129	225 / 225 / 325 / 325
8	9,50	104 / 10 / 117 / 142	225 / 225 / 325 / 325
9	9,50	65 / 8 / 72 / 119	225 / 225 / 325 / 325
10	9,40	26 / 6 / 31 / 81	225 / 225 / 325 / 325
11	9,30	17 / 6 / 26 / 33	225 / 225 / 325 / 325

Анализируя напряженно-деформированное состояние стенки резервуара с учетом несовершенств геометрии оболочки, авторы установили, что наименьшим запасом прочности обладают I–III пояса стенки. Учитывая, что в наиболее нагруженном столбце жидкости – I поясе стенки, эквивалентные напряжения достигают 190 МПа, к этой величине прибавляются непроектные нагрузки, связанные с дефектами геометрии стенки. Поэтому любые отклонения геометрической формы стенки от проектного положения, особенно нижних поясов, в значительной степени снижают эксплуатационную надежность сооружения в целом, о чем свидетельствуют результаты расчетов, полученные авторами и представленные в табл. 3 и на рис. 3.

Результаты выполненных авторами расчетов позволили пройти экспертизу промышленной безопасности опасного производственного объекта и ввести резервуар в эксплуатацию. Для проверки прочности и устойчивости объекта в сентябре 2015 г. проведены гидроиспытания и запуск в эксплуатацию РВС-20000 на ЛПДС «Воронеж». Таким образом, сооружение продолжает успешно эксплуатироваться по настоящее время, что подтверждает справедливость теоретических выкладок и подходов, предложенных авторами, при численном моделировании объекта.

Выводы

1. На основе данных геодезической съемки стенки РВС-20000 авторами разработана конечно-элементная модель резервуара, в которой учитывается реальная геометрия сооружения с учетом отклонений геометрической формы стенки от идеальной цилиндрической оболочки. Предложена расчетная схема РВС-20000 для анализа напряженно-деформированного состояния стенки резервуара при действующих проектных эксплуатационных нагрузках.

2. Установлено, что результаты расчета НДС резервуара с учетом несовершенств геометрической формы дают меньшие значения запаса прочности, нежели расчет идеальной оболочки. Анализ действующих напряжений рассматриваемого резервуара РВС-20000 показал, что разница в расчетах (с учетом и без учета отклонений стенки от вертикальной образующей) составила 26% – 239 и 190 МПа соответственно, а следовательно, возможно рекомендовать дальнейшую эксплуатацию объекта с наличием дефектов геометрической формы.

3. Выполненные в соответствии с требованиями действующей нормативной доку-

ментации обосновывающие расчеты прочности и устойчивости РВС-20000 позволили пройти экспертизу промышленной безопасности и успешно ввести в эксплуатацию реальный объект на ЛПДС «Воронеж».

Список литературы

1. Васильев Г.Г., Тарасенко А.А., Чепур П.В., Гуань Ю. Анализ сейсмостойкости вертикального стального резервуара РВСПК-50000 с использованием линейно-спектрального метода // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 10. – С. 120–123.
2. Тарасенко А.А., Чепур П.В. Эволюция взглядов на вопросы определения величины допустимых осадок резервуаров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-1. – С. 67–84.
3. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Грученкова А.А. Использование критериев стандарта API-653 для оценки допустимой величины осадки днища резервуаров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-7. – С. 1418–1422.
4. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Грученкова А.А., Соколов С.С. Оценка влияния трубопроводов системы подольного пожаротушения на напряженное состояние резервуара при осадке основания // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-8. – С. 1698–1702.
5. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Тарасенко Д.А. Численное моделирование процесса деформирования резервуара при развитии неравномерных осадок // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 88–91.
6. Тарасенко А.А., Чепур П.В., Шарков А.Е., Гретченко Д.А. Технология диагностики вертикальных стальных резервуаров без снятия антикоррозионного покрытия // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9-8. – С. 1703–1708.
7. Тарасенко М.А., Сильницкий П.Ф., Тарасенко А.А. Анализ результатов дефектоскопии коррозионных повреждений резервуаров // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2010. – № 5. – С. 78–82.
8. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Особенности деформирования крупногабаритных резервуаров со стационарной крышей при неосесимметричном воздействии ветровой нагрузки // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12-1. – С. 97–102.
9. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Особенности совместной работы резервуара и устройств размыва донных отложений винтового типа // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-8. – С. 1671–1675.
10. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Создание и верификация численной модели резервуара РВСПК-50000 // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7-1. – С. 95–100.
11. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Оценка воздействия приемно-раздаточного патрубка при развитии осадки резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-3. – С. 540–544.
12. Чепур П.В., Тарасенко А.А., Грученкова А.А. Анализ возможности использования критериев стандарта API-653 для оценки неравномерной осадки резервуаров отечественных типоразмеров // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-3. – С. 514–519.
13. Чепур П.В., Тарасенко А.А., Грученкова А.А., Антонов И.В. Численный анализ влияния жесткости газоравнительной системы при развитии осадок резервуара // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-6. – С. 1292–1296.
14. Чепур П.В., Тарасенко А.А., Соколов С.С. Оценка влияния трубопроводов системы аварийного сброса на напряженное состояние конструкции резервуара при развитии осадок основания // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-4. – С. 804–808.
15. Чирков С.В., Тарасенко А.А., Чепур П.В. Определение оптимального количества тросов поддержки днища при подъеме резервуара // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2014. – № 5. – С. 72–78.