

УДК 621.642.39.03

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕРАВНОМЕРНОЙ ОСАДКИ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ В РЕЗЕРВУАРЕ

Чепур П.В., Тарасенко А.А.

*«Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень,
e-mail: chepur@me.com; a.a.tarasenko@gmail.com*

В статье рассмотрен вопрос возникновения предельных состояний в конструкциях резервуара РВС-20000. Для исследования НДС металлоконструкций объекта авторами в программном комплексе ANSYS была создана численная модель резервуара РВС-20000. Модель учитывает максимальное количество элементов с учетом их геометрии и соединений, влияющих на НДС резервуара при неосесимметричном нагружении, в том числе за пределами упругости стали. Получены зависимости между параметрами собственной жесткости РВС. Результаты конечно-элементного анализа позволили разработать методику оценки технического состояния сооружения при развитии неравномерной осадки наружного контура днища. Получены зависимости действующих напряжений в конструкциях РВС от величины просадочной зоны, определены области предельных состояний (рис. 1), в соответствии с которыми принимается решение о необходимости ремонта или возможности продолжения эксплуатации резервуара при условии технического обоснования. Предложенная методика может быть использована как эксплуатирующими, так и проектными организациями при принятии управленческих решений в части ремонта РВС-20000, подверженного осадкам основания.

Ключевые слова: резервуар, РВС, НДС, неравномерная осадка, основание, МКЭ, прочность.

INFLUENCE OF PARAMETERS DIFFERENTIAL SETTLEMENT ON OCCURRENCE LIMIT STATES OF TANK

Chepur P.V., Tarasenko A.A.

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

In the article considered the question of limiting states in the construction of the tank RVS-20000. For the study of tank stress-strain state authors in the software package ANSYS created numerical tank model RVS-20000. The model takes into account the maximum number of items based on their geometry and compounds affecting stress-strain state tank under nonaxisymmetric loading, including outside of elasticity of steel. The dependencies between the parameters inherent rigidity tank. The results of finite element analysis allowed us to develop a methodology for assessing the technical state of the structure in the development of differential settlement of the outer contour of the bottom. The dependences of the effective stresses in structures of tank values «n» and «w», assigned area of limiting conditions (Fig. 1), according to which a decision is made about the need to repair or possible continuation of the tank provided technical justification. The proposed technique can be used as exploiting and design organizations in management decisions regarding repair RVS-20000 exposed differential settlement of base.

Keywords: tank, aboveground tank, stress-strain state, differential settlement, base, FEM, strength.

Расчет конструкций вертикальных стальных резервуаров (РВС) должен выполняться по методике предельных состояний первой и второй групп в соответствии с ГОСТ Р 54257. Под предельными подразумеваются такие состояния, при которых несущие конструкции РВС перестают удовлетворять заданным эксплуатационным требованиям или требованиям при производстве работ. При строительстве и эксплуатации крупногабаритных резервуаров возникают нагрузки и воздействия, которые при определенных условиях могут вызвать возникновение предельных состояний как первой (по потере несущей способности и полной непригодности к эксплуатации конструкций), так и второй групп (по затруднению нормальной эксплуатации РВС) [4–5]. Современными нормативными документами: федеральным – РБ Серия 03. Выпуск 69 [1] и отраслевым (ОАО АК «Транснефть»), имеющим еще более жесткие требования, – РД-23.020.00-КТН-018-14 [3] регламенти-

руются проверочные расчеты для определения величины предельных состояний первой и второй групп. Для этого предельные состояния первой группы проверяются расчетом на максимальные нагрузки и воздействия, возможные при нарушении нормальной эксплуатации, а предельные состояния второй группы – на нагружения, отвечающие нормальной эксплуатации конструкций. Несмотря на то что данными нормативными документами учитываются основные нагрузки (гидростатическая, снеговая, ветровая, нагрузка от веса оборудования, избыточного давления и вакуума и т.д.), всё же рассчитывается идеализированный случай, в котором не отражены геометрические несовершенства формы при строительстве, отклонения отметок основания от проектных вследствие возможного брака СМР и т.д. Эти факторы, согласно работам [6, 8, 10, 14], влияют на общее НДС резервуара и в конечном счете на наступление предельных состояний.

Неравномерная осадка наружного контура дна является одним из наиболее опасных факторов, вследствие которого может наступить предельное состояние одной из групп [9]. Согласно актуальному нормативному документу РД-23.020.00-КТН- 283-09 [2], уста-

навливающему более жесткие требования к осадке, чем в ГОСТ Р 31385-2008, величина равномерной осадки РВС-20000 не должна превышать 200 мм, а предельно допустимые значения неравномерной осадки регламентируются следующим образом (таблица):

Наименование параметров	Предельное отклонение при $t_{\text{экспл}} < 5$ лет,	Предельное отклонение при $t_{\text{экспл}} - 5-20$ лет,	Предельное отклонение при $t_{\text{экспл}} > 20$ лет,
	мм	мм	мм
При опорожненном РВС:			
- разность отметок соседних точек на расстоянии 6 м по периметру;	15	19,5	30
- разность отметок любых других точек.	30	39	60
При заполненном РВС:			
- разность отметок соседних точек на расстоянии 6 м по периметру;	30	39	60
- разность отметок любых других точек.	40	52	80

Уже после первых 5 лет эксплуатации, почти в 25% случаев, согласно [7], возникают отклонения наружного контура дна от проектной величины. При этом может возникать как относительно безопасное равномерное проседание РВС по контуру вследствие уплотнения грунтового массива, так и появление неравномерности по наружному контуру дна, что при развитии может привести к пластическим деформациям металла и дальнейшему разрушению.

В случае превышения неравномерной осадки резервуара предельно допустимой величины нормативным документом [2] жестко регламентируется способ ремонта – используется метод подъема резервуара с помощью домкратов. Однако при этом не учитывается история нагружения РВС за весь жизненный цикл, характер приобретения неравномерной осадки [11]. Так, неравномерная осадка может быть изначально заложена как браком строительно-монтажных работ, ошибками проектирования, так и может появиться при действии циклических эксплуатационных нагрузок. Исходя из этого, следует учитывать уровень начальных напряжений в конструкциях РВС при обосновании ремонта во избежание появления пластических деформаций при подъеме [13].

Для исследования предельных деформационных величин РВС-20000 авторами была создана численная модель в конечно-элементном программном комплексе ANSYS. Верифицированная в [12] модель РВС-20000 позволила определить параметры собственной жесткости резервуара при различных величинах неравномерной осад-

ки. Для задания величины просадочной зоны неравномерной осадки использован принятый в теории оболочек безразмерный параметр «n», а для задания значений вертикальных перемещений неравномерной осадки – параметр «u» [11]. Предложенная авторами модель РВС-20000 в неосесимметричной постановке по типовому проекту 704-1-60 учитывает все эксплуатационные нагрузки: гидростатическую, ветровую, снеговую, избыточное и вакуумметрическое давление и т.д. Решена контактная задача взаимодействия грунтового основания и железобетонного фундаментного кольца. В модели учтена работа основных конструктивных элементов РВС: стенки, окрайки, опорного кольца жесткости, балок кровли, листового настила кровли, фундаментного кольца. Узел сопряжения стенки, окрайки и фундаментного кольца смоделирован с учетом полученных результатов работы [15].

Проведенные авторами исследования позволили разработать инженерную методику определения необходимости ремонта РВС-20000 при осадках оснований. На рис. 1 по результатам расчетов, интерпретации и анализе данных собственной жесткости резервуара приведена схема оценки реального технического состояния сооружения при неравномерных осадках. На схеме по имеющимся данным из отчета по диагностике резервуара – точке пересечения кривой деформации «n» (рассчитывается в зависимости от радиуса РВС и длины просадочной зоны) и величине вертикальной составляющей осадки «u» – можно определить «зоны опасности».

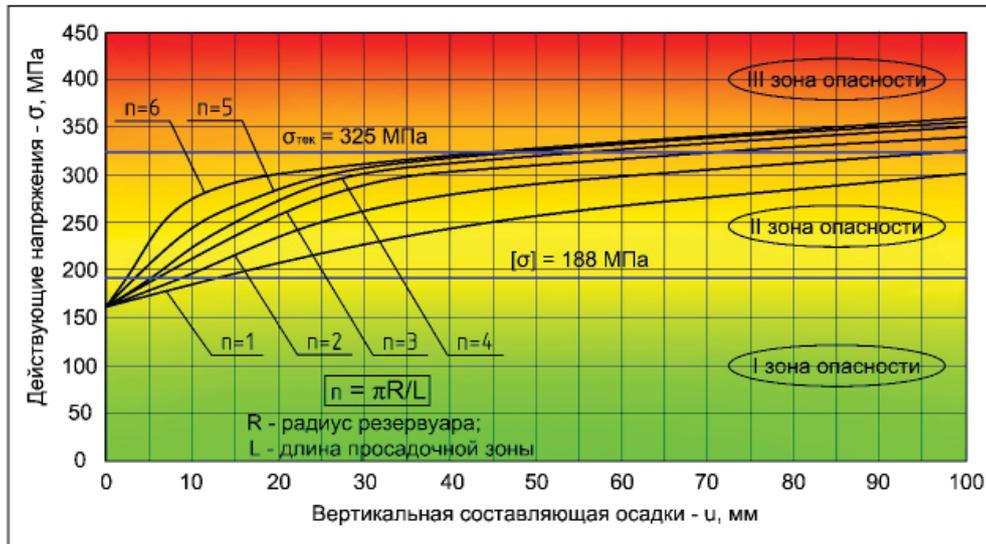


Рис. 1. Зоны опасности напряжений

I зона опасности определяет уровень НДС резервуара, при котором действующие напряжения не превышают допускаемые по НТД [1–3] и составляют $[\sigma] = 188$ МПа. Гарантируется, что в пределах этой зоны не может наступить предельное состояние ни первой, ни второй группы. II зона опасности ограничена пределом текучести резервуарной стали 09Г2С $[\sigma] = 325$ МПа. При определенных условиях в этой зоне возможно возникновение предельных состояний второй группы в конструкциях РВС, необходимо проведение ремонта во избежание дальнейшего развития уровня напряжений и деформаций. Попадание точки пересечения прямой «u» и кривой «n» в III зону опасности говорит о том, что в резервуаре могут воз-

никнуть предельные состояния как I, так и II групп, РВС в таком случае находится в аварийном состоянии и требуется незамедлительное проведение ремонтных работ.

При комплексном анализе НДС конструкций РВС-20000 авторами были выявлены наиболее уязвимые зоны, проявляющиеся при неосесимметричном нагружении, которое вызывается неравномерной осадкой. При величине осадки $n \leq 3$ появляются зоны увеличенных напряжений в стенке над линией «излома», геометрически являющейся хордой, проходящей через границы зоны депланации.

На рис. 2 представлена эпюра с распределением эквивалентных напряжений в данном узле.

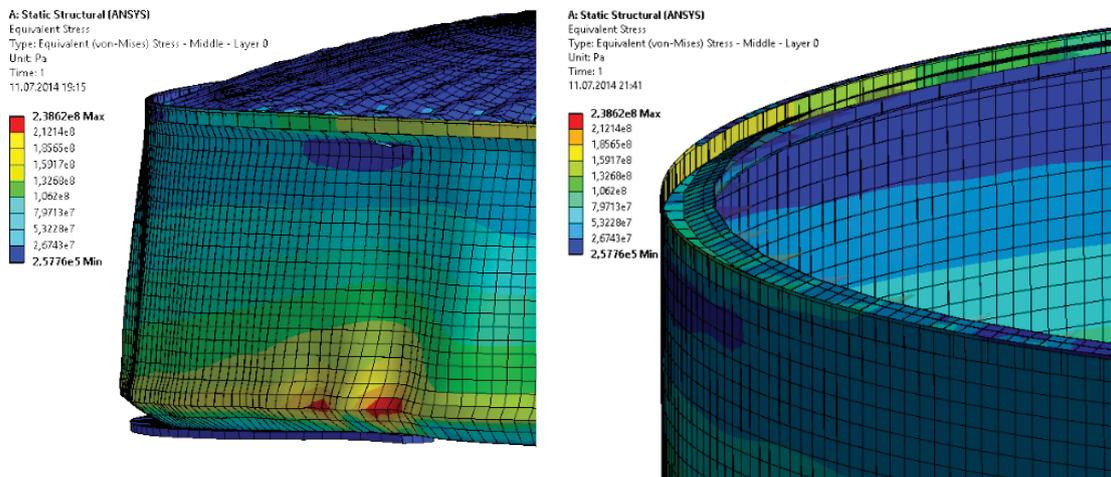


Рис. 2. Действующие напряжения в стенке и зоне опорного кольца РВС-20000

Анализируя прогибы оболочечной конструкции стенки при неравномерных осадках, достигающие порой 30 см в радиальном направлении над просадочной зоной, возникает вопрос обеспечения устойчивости тонкой цилиндрической оболочки – стенки резервуара. Это направление заслуживает детальных исследований.

При изучении распределения напряжений в конструкциях обнаружено, что при значениях $n \leq 5$ в узле сопряжения кровли, стенки и опорного кольца концентрируются значительные напряжения. Особый интерес вызывает тот факт, что наибольшие напряжения в этом узле возникают не в кольце жесткости, а в участке листа стенки 8-го пояса над кольцом жесткости. Это свидетельствует о необходимости введения дополнительных требований к контролю сплошности сварных соединений опорного кольца и стенки в

рамках диагностического обследования при обнаружении неравномерной осадки.

Рассматривая влияние неравномерной осадки на НДС конструкций резервуара, выявлено возникновение значительных прогибов (до 25 см) балок кровли в осевом направлении. При эксплуатации реального объекта это может привести к разрыву сварного соединения листов настила кровли и, как следствие, к разгерметизации газового пространства РВС. Характер деформирования балочного каркаса кровли имеет форму полуволн, количество которых определяется собственной жесткостью РВС и параметрами просадочной зоны. На рис. 3 приведена иллюстрация с прогибами каркаса кровли РВС при неравномерной осадке с величиной просадочной зоны $n=1$ (масштаб деформаций увеличен в 50 раз для визуализации).

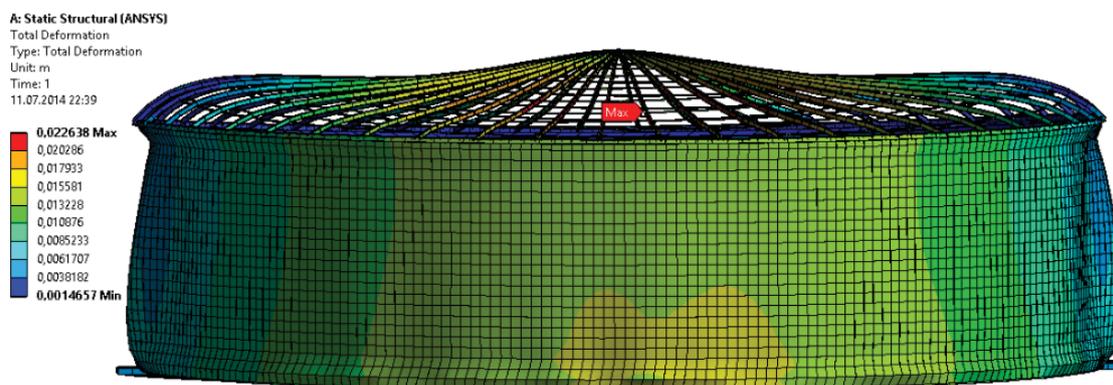


Рис. 3. Прогибы балочной конструкции кровли РВС-20000 при осадке $n=1$

Вывод

1. В программном комплексе ANSYS авторами создана численная модель резервуара РВС-20000, учитывающая максимальное количество элементов металлоконструкций с учетом их геометрии и соединений, влияющих на НДС резервуара при неосесимметричном нагружении, в том числе за пределами упругости стали.

2. Получены зависимости между параметрами НДС и величиной неравномерной осадки и для просадочных зон со значениями $n = 1..6$.

3. Полученные параметры собственной жесткости РВС-20000 позволили разработать методику оценки технического состояния сооружения при развитии неравномерной осадки наружного контура днища.

4. Получены зависимости действующих напряжений в конструкциях РВС от величин « n » и « u », определены области предель-

ных состояний (рис. 1), в соответствии с которыми принимается решение о необходимости ремонта или возможности продолжения эксплуатации резервуара при условии технического обоснования.

5. Выявлены зоны концентрации повышенных напряжений при неравномерных осадках: в стенке над линией «излома» – 235 МПа при $n=2$; в 8 поясе стенки над сварным швом – 195 МПа. Обнаружены значительные прогибы балок кровли – до 25 см при $n=1$. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости введения дополнительных требований к диагностике приведенных узлов в случае выявления неравномерной осадки РВС.

Список литературы

1. РБ Серия 03. Выпуск 69. Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. – М.: ЗАО «НТИЦ исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 240 с.

2. РД-23.020.00-КТН-283-09. Правила ремонта и реконструкции резервуаров для хранения нефти объемом 1000–50000 куб. м.

3. РД-23.020.00-КТН-018-14. Магистральный транспорт нефти и нефтепродуктов. Резервуары стальные вертикальные для хранения нефти и нефтепродуктов объемом 1000–50000 м³. Нормы проектирования.

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 крайки на напряженно-деформированное состояние вертикального стального цилиндрического резервуара при развитии неравномерной

осадки наружного контура днища // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-15. – С. 3441-3445.

References

1. RB Series 03. Issue 69. Safety Manual vertical cylindrical steel tanks for oil and petroleum products. – Moscow: JSC “STC Studies industrial safety”. 2013. – 240 p.

2. RD-23.020.00-КТН-283-09. Terms of repair and reconstruction of oil storage tanks 1000-50000 cubic. m.

3. RD-23.020.00-КТН-018-14. Bulk transport of oil and oil products. Vertical steel tanks for oil storage capacity of 1000-50000 m³. Design standards.

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 – Academic news “Oil and gas”, 1997, no.3, pp. 75-79.

7. Tarasenko A.A., Sajapin M.V. Izvestijavysshihuchebnyhzavedenij.Neft'igaz – Academic news “Oil and gas”, 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 – Academic news “Oil and gas”, 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:

Захаров Н.С., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «САТМ», 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», г. Тюмень.

Работа поступила в редакцию 29.07.2014.