

УДК 620.187:577.322:539.25
DOI: 10.25206/1813-8225-2019-165-5-10

К. А. ВАНСОВИЧ¹
И. П. АИСТОВ¹
А. А. НАХЛЕСТКИН²
Д. С. БЕСЕЛИЯ²

¹Омский государственный
технический университет,
г. Омск

²АО «Транснефть—Западная Сибирь»,
г. Омск

АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТОВ КОРРОЗИОННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Представлена математическая модель, позволяющая моделировать усталостные дефекты коррозионного происхождения на магистральных трубопроводах. Предложен метод оценки трещиностойкости стенки магистрального трубопровода с коррозионным дефектом. Моделирование трещины выполнено с помощью метода конечных элементов в рамках упругой механики разрушения и реализовано в программе ANSYS Workbench.

Ключевые слова: коррозионный дефект, поверхностная трещина, метод конечных элементов, кольцевые напряжения.

Введение. Для обеспечения безостановочной работы магистральных трубопроводов необходимо эффективно оценивать остаточный ресурс трубопроводов. В реальных условиях эксплуатации на магистральных трубопроводах наблюдаются дефекты как эксплуатационного (дефекты, возникающие в процессе ремонтно-восстановительных работ, например, задиры, риски и т.д.), так и усталостного характера (дефекты, возникающие под действием циклических нагрузок).

В процессе эксплуатации трубопроводных систем происходят структурные изменения трубных сталей [1]. Это обусловлено тем, что металл труб находится под нагрузкой: статической и циклической. Под воздействием циклических нагрузок происходит деформационное старение трубных сталей, приводящее к снижению их сопротивляемости и хрупкому разрушению.

Наличие в стенке трубопровода концентраторов напряжений, которые в процессе эксплуатации превращаются в усталостные трещины, в процессе эксплуатации требует оценки безопасной работы под действием переменных нагрузок [2].

Как показывает анализ эксплуатации магистральных трубопроводов (МТ) [3], дефекты коррозионного происхождения представляют значительную опасность для целостности стенки трубопроводов и занимают около 30 % от общего количества дефектов (рис. 1).

Постановка задачи. Принято, что:

1. Коррозионный дефект считается потерей металла, остаточное давление разрушения определяется на основе анализа предельного состояния.

2. Коррозионный дефект можно смоделировать как трещиноподобный дефект, а силу, про-

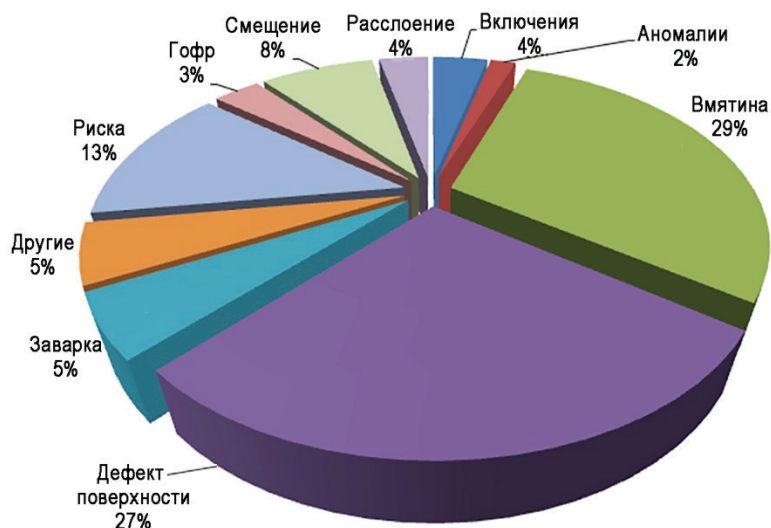


Рис. 1. Усталостные дефекты на магистральных трубопроводах



Рис. 2. Трещиноподобные дефекты МТ коррозионного происхождения

двигающую трещину, рассчитать средствами механики упругопластического разрушения [4].

В данной работе предлагается метод оценки развития поверхностных трещин и оценки остаточного ресурса магистрального трубопровода при циклических нагрузках с учётом двухосного напряженного состояния в стенке трубопровода.

Объектом исследования является магистральный трубопровод с трещиноподобным дефектом коррозионного происхождения. Модель дефекта была создана на основе реального эксплуатационного заключения: коррозионный дефект — это, прежде всего, потеря металла трубы [5]. На рис. 2 представлен реальный трещиноподобный дефект магистрального трубопровода.

Метод исследования. Наиболее опасными являются продольные дефекты, которые обнаруживаются, как правило, методами неразрушающего контроля в процессе внутритрубной диагностики с помощью специального снаряда [5].

После получения результатов внутритрубной диагностики, а именно положения дефекта в теле трубы и его геометрических характеристик, составляется расчетная схема, на которой трещиноподобные дефекты представляются в виде полуэллиптической трещины (рис. 3).

Кольцевые напряжения $\sigma_{кц}$ зависят от величины рабочего давления в трубопроводе, поэтому они всегда растягивающие, т.е. положительные [6]:

$$\sigma_{кц} = \frac{P \cdot D_{вн}}{2\delta},$$

где P — давление в трубопроводе, Па; $D_{вн}$ — внутренний диаметр трубы, м; δ — толщина стенки трубы, м.

Продольные напряжения $\sigma_{пр}$ в зависимости от температурного перепада или направления изгиба могут быть как растягивающими, так

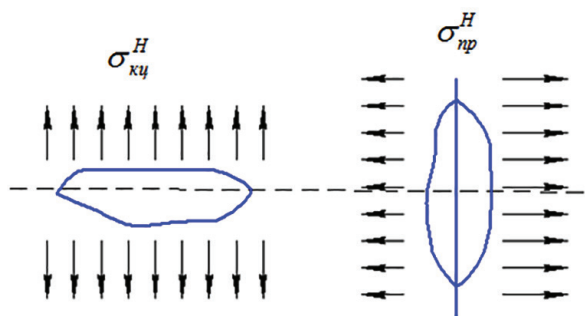


Рис. 3. Напряженное состояние трубопровода

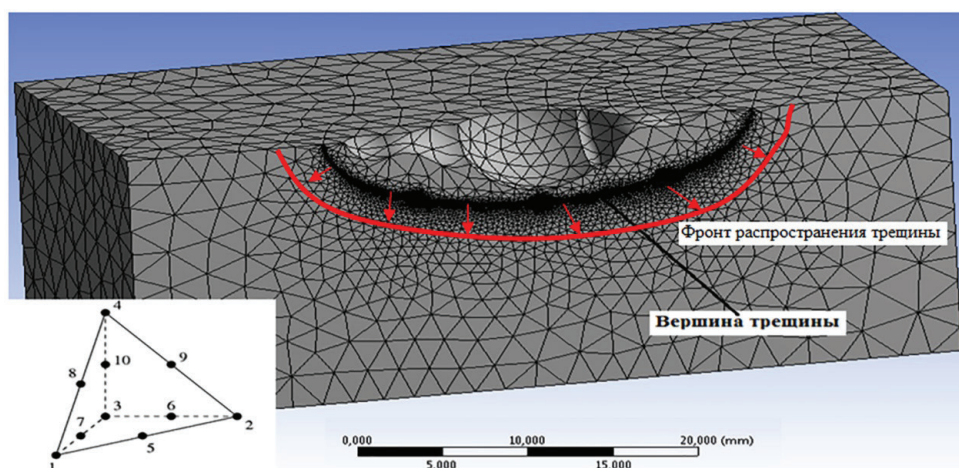


Рис. 4. Конечноэлементная модель дефекта на участке трубы

Таблица 1

Определение напряжений при циклических нагрузках

	σ_x , МПа	σ_y , МПа	σ_z , МПа
Нагрузка	200	542	359
Разгрузка	7	-31	-68
$\Delta\sigma$, МПа	193	573	427

и сжимающими, т.е. отрицательными. Для заземленного с двух концов элемента трубопровода продольные напряжения определяются следующим образом [6]:

$$\sigma_{np} = -\alpha \cdot \Delta t \cdot E + \mu \cdot \sigma_{\kappa\zeta} \pm \frac{E \cdot D_n}{2\rho_{yu}},$$

где α — температурный коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C}$; Δt — температурный перепад, $^\circ\text{C}$; μ — коэффициент Пуассона; D_n — наружный диаметр трубы, м; ρ_{yu} — радиус упругого изгиба оси трубопровода, м; E — модуль упругости, Па.

Развитие усталостных дефектов происходит, в первую очередь, за счет воздействия кольцевых напряжений, которые являются наибольшими по величине и по направлению перпендикулярно плоскости роста этих трещин.

Оценка несущей способности трубопровода проводится созданием математической модели коррозионного дефекта с разбиением на конечные элементы с помощью программы ANSYS Workbench [7].

Для создания модели дефекта использовался графический редактор ANSYS-DesignModeler. На рис. 4 представлена конечноэлементная модель участка трубы с коррозионным дефектом. Модель участка трубы с коррозионным дефектом разбивается на конечные элементы в виде десяти узловых тетраэдрических конечных элементов размером 0,1 мм командой Mesh. Для более точного решения поставленной задачи была уменьшена сетка конечных элементов в вершине трещины до величины 0,01 мм.

Результаты численных экспериментов. Для нагружения расчетной модели моделировались реальные эксплуатационные нагрузки, которые испытывает трубопровод в процессе эксплуата-

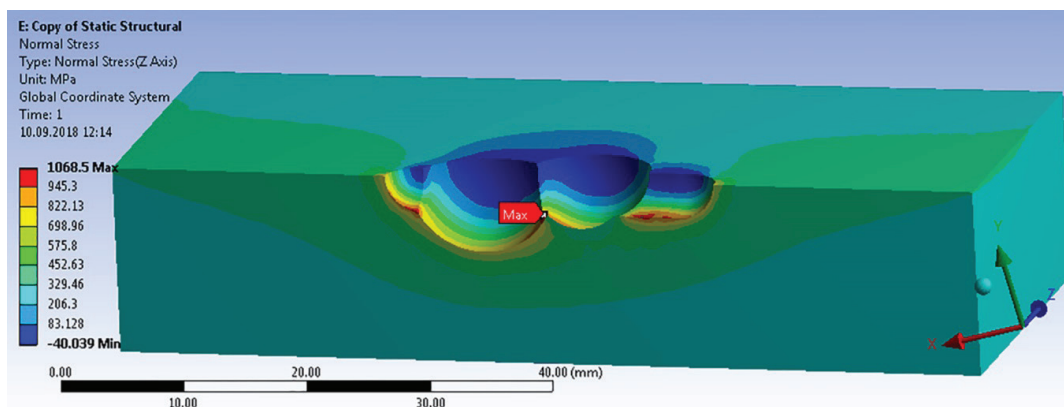


Рис. 5. Выбор плоскости предполагаемого распространения трещины

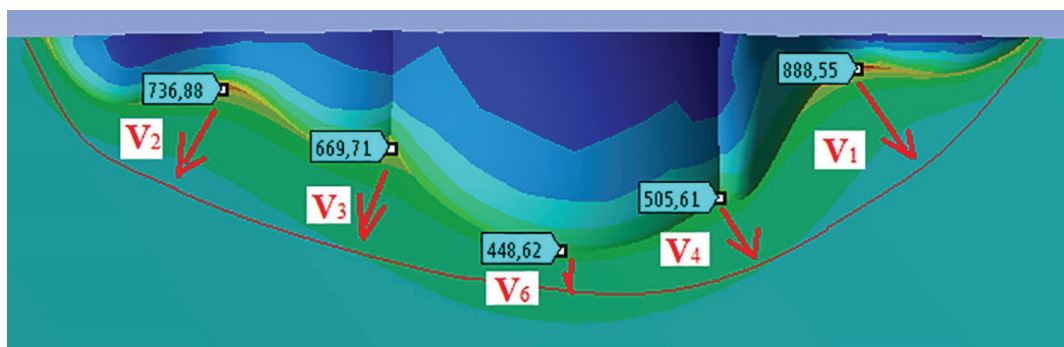


Рис. 6. Форма распространения трещины

ции. Наиболее вероятным является зарождение поверхностной трещины в точке контура коррозионного дефекта с максимальными кольцевыми напряжениями [8]. В связи с этим в дальнейшем рассматривается модель трещины нормального раскрытия, распространяющаяся в плоскости перпендикулярной кольцевым напряжениям, т.е. в осевой плоскости трубы. Результаты расчета кольцевых напряжений представлены в табл. 1.

Опыт наблюдения за ростом поверхностных трещин показывает, что они стремятся принять полуэллиптическую форму, что значительно упрощает моделирование (рис. 5).

Обсуждение. Напряженное состояние в вершине трещины имеет сложный вид и изменяется за один цикл нагружения, т.е. от максимального растягивающего напряжения до максимального сжимающего напряжения. Предложено определение скорости роста усталостной трещины по формуле:

$$\frac{da}{dN} = a(\Delta K_{\sigma_0})^b, \quad (1)$$

где ΔK_{σ_0} — коэффициент изменения средних напряжений за цикл нагружения; a , b — коэффициенты, определяемые после проведения эксперимента.

Для получения коэффициентов a и b для стали 09Г2С необходимо проведение экспериментальных исследований, поскольку объектом исследования является магистральный трубопровод. В частности, в работе [9] для стали 20 приведены следующие значения: $a = 3,25 \cdot 10^{-11}$ и $b = 3,0$.

Данная формула отличается тем, что она учитывает упругопластические деформации и остаточные напряжения, развивающиеся в вершине трещины.

Скорость роста усталостной трещины зависит от разности максимальных и минимальных средних напряжений $\Delta \sigma_0$, вычисленных за один цикл нагружения.

После определения главных напряжений (рис. 6) можно сделать заключение: наибольшие величины главных напряжений находятся в точках, которые расположены в области «отставания» от распространения фронта трещины, что в процессе роста приближает их к полуэллиптической форме.

На рис. 7 показано как изменяется расчетная зона пластических деформаций в вершине трещины за один цикл нагружения трубопровода. На стадии сжатия (рис. 7б) форма зоны пластических деформаций определяется остаточными деформациями, полученными на стадии растяжения (рис. 7а) при раскрытии трещины [3].

Мерой хрупкого разрушения в вершине трещины принято считать среднее напряжение [4]:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}.$$

Рис. 8 иллюстрирует напряжения в точке, находящейся на расстоянии 0,1 мм впереди фронта трещины, для случая максимальных растягивающих и сжимающих напряжений.

За один цикл нагружения мерой хрупкого разрушения принято считать разность средних

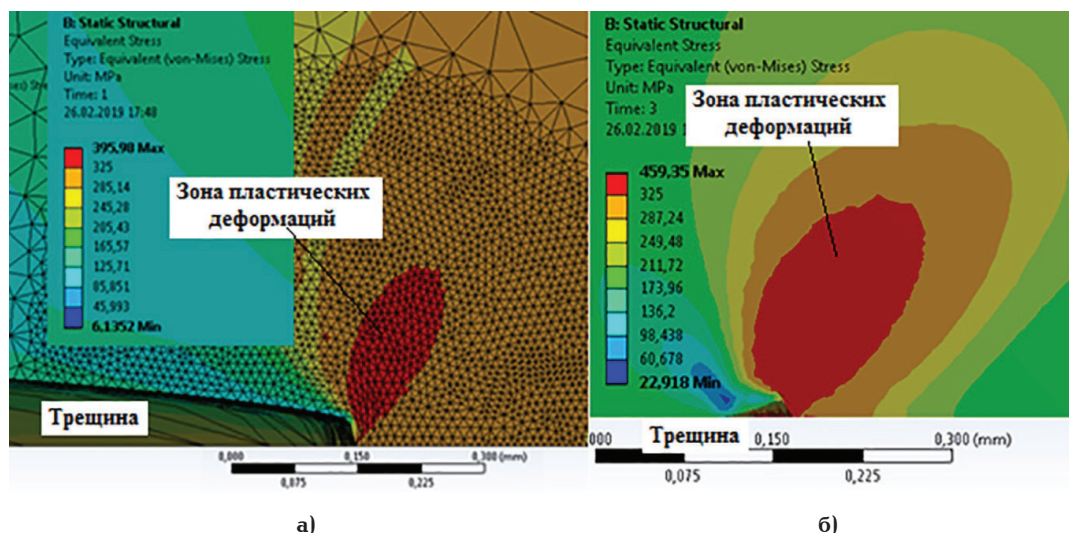


Рис. 7. Изменение зоны пластических деформаций в вершине трещины за цикл нагружения: а) растяжение; б) сжатие

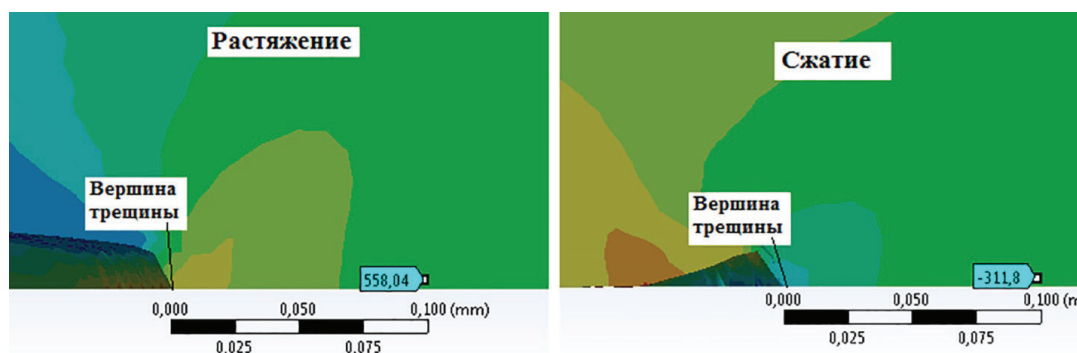


Рис. 8. Напряжения в вершине трещины

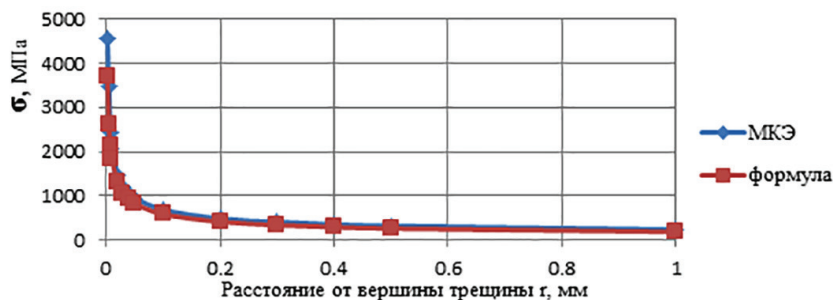


Рис. 9. Распределение упругих напряжений в вершине трещины

напряжений при растяжении и сжатии металла впереди фронта усталостной трещины [10]:

$$\Delta\sigma_0 = \sigma_0^{(+)} - \sigma_0^{(-)}.$$

Коэффициент изменения средних напряжений за цикл нагружения вычисляется по следующей формуле [4]:

$$\Delta K_{\sigma_0} = \Delta\sigma_0 \sqrt{2\pi r},$$

где r — расстояние от вершины трещины до точки, в которой вычисляется величина $\Delta\sigma_0$.

Обсуждение результатов. Для оценки остаточного ресурса трубопроводов, в стенке трубы которых имеется трещина, используется фор-

мула для скорости роста трещины (1), которая описывает подрастание фронта трещины за один цикл нагружения [2]. Если в уравнении (1) разделить переменные, то можно составить интегральное выражение:

$$\int_0^{N_{кр}} dN = \int_{a_0}^{a_{кр}} \frac{1}{a(\Delta K_{\sigma_0})^b} da, \quad (2)$$

где a_0 — размер трещины, зарегистрированный в момент её обнаружения; $a_{кр}$ — критический размер трещины; $N_{кр}$ — число циклов нагружения от момента обнаружения трещины до её критического размера.

Интегрирование уравнения (2) можно выполнить численным методом. Начальные размеры и форма трещины должны быть зарегистрированы с требуемой точностью физическими методами неразрушающего контроля.

Критический размер трещины может соответствовать прорастанию трещины на определенную глубину, установленную нормативными документами. С точки зрения расчета трубопровода по предельному состоянию необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$K_I \leq K_{IC},$$

где K_I — коэффициент интенсивности напряжений, определенный для тела с трещиной без учета пластических деформаций; K_{IC} — вязкость разрушения металла — механическая характеристика, определяемая по стандартной методике.

Для численного определения коэффициента интенсивности напряжений K_I строится диаграмма распределения нормальных напряжений в вершине трещины в упругой постановке задачи (рис. 9).

Для вычисления коэффициента интенсивности напряжений K_I используется следующая формула [5]:

$$K_I = \sigma^* \sqrt{2\pi r^*},$$

где σ^* — напряжения в вершине трещины, определенные для точки, находящейся на расстоянии r^* от вершины.

Выводы и заключение. В данной работе выполнено исследование опасности дефектов коррозионного происхождения магистральных трубопроводов.

Была разработана математическая модель усталостного дефекта трубопровода, позволяющая производить оценку роста выявленных дефектов, оценивать срок безопасной эксплуатации, вводить ограничения по эксплуатируемым нагрузкам данного участка трубопровода.

Библиографический список

1. Фокин М. Ф. Оценка прочности труб магистральных трубопроводов с дефектами стенки, ориентированными по окружности трубы, по критерию возникновения течи перед разрушением / под ред. В. И. Ерофеева, С. И. Смирнова, Г. К. Сорокина // Прикладная механика и технологии машиностроения: сб. науч. тр. Н. Новгород: Интелсервис, 2005. С. 69–76.
2. Вансович К. А., Аистов И. П., Беселия Д. С. Метод оценки остаточного ресурса магистрального нефтепровода при наличии поверхностной трещины в условиях эксплуатационных нагрузок // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 5 (77). С. 1–7.
3. Остсёмин А. А., Заварухин В. Ю. Прочность нефтепровода с поверхностными дефектами // Проблемы прочности. 1993. № 12. С. 1–59.
4. Плювинаж Г., Буледруа О., Хадж-Мелиани М. Оценка опасности коррозионных дефектов при помощи

диаграммы оценки областей разрушения // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. № 4. С. 384–396.

5. Нефтепроводы и нефтепродуктопроводы магистральные. Определение прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами: РД-23.040.00-KTH-115-11: утв.10.07.2011: введ. в действие с 10.08.2011. М.: ОАО АКТранснефть, 2011. 143 с.

6. Сиратори Т., Миёси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения / пер. с япон. С. Л. Масленникова; под ред. Е. М. Морозова. М.: Мир, 1986. 334 с.

7. ANSYS Workbench Users's Guide. ANSYS, Inc. Release 12.1. Southpointe November Technology Drive ANSYS, Inc. Canonsburg, PA certified to ISO 9001. URL: <https://docplayer.net/15245280-Ansys-workbench-user-s-guide.html> (дата обращения: 11.03.2019).

8. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. М.: Госстрой, 2013. 93 с.

9. Vansovich K. A., Yadrov V. I., Beseliya D. S. The Effect of Stress State Characteristics on the Surface Fatigue Cracks Growth Rate Taking into Account Plastic Deformations // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 244–253.

10. Terfas O., Alaktiwi A. Ductile Crack Grows in Surface Cracked Pressure Vessels // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. 2013. Vol. 7, no. 1. P. 46–52.

ВАНСОВИЧ Константин Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

Адрес для переписки: vansovichka@mail.ru

АИСТОВ Игорь Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная экология и безопасность» ОмГТУ.

SPIN-код: 9150-8613

ORCID: 0000-0003-4069-0811

ResearcherID: B-7033-2019

Адрес для переписки: aistov_i@mail.ru

НАХЛЕСТКИН Александр Александрович, инженер-технолог отдела главного технолога АО «Транснефть – Западная Сибирь», г. Омск. SPIN-код: 5567-4981

Адрес для переписки: nakhlestkin95@mail.ru

БЕСЕЛИЯ Давид Симонович, заместитель начальника отдела главного технолога АО «Транснефть – Западная Сибирь», г. Омск.

SPIN-код: 1506-9725

Для цитирования

Вансович К. А., Аистов И. П., Нахлесткин А. А., Беселия Д. С. Анализ несущей способности магистрального трубопровода при наличии дефектов коррозионного происхождения // Омский научный вестник. 2019. № 3 (165). С. 5–10. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-165-5-10.

Статья поступила в редакцию 19.04.2019 г.

© К. А. Вансович, И. П. Аистов, А. А. Нахлесткин, Д. С. Беселия