

УДК 621.642.39.03

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИЕМО-РАЗДАТОЧНОГО ПАТРУБКА С ДЕФЕКТОМ С ЦЕЛЬЮ ОБОСНОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

¹Тарасенко А.А., ¹Чепур П.В., ²Кузовников Е.В., ²Тарасенко Д.А.

¹Тюменский государственный нефтегазовый университет, Тюмень, e-mail: a.a.tarasenko@gmail.com; chepur@me.com;

²ООО НПП «Симплекс», Тюмень, e-mail: simplex_rvs@mail.ru; zuleen@mail.ru

Разработана конечно-элементная модель патрубка ПРП-900 с дефектом металла стенки типа «вмятина» в программном комплексе ANSYS Workbench 12.1. Получены значения эквивалентных напряжений, возникающих в дефектном трубопроводе от эксплуатационных нагрузок. Приведен анализ полученных напряжений в сравнении с допускаемыми значениями – на основе расчетного сопротивления стали. Установлено, что вмятина на трубопроводе вызывает местное возмущение напряжений. Так, прирост эквивалентных напряжений в районе максимальной глубины вмятины составил 1,3% по сравнению с окрестностями дефекта. Максимальные значения мембранных, касательных и эквивалентных напряжений не превышают расчетное сопротивление. Сделан вывод о влиянии выявленного дефекта типа «вмятина» на эксплуатационную пригодность исследуемого трубопровода. Конечно-элементный анализ проведен при заданном расчетном давлении внутри трубопровода ПРП с толщиной стенки, соответствующей фактическому значению. Даны рекомендации по возможности безопасной эксплуатации трубопровода ПРП-900 с дефектом «вмятина на стыке» с размерами 110×275 мм, глубиной 7 мм.

Ключевые слова: резервуар, РВС, МКЭ, НДС, ПРП, дефект, вмятина, патрубок

CALCULATION OF STRESS-STRAIN STATE RECEIVING PIPE DISPENSERS WITH DEFECTS IN ORDER TO JUSTIFY ITS FURTHER EXPLOITATION

¹Tarasenko A.A., ¹Chepur P.V., ²Kuzovnikov E.V., ²Tarasenko D.A.

¹Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, e-mail: a.a.tarasenko@gmail.com;

²Simplex, Tyumen, e-mail: simplex_rvs@mail.ru; zuleen@mail.ru

Developed a finite element model of the elbow PRP-900 pipe with metal wall defect type «dent» in the software package ANSYS Workbench 12.1. The values of equivalent stresses arising from the defective pipeline operating loads. An analysis of the stresses in comparison with the permissible values – based on the design resistance of steel. Found that dent in the pipeline causes local stress perturbation. So gain equivalent stresses in the area of maximum depth of 1,3% dent compared with the surroundings of the defect. The maximum values of the membrane, tangents, and equivalent stresses do not exceed the rated resistance. It is concluded that the effect of the type of defect detected «dent» on the usability of the test pipeline. Finite element analysis is performed for a given design pressure inside the pipeline with a wall thickness corresponding to the actual value. Recommendations on the safe operation of the pipeline opportunities PRP-900 defective «dent at the junction» with dimensions 110×275 mm depth 7 mm.

Keywords: tank, aboveground tank, FEM, stress-strain state, receiving pipe, defect, dent, elbow

При проведении дефектоскопии технологических трубопроводов на объектах магистрального транспорта нефти зачастую возникает проблема оценки их технического состояния и возможности дальнейшей эксплуатации [2–5, 7–11, 12–15]. В результате проведения диагностики резервуара РВСПК-100000, выполненной ООО НПП «Симплекс», в околошовной зоне технологического трубопровода ПРП-900 был обнаружен дефект типа «вмятина». По предварительным оценкам не существует комбинации внешних эксплуатационных нагрузок, способных вызвать наступление предельного состояния в патрубке резервуара. Согласно РД 08-95-95 (АК «Транснефть»), допускается выполнять уточняющие расчеты по результатам диагностики металлоконструкций. Кроме того, сроки

поставки элементов патрубка для его полной замены не позволяли своевременно выполнить плановый ремонт резервуара. Было принято решение подтвердить расчетами возможность эксплуатации патрубка с вмятиной, а его замену приурочить к следующему капитальному ремонту. Целью настоящего расчета является определение возможности дальнейшей эксплуатации трубопровода с дефектом данного типа путем установления значений внутренних усилий, действующих в дефектном участке, и сравнения полученных значений максимальных напряжений с расчетными сопротивлениями материала трубопровода.

Значения и характер распределения напряжений в дефектном участке трубопровода предлагается определить с помощью

расчета НДС модели трубопровода с дефектом методом конечных элементов в про-

граммном комплексе ANSYS Mechanical Workbench 12.1 [1, 6].



Рис. 1. Стык трубопровода приемо-раздаточного патрубка ПРП-900 резервуара РВС-100000 с дефектом типа «вмятина»

Состояние, при котором внутренние изменения в металле приводят к его разрушению, называется предельным напряженным состоянием. Вывод о надежности конструкции следует делать на основании сопоставления максимальных напряжений, которые могут возникнуть в наиболее опасной точке, с предельно допустимыми значениями для данного материала. Предельное напряженное состояние конструкции является той границей, за которой недопустима её эксплуатация. Надежность работы оказывается тем выше, чем дальше от предельного состояния уровень фактических напряжений внутри материала детали.

Использование программного комплекса ANSYS для выполнения расчета напряженно-деформированного состояния стенки трубопровода позволяет получить

выходные результаты в виде трех значений главных напряжений σ_0 , которые представляют собой корни кубического уравнения, определяемого компонентами вектора напряжений:

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & 1/2 \sigma_{xy} & 1/2 \sigma_{xz} \\ 1/2 \sigma_{xy} & \sigma_y - \sigma_0 & 1/2 \sigma_{yz} \\ 1/2 \sigma_{xz} & 1/2 \sigma_{yz} & \sigma_z - \sigma_0 \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

Главные напряжения обозначаются через $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Главные напряжения упорядочены таким образом, что σ_1 представляет собой наибольшее положительное напряжение, а σ_3 – наибольшее отрицательное. Интенсивность напряжения s_1 представляет собой абсолютную величину наибольшей из трех разностей: $\sigma_1 - \sigma_2, \sigma_2 - \sigma_3$ или $\sigma_3 - \sigma_1$, т.е.

$$\sigma_1 = \text{MAX} (|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|). \quad (2)$$

Напряжения Мизеса, или эквивалентные напряжения σ_e (выход-

ная величина SEQV), вычисляются по формуле:

$$\sigma_e = (S [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2])^{1/2}. \quad (3)$$

В основу расчета заложена методика [8–10] и [15] допускаемых условных упругих напряжений. Напряженно-деформированное состояние дефекта вида «вмятина» на цилиндрической оболочке трубы определяется пространственной работой расчетной модели под действием сочетаний эксплуа-

тационных нагрузок. Так как целью работы является рассмотрение напряжений, возникающих в районе дефекта трубопровода, то расчетную модель можно ограничить участком трубопровода, содержащим дефект. Рабочей нагрузкой на трубопровод является внутреннее избыточное давление. Также

при расчете необходимо учитывать собственный вес патрубка, ветровую и снеговую/гололедную нагрузки. Таким образом, для обеспечения статической определимо-

сти модели граничные условия учитывают шарнирное закрепление концов участка от линейных перемещений (расчетная схема – рис. 2).

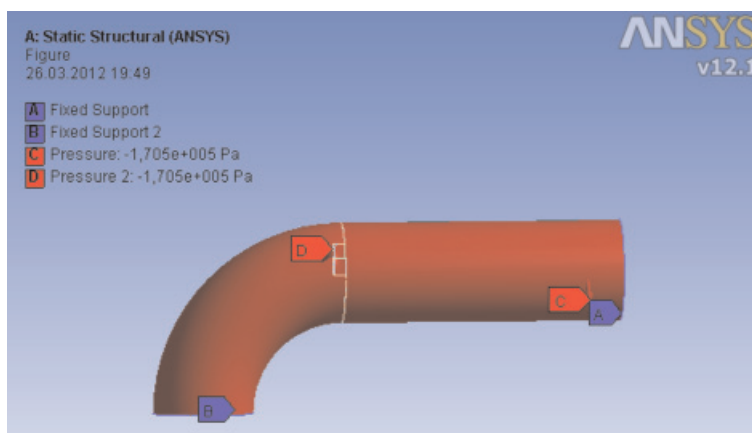


Рис. 2. Расчетная схема прямо-раздаточного патрубка с дефектом типа «вмятина»

Длина оболочки должна быть подобрана таким образом, чтобы исключить возможность влияния концевых заделок на область дефекта. Дефект типа «вмятина вовнутрь» смоделирован в соответствии с данными замеров в ходе диагностики. На участок оболочки приложены распределенные по площади оболочки нагрузки. Сварными швами принято решение пренебречь.

При анализе мембранных напряжений в ПК ANSYS для моделирования оболочки использованы конечные элементы из библиотеки ANSYS типа SHELL181. Для этого импортированная трехмерная модель из программного комплекса Autodesk AutoCAD обрабатывается и оптимизируется в препроцессоре DesignModeller с целью получения поверхностных элементов. Конечно-элементная модель состоит из пяти

оболочечных объектов, связанных между собой связанным контактом типа «bonded», т.е. обеспечивается полная зависимость перемещений во всех узлах. Система координат принята декартовой.

Наложение конечно-элементной сетки принято свободным, повторяющим кривизну поверхности. Сетка накладывается в автоматическом режиме. Минимальный размер грани сетки 0,6 мм получен при сгущении в окрестностях дефекта. В остальных конструктивных элементах размер сетки принят равным 10 мм.

Решение нелинейной модели произведено методом итераций. Значения эквивалентных напряжений представлены в максимально нагруженной области сечения оболочки – наружной поверхности. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета НДС трубопровода с вмятиной

Наименование параметра	Значение параметра
Продукт	Нефть, вода (при гидроиспытании)
Нормативный документ на изготовление	ASTM A694 F52
Наружный диаметр	900 мм
Толщина стенки	9,2 мм – труба/11,4 мм – отвод
Материалы стенки	API 5L Grx52 ASTM A694 F52
Расчетное внутреннее давление	155 кПа
Удельный вес стали	$\gamma_{ст} = 7850 \text{ кг/м}^3$
Модуль упругости стали	$E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$
Коэффициент Пуассона для сталей	$\nu = 0,3$
Параметры дефекта (линейные размеры, глубина)	$S = 110 \times 275, h = 7 \text{ мм}$

Результаты расчета представлены в виде графических изображений полей распределения напряжений в стенке трубопровода на рис. 3–5.

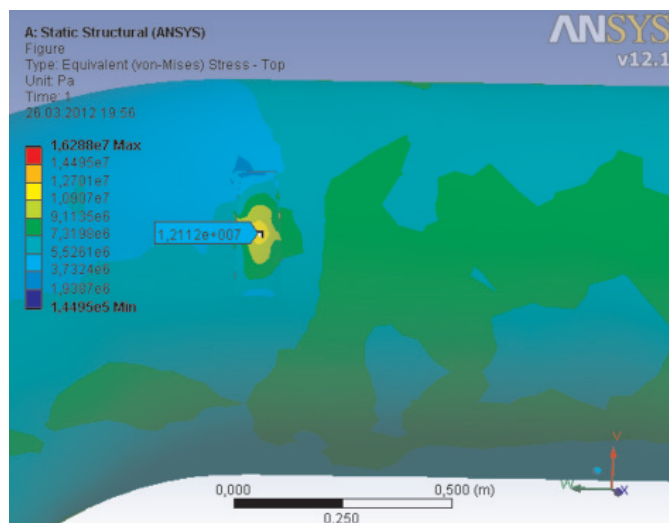


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений в дефектной трубке

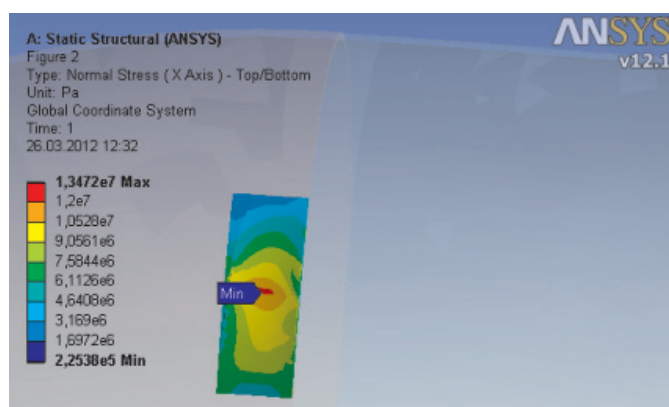


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений в зоне дефекта трубки

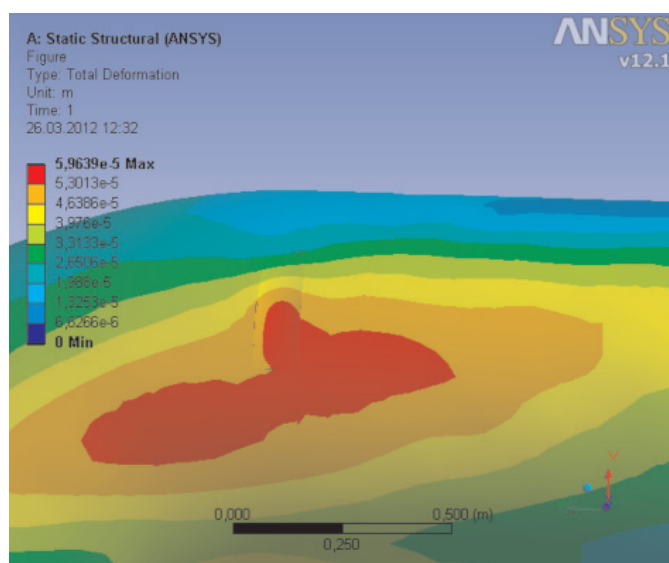


Рис. 5. Прогибы в дефектной трубке

Полученные значения напряжений сведены в табл. 2, где также приведён сравнительный анализ соотноше-

ния возникающих напряжений с расчетным сопротивлением стали трубопровода (189,58 МПа).

Таблица 2

Сравнение действующих напряжений с расчетным сопротивлением стали трубопровода

Наименование	Значение	Соотношение с расчетным сопротивлением стали
σ_m – максимальное значение мембранных напряжений в районе дефекта (normal stress)	13,5 МПа	7,12 %
σ_m – максимальное значение мембранных напряжений за пределами области дефекта (normal stress)	7,54 МПа	3,98 %
σ_e – максимальное значение эквивалентных напряжений по фон Мизесу в районе дефекта (Equivalent stress)	12,1 МПа	6,38 %
σ_e – максимальное значение эквивалентных напряжений по фон Мизесу за пределами области дефекта (Equivalent stress)	9,64 МПа	5,08 %

Выводы

1. Разработана конечно-элементная модель патрубка ПРП-900 с дефектом металла стенки типа «вмятина» в программном комплексе ANSYS Workbench.

2. Эквивалентные напряжения, возникающие в дефектном трубопроводе от эксплуатационных нагрузок, составляют 3,98 % от расчетного сопротивления стали. Вмятина на трубопроводе вызывает местное возмущение напряжений. Так, прирост эквивалентных напряжений в районе максимальной глубины вмятины составил 1,3 % по сравнению с окрестностями дефекта.

3. Максимальные значения мембранных, касательных и эквивалентных напряжений не превышают расчетное сопротивление 189,58 МПа по [10].

4. Условие статической прочности выполняется, то есть $13,5 < 189,58$ МПа.

5. Таким образом, при расчетном давлении 155 кПа внутри трубопровода ПРП с толщиной стенки, соответствующей фактическому значению, прочность трубопровода обеспечивается и можно говорить об отсутствии существенного влияния выявленного дефекта вида «вмятина» на эксплуатационную пригодность исследуемого трубопровода.

6. Безопасная эксплуатация трубопровода ПРП-900 с дефектом «вмятина на стыке» с размерами 110×275 мм, глубиной 7 мм возможна без ограничения эксплуатационных нагрузок, на срок до проведения очередной, полной диагностики резервуара.

Список литературы

1. Семин Е.Е., Тарасенко А.А. Использование программных комплексов при оценке технического состояния и проектирование ремонтов вертикальных стальных резервуаров // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – М., 2006. – № 4. – С. 84–87.
2. Сильницкий П.Ф., Тарасенко М.А., Тарасенко А.А. Расчет фундаментного кольца резервуара с дефектами // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень, 2011. – № 5. – С. 76–78.
3. Тарасенко А.А. Напряженно-деформированное состояние крупногабаритных резервуаров при ремонтных работах: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 1991. – 254 с.
4. Тарасенко А.А. Решение контактной задачи об упругом взаимодействии подъемного устройства и стенки резервуара // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень, 1998. – № 6. – С. 59–63.
5. Тарасенко А.А., Николаев Н.В., Хоперский Г.Г., Овчар З.Н., Саяпин М.В. Исследование влияния приемораздаточных патрубков на напряженно-деформированное состояние стенки вертикальных цилиндрических резервуаров // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень, 1998. – № 1. – С. 59–68.
6. Тарасенко А.А., Тюрин Д.В. Моделирование нефтяных стальных цилиндрических резервуаров // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень, 2001. – № 4. – С. 65–69.
7. 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.
8. 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.
9. 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. – М., 2014. – № 5. – С. 60–63.
10. 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.

11. Тарасенко М.А., Сильницкий П.Ф., Тарасенко А.А. Анализ результатов дефектоскопии коррозионных повреждений резервуаров // *Известия вузов «Нефть и газ»*. – Тюмень, 2010. – № 5. – С. 78–82.

12. 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.

13. Хоперский Г.Г., Саяпин М.В., Тарасенко А.А. Расчет прочности фундаментного кольца резервуара при воздействии сосредоточенной нагрузки от подъемного устройства // *Известия вузов «Нефть и газ»*. – Тюмень, 1998. – № 2. – С. 60–64.

14. Хоперский Г.Г., Саяпин М.В., Тарасенко А.А., Николаев Н.В. Принцип независимости действия сил при расчете напряженно-деформированного состояния стенки резервуаров // *Известия вузов «Нефть и газ»*. – Тюмень, 1998. – № 4. – С. 73–77.

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.

References

1. Semin E.E., Tarasenko A.A. Pipeline transport: theory and practice, 2006, no.4, pp. 84–87.

2. Silnitskii P.F., Tarasenko M.A., Tarasenko A.A. *Izvestijavuzov. Neftigaz*. 2011, no.5, pp. 76–78.

3. Tarasenko A.A. Stress-strained state of large-sized tanks during repairs. Candidate technical sciences dissertation. Tyumen, 1991. 254 p.

4. Tarasenko A.A. *Izvestijavuzov. Neftigaz*. 1998, no. 6, pp. 59–63.

5. Tarasenko A.A., Nikolaev N.V., Hoperskij G.G., Ovchar Z.N., Sajapin M.V. *Izvestijavuzov. Neftigaz*. 1998, no. 1, pp. 59–68.

6. Tarasenko A.A., Turin D.V. *Izvestijavuzov. Neftigaz*. 2001, no. 4, pp. 65–69.

7. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Tarasenko D.A. *Fundamental research*, 2014, no. 6–3, pp. 485–489.

8. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V. *Fundamental research*, 2013, no. 10–15, pp. 3409–3413.

9. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V. *Bezopasnost' trudav promyshlennosti*, 2014, no.5, pp. 60–63.

10. Tarasenko A.A., Chepur P.V., Chirkov S.V., Tarasenko D.A. *Fundamental research*, 2013, no. 10–15, pp. 3404–3408.

11. Tarasenko M.A., Silnitskii P.F., Tarasenko A.A. *Izvestijavuzov. Neftigaz*. 2010, no. 5, pp. 78–82.

12. Tihanov E.A., Tarasenko A.A., Chepur P.V. *Fundamental research*, 2014, no. 6–2, pp. 330–334.

13. Hoperskij G.G., Sajapin M.V., Tarasenko A.A. *Izvestijavuzov. Neftigaz*. 1998, no. 2, pp. 60–64.

14. Hoperskij G.G., Sajapin M.V., Tarasenko A.A., Nikolaev N. V. *Izvestijavuzov. Neftigaz*. 1998, no.4, pp. 73–77.

15. Chepur P.V., Tarasenko A.A., Tarasenko D.A. *Fundamental research*, 2013, no. 10–15, 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 05.08.2014.