

7. Сиротин А.Д. Исследование особенностей уплотнения фракций грунтов оснований резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов / А.Д. Сиротин, М.И. Гильдебрандт, А.В. Грузин // Проблемы геологии и освоения недр: тр. XIX Междунар. науч. симпоз. им. ак. М.А. Усова студ. и молод. уч., Томск, 6–10 апр. 2015 г. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2015. Т. 2. С.551–553.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОТВОДА С ОДИНОЧНЫМ КОРРОЗИОННЫМ ДЕФЕКТОМ

Р. Н. Ахмедьянов

Научный руководитель, доцент Н. В. Чухарева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Производство подводных труб большого диаметра для работы в высокотемпературных условиях высокого давления, предназначенных для транспорта нефти и газа, растет в связи с возрастающими объемами разведки и переработки ресурсов нефтегазовых месторождений. Первоначальные дефекты в трубопроводах образуются либо в процессе изготовления трубы, либо в процессе сварки, а так же возникают под действием внешней и внутренней коррозионно-агрессивной среды [1]. Основными средствами защиты от внутренней коррозии являются: изоляционные покрытия трубы, применение различных ингибиторов, и контроль гидравлических режимов течения транспортируемой среды. Главной причиной порывов нефтепромысловых трубопроводов Западной Сибири остается внутренняя коррозия [2].

Коррозионные дефекты уменьшают прочностной ресурс трубопровода, что увеличивает вероятность утечек, загрязнения окружающей водной среды и близлежащих береговых зон. Поэтому целостность и безопасность сооружения очень важна как по экономическим, так и по экологическим соображениям, а значит необходима точная оценка возможных аварий и угроз [3]. Периодическая диагностика средствами неразрушающего контроля обеспечивает достаточное количество информации о коррозионных дефектах, которая в свою очередь анализируется для определения остаточной допустимой нагрузки, планирования проведения дальнейшей диагностики, и условий и режимов работы объекта [4].

Из-за наличия радиуса кривизны поведение отводов под нагрузкой от создаваемого внутреннего давления отличается от поведения прямого участка трубопровода из того же материала и той же геометрии, так же различно распределение создаваемых напряжений. В прямом тонкостенном трубопроводе продольные и кольцевые напряжения распределены равномерно, но в отводе с уменьшением радиуса кривизны кольцевые напряжения внутренней дуги увеличиваются, а внешней – уменьшаются. Это условие делает отвод слабым звеном в трубопроводном сооружении [5].

Существует большое количество исследований на тему поведения прямолинейного участка корродирующего трубопровода под стандартными нагрузками, такими как внутреннее давление и изгибающий момент, однако для отводов таких исследований гораздо меньше, а общепринятая методика по оценки трубопровода и вовсе отсутствует. В [6] был вычислен эффект от локального утонения стенки и сопутствующая пластическая деформация отвода с помощью метода конечных трехмерных элементов (МКЭ). Однако это и несколько других аналогичных исследований не учитывали внутреннего давления.

Основной задачей данного исследования является анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) отвода с язвенным коррозионным дефектом. Расчет напряженно-деформированного состояния трубопроводных конструкций, базирующийся на методах сопротивления материалов и строительной механики, не позволяет провести адекватный анализ прочности трубопроводов с требуемой точностью, а в некоторых случаях может дать неверную качественную картину. В настоящее время интенсивное развитие получают численные методы, позволяющие значительно расширить класс и постановку решаемых задач за счет более полного учета реальных свойств используемых материалов. Среди этих методов наибольшее распространение получил метод конечных элементов. К его достоинствам следует отнести и минимум требований к исходной информации, и оптимальную форму результатов. Учет температурного влияния и работы конструкции не вносит в реализацию метода принципиальных затруднений. Анализ конструкций с использованием метода конечных элементов является в настоящее время универсальным инструментом для прочностных и других видов расчетов конструкций [7]. Информация, полученная в результате оценки напряженно-деформированного состояния трубопроводов, позволяет рассмотреть особенности распределения напряжения в зоне дефекта в предаварийной ситуации.

Коррозия ведет к потере материала на больших участках трубы (общая коррозия) или сосредотачивается на отдельных небольших участках (локальная коррозия). Общая коррозия обычно моделируется как общее уменьшение толщины стенки трубы/отвода. Эта статья рассматривает только случай локальной язвенной коррозии. Геометрия локального коррозионного повреждения обычно неравномерна по глубине и поверхности, поэтому в рамках данной задачи принято идеализировать эти нестандартные дефекты до эквивалентной эллипсоидальной формы.

Изменение кольцевого расположение дефекта (внутренняя дуга или внешняя) существенно влияет на остаточную прочность трубопровода. Изменение продольного расположения коррозионного повреждения влияет на показатель в меньшей степени, поэтому для удобства вычислений дефект был расположен на середине длины внутренней дуги отвода с плоскостью симметрии (рис. 1).

Модель так же должна включать в себя два прямых участка трубопровода, так как на них распространяется зона пластической деформации отвода. Путем проб и ошибок, было установлено, что для

правдоподобного моделирования соединения будет достаточно прямолинейного участка трубопровода длиной 6r.

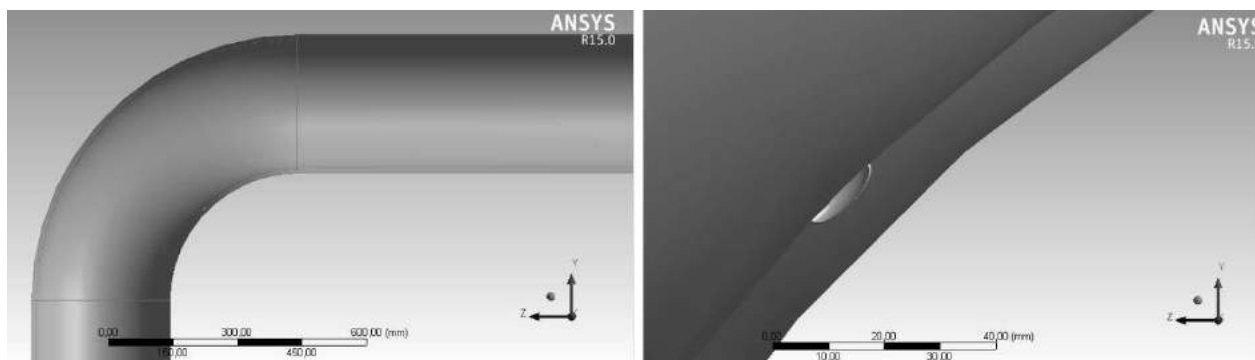


Рис. 1. Геометрия отвода с дефектом

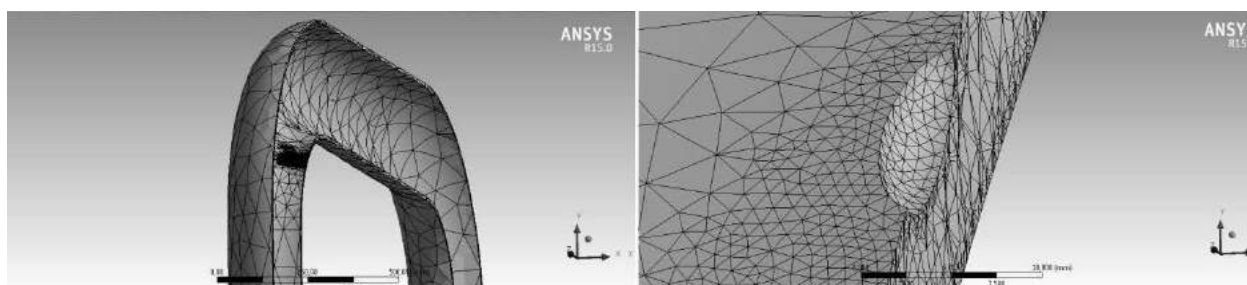


Рис. 2. Сеть конечных элементов

Для анализа использовался программный комплекс Ansys (версия 16.1). Как показано на рис. 2 для более точных расчетов в зоне дефекта была увеличена плотность сетки конечных элементов. Согласно схожим исследованиям, такой тип сетки подходит для решения описанной задачи.

Для нагружения внутренней части отвода и прямолинейных участков трубопровода использовалось давление. Для разработанной модели был применен анализ методом конечных элементов. В этом анализе значение внутреннего давления увеличивалось пошагово, разрушение произошло, когда эквивалентное напряжение по Мизесу достигло предела прочности. На рис. 3 показаны соответствующие граничные условия: было применено жесткое закрепление на концах участка трубопровода, сварными соединениями было принято пренебречь.



Рис. 3. Жесткое закрепление на концах участка трубопровода

Материал, используемый в этом исследовании, – трубопроводная сталь API 5L, обладает следующими механическими свойствами: E (модуль Юнга) = 200 GPa, ν (коэффициент поперечной деформации) = 0,3, σ_y (предел текучести) = 448 МПа, σ_u (временное сопротивление разрыву) = 531 МПа, ϵ_y (деформация текучести) = 0,005, ϵ_r (деформация разрыва) = 0,2.

Истинный график напряженно-деформированного состояния имеет вид:

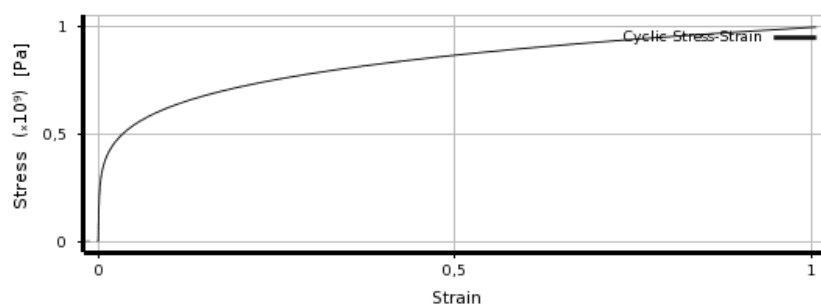


Рис. 4. Кривая напряженно-деформированного состояния исследуемых материалов

Были рассмотрены питтинговые дефекты на внутренней дуге отвода. Когда длина очага коррозии составляет 15 мм, глубина составляет 5 мм, распределения напряжения по Мизесу вокруг очага под различным внутренним давлением показаны на рис. 5 и рис. 6.

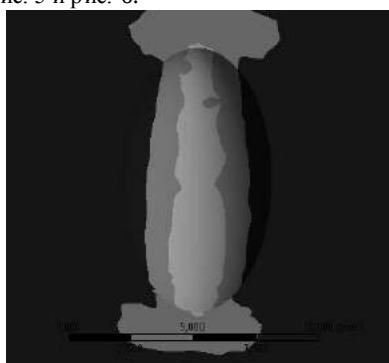


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений в зоне дефекта при внутреннем давлении 4 МПа

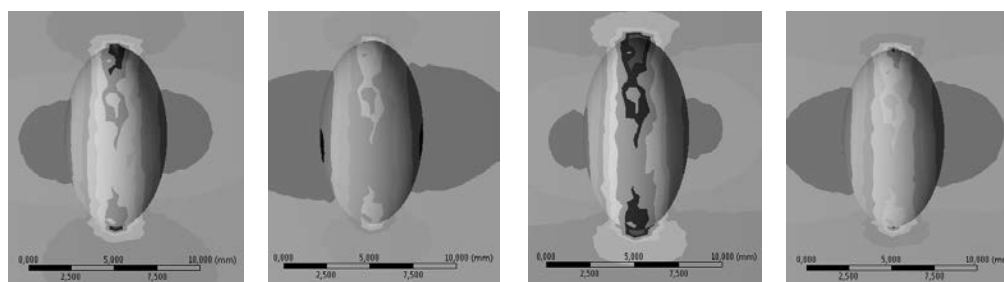


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений в зоне дефекта при давлении 20 МПа, 24 МПа, 28 МПа, 32 МПа

Зависимость предельного давления от геометрических параметров представлена в таблице 1. Независимо от расположения дефекта, максимальное напряжение возникает в крайних точках образующей эллипсоида, расположенной в осевом направлении. Минимальное значение напряжения – в крайних точках, вдоль поперечного направления. Напряжения по Мизесу и пластическая деформация увеличивается с увеличением внутреннего давления. Предельное давление корродирующего трубопровода уменьшается с уменьшением глубины язвы и увеличивается с увеличением толщины стенки. С увеличением длины язвенного дефекта, предельное давление уменьшается. С увеличением внутреннего давления максимальная пластическая деформация появляется в конце эллипсоида язвы, а затем на дне.

Экспериментального подтверждения результатов для данного исследования не проводилось, однако примененная методика и полученные результаты были косвенно подтверждены путем их сравнения с аналитическим решением, представленным в статье [8]. Геометрия рассматриваемого в данной работе дефекта отличается от случая прямоугольного утонения стенки, предложенного в статье упомянутой ранее, по этому стоит заметить, что сравнение результатов анализа методом конечных элементов с описанными упрощенными моделями не может рассматриваться как надежное подтверждение, что не делает их менее интересными и информативными.

Таблица 1

Зависимость предельного давления от геометрических параметров

толщина стенки	длина дефекта	глубина дефекта	предельное давление
0,1	15	3	18,28707
0,1	15	4	15,10801
0,1	15	5	13,06219
0,1	17	5	12,04726

Как известно из мембранной теории, в прямолинейной трубе под давлением, кольцевые напряжения в два раза больше продольных, поэтому, при достижении ими величины σ_f происходит разрушение. Давление можно рассчитать из формулы:

$$\sigma_f = \frac{P_f(D-t)}{2t},$$

где σ_f – кольцевые напряжения, P_f – предельное давление, D – наружный диаметр трубопровода, t – толщина стенки трубопровода.

$$P_f = \frac{2\sigma_f t}{D-t}.$$

Для отображения влияния дефекта на толщину стенки и расчетное давление, ее умножают на выражение $(1 - d/t)/(1 - d/tQ)$. Аналогично этой методике, было выведено следующее уравнение для отвода:

$$P_f = \frac{2t_u}{D-t} \cdot \frac{2R + 2r \sin\theta}{2R + r \sin\theta} \cdot \frac{(1 - d/t)}{(1 - d/tQ)}.$$

Полученные с помощью данной формулы результаты занесены в таблицу 2.

Для определения погрешность метода МКЭ сопоставим соответствующие результаты вычислений:

$$\Delta = \frac{P_{fa} - P_{fМКЭ}}{P_{fa}} \times 100\%.$$

Относительная погрешность МКЭ от аналитического решения составила 3,98 %

Таблица 2

Аналитическая зависимость предельного давления от геометрических параметров

толщина стенки	длина дефекта	глубина дефекта	предельное давление
0,1	15	3	19,04583
0,1	15	4	16,06219
0,1	15	5	14,03542
0,1	17	5	21,02156

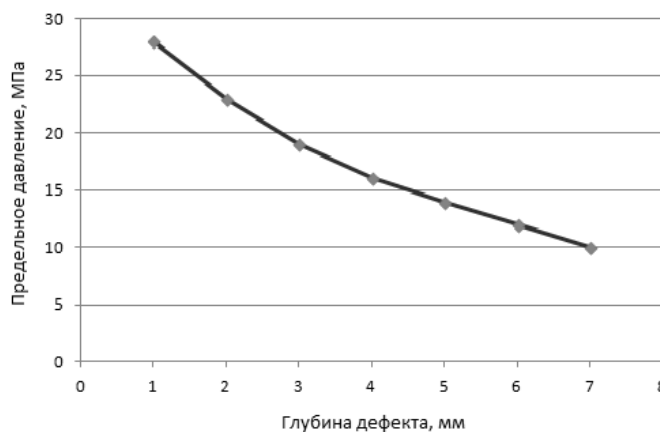


Рис. 7. Зависимость предельного давления от глубины дефекта

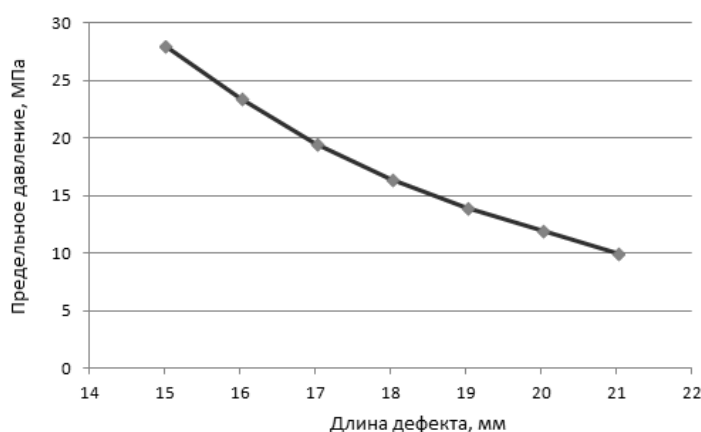


Рис. 8. Зависимость предельного давления от длины дефекта

Основной задачей данного исследования являлся анализ напряженно-деформированного состояния отвода с язвенным коррозионным дефектом. Информация, полученная в результате оценки НДС трубопроводов, позволяет рассмотреть особенности распределения напряжения в зоне дефекта в предаварийной ситуации. Было установлено, что глубина и длина дефекта являются наиболее важными и опасными параметрами, в то время как его ширина и радиус кривизны отвода влияют на величину предельного давления в меньшей степени. Также важно угловое расположение дефекта – наиболее опасные из них располагаются вблизи внутренней дуги отвода. Был опробован аналитический подход к решению проблемы. Для учета особенностей геометрии отвода использовалось уравнение, представленное в статье [1]. Средняя относительная погрешность между новым методом и результатами анализа МКЭ составила 3,98 %.

Литература

1. Guo W, Dong H, Lu M, Zhao X. The coupled effects of thickness and delamination on cracking resistance of X70 pipeline steel. *Int J Press Vessels Pip* 2002;79:403–12.
2. Fan YF, Hu ZQ, Zhou J. Study on mechanical property of corroded pipeline: pipelines. ASCE; 2007. p. 1–9.
3. Adib-Ramezani H, Jeong J, Pluvineau G. Structural integrity evaluation of X52 gas pipes subjected to external corrosion defects using the SINTAP procedure. *Int J Press Vessels Pip* 2006;83:420–32.
4. Alamilla JL, Oliveros J, García-Vargas J. Probabilistic modelling of a corroded pressurized pipeline at inspection time. *Struct Infrastruct Eng* 2009;5: 91–104.
5. Li Z, Yinpei W, Jin C, Cengdian L. Evaluation of local thinned pressurized elbows. *Int J Press Vessels Pip* 2001;78:697–703.
6. Oh C-S, Kim Y-J, Park C-Y. Plastic loads of elbows with local wall thinning under in-plane bending. *Int J Fract* 2007;145:63–79.
7. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах [Текст]. – М.: Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
8. Mohsen Khalaj Khalajestania, Mohammad Reza Bahaaria, Alireza Salehib, Siamak Shahbazic, Predicting the limit pressure capacity of pipe elbows containing single defects. *Applied Ocean Research* 53 (2015) 15–22

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНОГО УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА, ПРОЛОЖЕННОГО В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОМ ГРУНТЕ, В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

Я.С. Бадина

Научный руководитель доцент А.В. Шадрина

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Обеспечение безопасной и надежной работы трубопроводного транспорта углеводородов является главной задачей, которая позволит сократить риск возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций. Решение этой задачи улучшит экологическую обстановку, снизит невозвратимые утечки углеводородов, предотвратит разрушение трубопроводной системы и обеспечит ее оптимальное функционирование.

Актуальностью данной работы является то, что для подземных трубопроводов грунт представляет собой одновременно нагрузку и среду, в которой развиваются деформации сооружения. В качестве грунта рассматривается многолетнемерзлый грунт, обладающий нулевой либо отрицательной температурой и в своем составе содержащий видимые ледяные включения.

Взаимодействие теплого трубопровода с многолетнемерзлым грунтом приводит к значительным деформациям трубопроводов и появлению напряженных участков.

В настоящее время большое развитие получают численные методы, позволяющие значительно расширить класс и постановку решаемых задач за счет более полного учета реальных условий нагружения и свойств используемых материалов. Наибольшее распространение получил метод конечных элементов (МКЭ) [1].