

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЕНКАХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ

© 2011 Ю.Л.Тарасов, О.В. Хвесюк

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 19.03.2011

В статье рассматриваются результаты исследований, посвящённых количественной оценке влияния коррозионных дефектов на напряжённо-деформированное состояние стенок трубопроводов.

Ключевые слова: *трубопровод, коррозия, напряжение, давление*

Оценка эксплуатационной надёжности таких протяжённых объектов, как нефтегазопроводы, связана с анализом их дефектного состояния. Коррозионные повреждения стенок трубопроводов приводят к снижению прочности и эксплуатационной надёжности. Анализ данных, полученных в результате пропуска внутритрубных средств дефектоскопии, показывает, что плотность распределения дефектов может достигать сотен на один километр длины трубопровода [1]. Расчёт параметров надёжности, уровня допускаемого внутреннего рабочего давления, оценка остаточного ресурса связаны с созданием адекватных прочностных моделей, позволяющих учитывать влияние коррозионных повреждений. При анализе напряжённо-деформированного состояния необходимо учитывать влияние следующих видов коррозионных дефектов [2]:

- общая коррозия, которая характеризуется квазиравномерной глубиной и значительной площадью поражения;
- язвенная коррозия – коррозия, локализованная на небольшой площади, но имеющая значительную глубину проникновения по толщине стенки труб;
- совмещение общей и язвенной коррозии – на фоне общей коррозии возникновение одной или множества «язвин»;
- ручейковая коррозия – коррозия канавочного типа, образующаяся вдоль продольных и кольцевых швов, а также в местах расхождения стыков изоляционного покрытия труб.

Следует рассматривать следующие состояния дефектов по степени их опасности (классы опасности):

- закритический дефект – дефект, при котором дальнейшая эксплуатация трубопровода недопустима;

- критический дефект – дефект, являющийся допустимым только при создании до ремонта особых условий эксплуатации трубопровода: снижение действующих нагрузок и осуществление постоянного контроля за параметрами и состоянием дефекта методами наружной и внутритрубной дефектоскопии;

- докритический дефект – допустимый дефект при условии периодического контроля методами наружной и внутритрубной дефектоскопии;

- незначительный дефект – дефект, не оказывающий существенного влияния на надёжность и долговечность эксплуатации трубопровода, при наличии этого дефекта устанавливаются его параметры для последующих сравнений с результатами плановых обследований.

Количественная оценка влияния дефектов на напряжённо-деформированное состояние трубопровода необходима для последующего ранжирования дефектов по степени их опасности. По результатам количественной оценки влияния дефектов и их ранжирования производится принятие решений по проведению следующих мероприятий:

- экстренная остановка эксплуатации трубопровода;
- проведение экстренного ремонта;
- назначение срока ремонта;
- снижение рабочего давления в трубопроводе до безопасной величины, установленной расчётами;
- назначение методов контроля состояния дефекта (или дефектов) и его периодичности.

Выявление дефектов в трубопроводах и оценка их влияния на работоспособность трубопроводов с реализацией мероприятий по обеспечению безопасности их эксплуатации являются трудоёмкими и дорогостоящими операциями. Но они вполне оправданы. Все эти операции можно представить в виде трёх этапов [3]. На первом этапе проводится обнаружение дефектов. Для этого используются ультразвуковые, магнитные или другие средства внутритрубной диагностики. Второй этап работ по обеспечению безопасности

Тарасов Юрий Леонидович, доктор технических наук, профессор кафедры прочности летательных аппаратов. E-mail: proch@ssau.ru

Хвесюк Олег Вячеславович, заведующий учебной лабораторией кафедры прочности летательных аппаратов

эксплуатации трубопроводов (после обнаружения дефектов любым из применяемых средств) – идентификация дефектов и их классификация по характеру и степени повреждения металла. При внутритрубной диагностике этот этап сопряжён с определёнными трудностями, заключающимися не только в правильной идентификации дефектов, но также в точном определении местонахождения, формы и размеров выявленных зон повреждений. Как правило, он более прост и надёжен при использовании ультразвуковых средств. Третий, завершающий этап – оценка степени опасности выявленных дефектов, принятие решений и их реализация, то есть продолжение подконтрольной эксплуатации или прекращение эксплуатации, ремонт. Ремонт участка трубопровода может заключаться в наплавке, установке муфт, вырезке «катушек» с дефектами и замене их новыми и так далее. Ниже рассматривается влияние общей коррозии, характеризующейся квазиравномерной глубиной, на напряжённо-деформированное состояние стенки трубопровода.

При исследовании влияния одиночного коррозионного дефекта (рис. 1) на напряжённо-деформированное состояние стенки трубопровода рассматривались 2 схемы коррозионных дефектов при виде в плане, которые представлены на рис. 2.

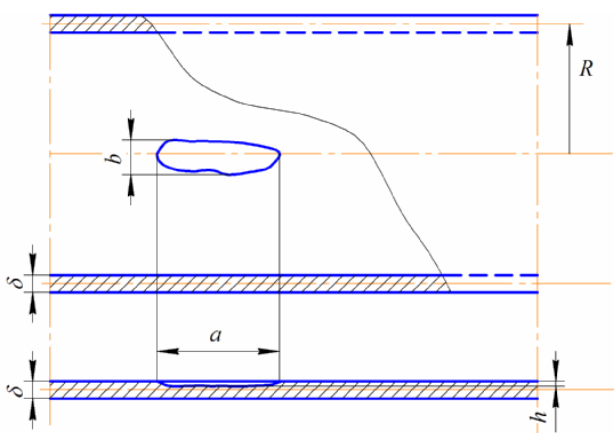


Рис. 1. Стенка трубопровода, подверженная коррозии

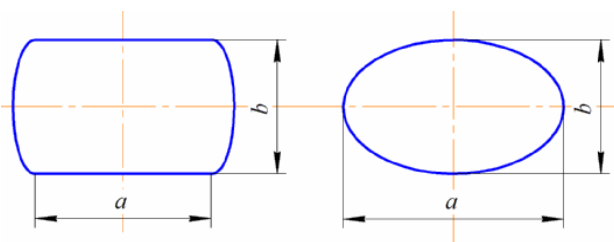


Рис. 2. Вид в плане рассматриваемых коррозионных пятен: a – размер коррозионного пятна в осевом направлении, b – размер коррозионного пятна в окружном направлении

На виде в плане рассматриваемые коррозионные пятна представляют собой геометрические фигуры двух типов. Одна из схематизаций близка по форме к прямоугольнику с незначительным закруглением углов, что неизбежно при моделировании для формирования перехода от поверхности с уменьшенной вследствие коррозии толщиной стенки трубопровода к поверхности, коррозии неподверженной. Другая фигура по форме представляет собой эллипс. В представленной статье варьируется отношение размеров сторон (в случае эллипса – осей) для оценки влияния на напряжённо-деформированное состояние параметра вытянутости коррозионного дефекта (пятна) в одном из двух направлений, кроме того, варьируется и глубина проникновения коррозионного пятна в несущий слой стенки трубопровода. Каждый из размеров a и b варьируется в диапазоне от 100 до 400 мм, и рассматриваются их различные сочетания, варианты которых приведены в табл. 1, 2. Схемы построения геометрической формы коррозионного дефекта (пятна) в поперечном сечении трубопровода и в его продольном сечении приведены на рис. 3, 4. По простым зависимостям аналитической геометрии вычислены размеры ρ и Δ , которые связаны между собой зависимостью

$$\rho + \Delta = R_{вн} + h \quad (1)$$

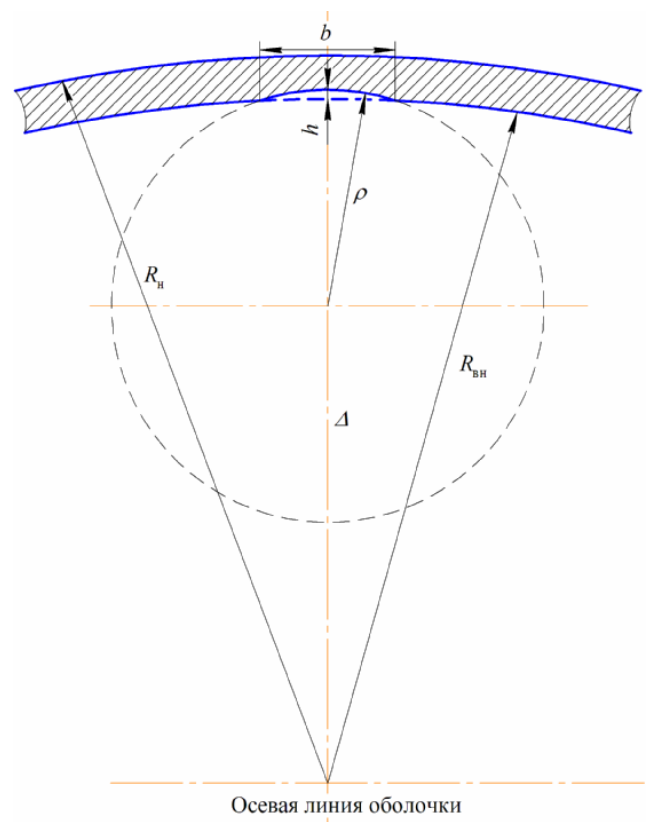


Рис. 3. Геометрия коррозионного дефекта (пятна) в поперечном сечении трубы

После вычисления величин ρ и Δ моделируется трёхмерный объект, поверхность которого является образом поверхности коррозионного дефекта (пятна). Используемый в последующем конечно-элементном моделировании аппарат булевых операций позволяет получить объект сложной геометрии – модель участка трубопровода с коррозионным дефектом. Результаты проведённых вычислений приведены в таблицах работы [4]. Конечно-элементное моделирование выполнено для участка трубопровода с геометрическими размерами: $R_n = 600$ мм – наружный радиус трубы; $R_{вн} = 590$ мм – внутренний радиус трубы; $R = 595$ мм – радиус средней поверхности; $\delta = 10$ мм – толщина стенки.

С помощью трёхмерного конечно-элементного моделирования оцениваются характер и уровень локального возмущения напряжённо-деформированного состояния. Все расчёты выполнены с использованием программного комплекса ANSYS. Для создания конечно-элементной модели выбран объёмный 20-узловой изопараметрический конечный элемент SOLID 186, изображённый на рис. 5. В качестве приложенных нагрузок рассматривалось действие избыточного давления p в трубопроводе, вследствие действия которого в меридиональных и в поперечных сечениях неповреждённой трубы возникают напряжения, соответственно равные

$$\sigma_y = \frac{pR}{\delta}, \sigma_z = \frac{pR}{2\delta} \quad (2)$$

Таблица 1. Сводные данные по трубе с коррозионным пятном прямоугольного вида в плане. Окружное направление

№ п/п	h, мм	a, мм	b, мм	a/b	Внешняя поверхность	Внешняя поверхность	Внутренняя поверхность	Внутренняя поверхность	Y*, мм
					$\sigma_{zmax}/\sigma_{z0}$	$\sigma_{y max}/\sigma_{y0}$	$\sigma_z max/\sigma_{z0}$	$\sigma_y max/\sigma_{y0}$	
1	1	100	100	1	1,06	1,05	1,2	1,27	235
2	3	100	100	1	1,29	1,24	1,62	1,96	290
3	5	100	100	1	1,64	1,50	1,94	2,85	330
4	1	200	100	2	1,06	1,07	1,20	1,35	280
5	3	200	100	2	1,27	1,32	1,68	2,29	280
6	5	200	100	2	1,61	1,71	2,33	3,68	280
7	1	400	100	4	1,04	1,05	1,24	1,41	470
8	3	400	100	4	1,17	1,29	1,87	2,60	470
9	5	400	100	4	1,34	1,6	2,58	4,03	470
10	1	200	200	1	1,11	1,08	1,125	1,24	370
11	3	200	200	1	1,4	1,33	1,378	1,834	420
12	5	200	200	1	1,8	1,63	1,72	2,71	470
13	1	100	200	0,5	1,11	1,05	1,15	1,16	330
14	3	100	200	0,5	1,39	1,21	1,33	1,52	400
15	5	100	200	0,5	1,79	1,36	1,38	1,96	470
16	1	100	400	0,25	1,1	1,042	1,09	1,09	400
17	3	100	400	0,25	1,377	1,19	1,154	1,27	450
18	5	100	400	0,25	2,2	1,67	1,14	1,52	500

Усилия, соответствующие этим напряжениям, учитываются при построении конечно-элементной модели участка трубопровода и при формировании граничных условий.

В работе [4] представлены полные результаты расчётов, приведённые в виде таблиц и графиков. Ниже в табл. 1 для коррозионного пятна прямоугольного вида в плане представлены наибольшие значения отношений вычисленных нормальных напряжений в окружном направлении к их номинальным значениям. Номинальные значения при этом совпадают со значениями, вычисленными по безмоментной теории оболочек. Эти относительные величины представляют собой по сути дела коэффициенты концентрации напряжений.

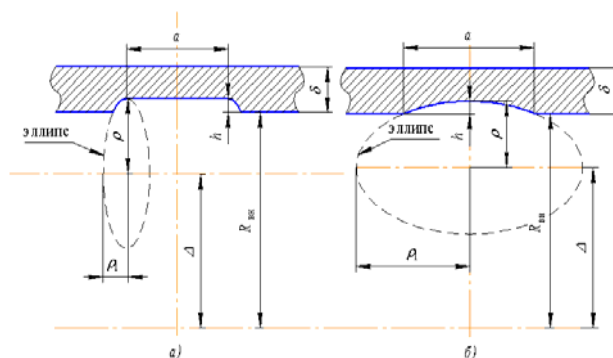


Рис. 4. Геометрия коррозионного дефекта (пятна) в меридиональном сечении трубы

Таблица 2. Сводные данные по оболочке с коррозионным пятном эллиптического вида в плане. Окружное направление

№ п/п	h, мм	a, мм	b, мм	a/b	Внешняя поверхность	Внешняя поверхность	Внутренняя поверхность	Внутренняя поверхность	Y*, мм
					$\sigma_{z\max}/\sigma_{z0}$	$\sigma_{y\max}/\sigma_{y0}$	$\sigma_{z\max}/\sigma_{z0}$	$\sigma_{y\max}/\sigma_{y0}$	
1	1	100	100	1	1,05	1,03	1,27	1,22	190
2	3	100	100	1	1,19	1,13	1,84	1,67	235
3	5	100	100	1	1,39	1,23	2,33	2,09	280
4	1	200	100	2	1,06	1,06	1,22	1,07	280
5	3	200	100	2	1,25	1,23	1,69	1,95	280
6	5	200	100	2	1,55	1,45	2,09	2,74	280
7	1	400	100	4	1,05	1,06	1,21	1,35	290
8	3	400	100	4	1,23	1,28	1,73	2,37	320
9	5	400	100	4	1,54	1,64	2,33	3,6	370
10	1	200	200	1	1,1	1,06	1,16	1,18	370
11	3	200	200	1	1,35	1,21	1,46	1,56	415
12	5	200	200	1	1,68	1,36	1,67	1,97	460
13	1	100	200	0,5	1,07	1,03	1,24	1,13	300
14	3	100	200	0,5	1,23	1,11	1,74	1,36	330
15	5	100	200	0,5	1,42	1,17	2,23	1,54	370
16	1	100	400	0,25	1,06	1,02	1,21	1,08	370
17	3	100	400	0,25	1,20	1,08	1,58	1,22	370
18	5	100	400	0,25	1,29	1,11	2,27	1,34	420

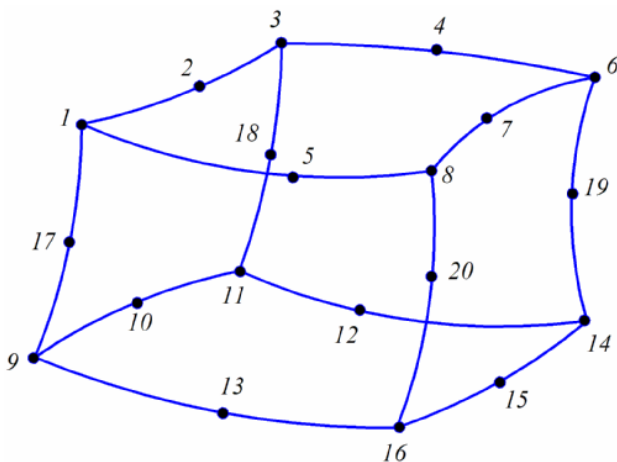


Рис. 5. Объёмный изопараметрический конечный элемент SOLID 186

В табл. 2 приведены соответствующие данные для коррозионного пятна эллиптического вида в плане. В табл. 1, 2 буквой Y* обозначены линейные размеры области возмущения напряжённого состояния. Если воспользоваться терминологией теории оболочек, то участок трубопровода как рассчитываемая конструкция есть цилиндрическая оболочка, относящаяся, как известно, к оболочкам нулевой гауссовой кривизны. При этом область, в которой испытывает возмущение поле напряжений, локальна, что же касается поля перемещений, то область возмущения в нём захватывает полосу, расположенную вдоль асимптотической линии. Величина Y*

характеризует область затухания, как поля напряжений, так и перемещений.

Ниже приведены выборочные графики, на которых представлены изменения окружных напряжений на наружной и внутренней поверхностях трубопровода в окружном направлении, начиная с точки, находящейся в геометрическом центре пятна. Первый график (рис. 6) построен по результатам конечно-элементного расчёта для коррозионного дефекта прямоугольного вида в плане, второй график (рис. 7) построен для коррозионного дефекта эллиптического вида в плане.

Анализ приведенных данных показывает, что на степень увеличения напряжений, обусловленную влиянием повреждения, в большей степени сказывается влияние глубины повреждения, нежели формы пятна в плане. Более того, коэффициенты концентрации напряжений для коррозионных пятен, характеризующихся отношением $(a/b)=1$, то есть квадратного и кругового в плане, оказываются близкими по величине для соответствующих значений глубины повреждения, хотя для коррозионных пятен прямоугольного вида в плане коэффициенты концентрации напряжений выше. Концентрация напряжений оказывается большей для внутренней поверхности, чем для внешней. Здесь стенка трубы испытывает действие изгиба в поврежденной зоне, то есть работает она подобно стенке оболочки.

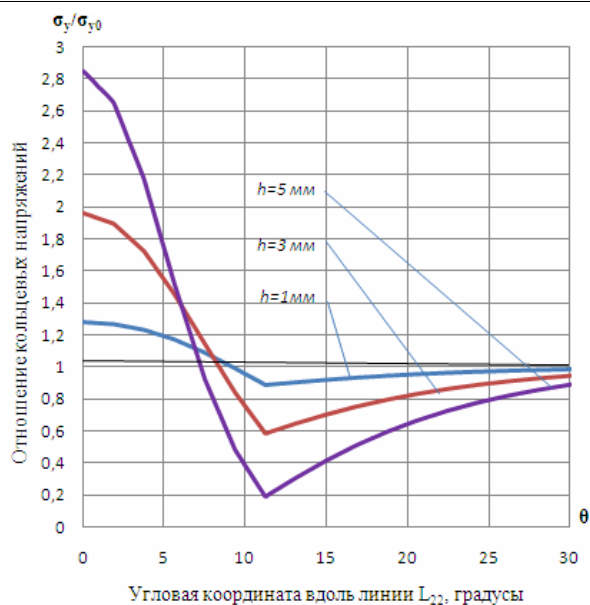


Рис. 6. График изменения относительных кольцевых напряжений на внутренней поверхности трубы для прямоугольного пятна

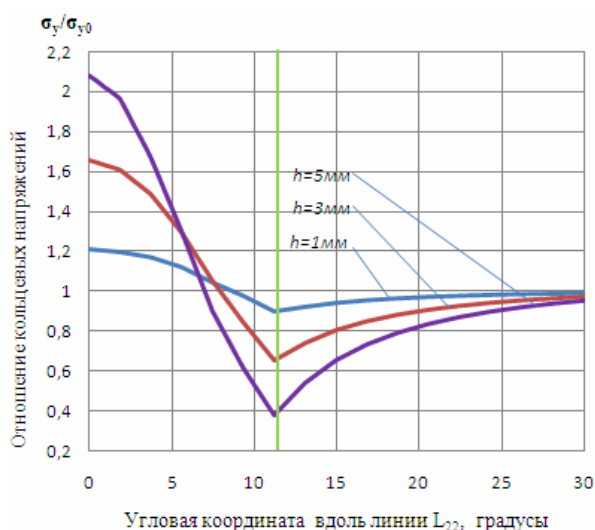


Рис. 7. График изменения относительных кольцевых напряжений на внутренней поверхности трубы для эллиптического пятна

Для получения рекомендаций, которые можно будет использовать при подготовке заключения о степени годности трубопровода к эксплуатации при наличии коррозионных дефектов, необходимы дальнейшие исследования. Необходимо анализ влияния группы коррозионных дефектов, расположенных произвольным образом по образующей и по направляющей, на напряжённо-деформированное состояние стенки трубы. Это позволит установить условие автономности или взаимного влияния коррозионных дефектов на степень концентрации напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шарыгин, А.М. Численный анализ влияния коррозионных дефектов на прочность трубопроводов / А.М. Шарыгин, В.И. Шарыгин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1999. № 4. С. 55-58.
2. Методические рекомендации по количественной оценке состояния магистральных газопроводов с коррозионными дефектами, их ранжирования по степени опасности и определению остаточного ресурса. М.: ОАО «Газпром», ПО «Спецнефтегаз», НРЦ Газпром. ВРД 39 – 1.10.004 – 99, 2000. 45 с.
3. Гафаров, Н.А. Оценка остаточной работоспособности поврежденных коррозией трубопроводов с помощью «критерия В31G» / Н.А. Гафаров, А.В. Митрофанов, С.Б. Киченко // Безопасность труда в промышленности. 2000. №3. С. 47-50.
4. Исследование работоспособности трубопроводных систем при действии различных эксплуатационных факторов: отчёт о НИР (заключ.): 032х-007/ СГАУ; рук. Ю.Л.Тарасов; исп. Ю.Л.Тарасов, О.В. Хвезюк и др..-Самара, 2010. С. 6-105.

STRESS DISTRIBUTION IN THE PIPE-LINE WALLS UNDER CONDITIONS OF CORROSION DAMAGE

© 2011 Yu.L. Tarasov, O.V. Hvesyuk
Samara State Aerospace University

In article results of researches devoted to quantitative estimation of corrosion defects influence on intense-deformed condition of pipeline walls are considered.

Key words: pipeline, corrosion, stress, pressure

Yuriy Tarasov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Flying Devices Durability. E-mail: proch@ssau.ru
Oleg Hvesyuk, Chief of the Laboratory at the Department of Flying Devices Durability