

## ОЦЕНКА РАЗВИТИЯ РОСТА ТРЕЩИН В МАГИСТРАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДЕ НА ОСНОВЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Предложен метод прогнозирования роста поверхностных трещин в стенке магистрального трубопровода под действием эксплуатационных нагрузок. Описана упругопластическая модель роста поверхностных трещин при двухосном нагружении на примере стали 20. В программе ANSYS разработан алгоритм моделирования роста трещин с учетом остаточных напряжений. Определены формы и величины раскрытия трещин при изменяющихся циклах нагружения трубопровода. Установлена зависимость скорости роста трещин при изменяющихся нагрузках от напряженного состояния впереди вершины трещины. Исследовано влияние циклов перегрузки на рост трещин. Описана методика предсказания развития трещин по данным внутритрубной диагностики и мониторинга нагружения трубопровода.

**Ключевые слова:** поверхностная трещина, магистральный трубопровод, метод конечных элементов, скорость роста трещины, циклы перегрузки, коэффициент изменения средних напряжений, прогнозирование роста трещин.

**Введение.** Важнейшим фактором поддержания работоспособности и надежности магистрального трубопровода является оценка возможности возникновения аварийной ситуации или отказа, вызванного усталостным разрушением от изменяющихся циклов давления. Степень подверженности трубопровода усталостному разрушению зависит от механических характеристик стали, технологии изготовления трубы, истории нагружения и величины внутреннего давления. Для оценки восприимчивости трубопровода усталостному разрушению выбирается методология идентификации трещин, такая как гидростатическое испытание или линейная внутритрубная диагностика физическими методами неразрушающего контроля. Выбранная методология оперативного мониторинга магистрального трубопровода должна подтверждать, что трубопровод работает в безопасном режиме. Обычно это достигается путем оценки роста усталостных трещин, а затем повторной проверки трубопровода в течение периода времени, выбранного для минимизации аварийного риска от роста усталостных трещин, а также для минимизации расходов на диагностику [1].

Для того чтобы избежать аварий на магистральном трубопроводе, необходимо точнее прогнозировать рост обнаруженных трещин и, соответственно, устанавливать остаточный ресурс трубопровода. Правильно спрогнозированный рост трещин после

очередной внутритрубной диагностики позволяет оптимизировать технологический режим перекачки и уменьшить затраты на текущий и капитальный ремонт трубопроводов [2].

Трещины нормального отрыва возникают и растут в плоскости, перпендикулярной наибольшим главным напряжениям. В стенке трубопровода такими являются кольцевые напряжения, возникающие от внутреннего давления в процессе перекачки по нему нефти или газа. Результаты внутритрубной диагностики и анализ аварийных ситуаций подтверждают, что наиболее опасными являются продольные трещины, развивающиеся в осевой плоскости трубы. Полагается, что разрушение трубопровода происходит в случае сквозного прорастания поверхностной трещины через толщину стенки трубы [3].

В процессе перекачки нефти по магистральному нефтепроводу инженерные службы, отвечающие за безотказную работу, для оценки опасности дефектов различного происхождения в стенке трубы используют формулы роста трещин за цикл нагружения, как правило, созданные на теоретической базе механики разрушения. При этом формулы скорости роста трещин отражают модели их роста, которые учитывают механические характеристики материала стенки трубы, вид нагружения, двухосность напряжений и переменную цикличность давления в процессе эксплуатации [4].

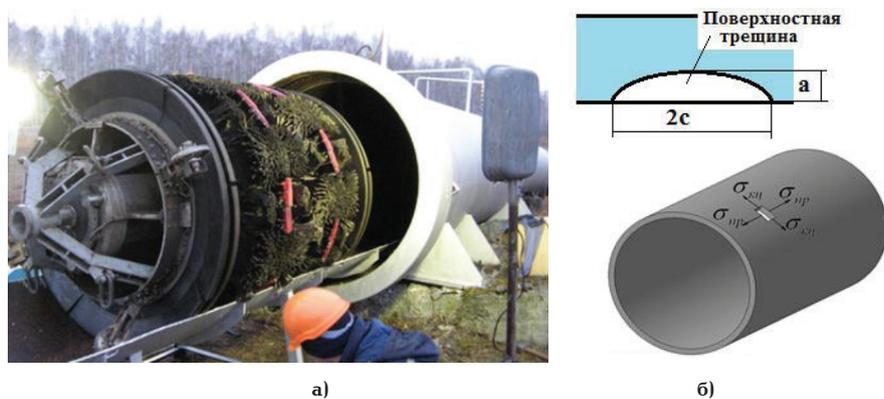


Рис. 1. Магистральный трубопровод: а) снаряд для внутритрубной диагностики; б) напряженное состояние трубопровода

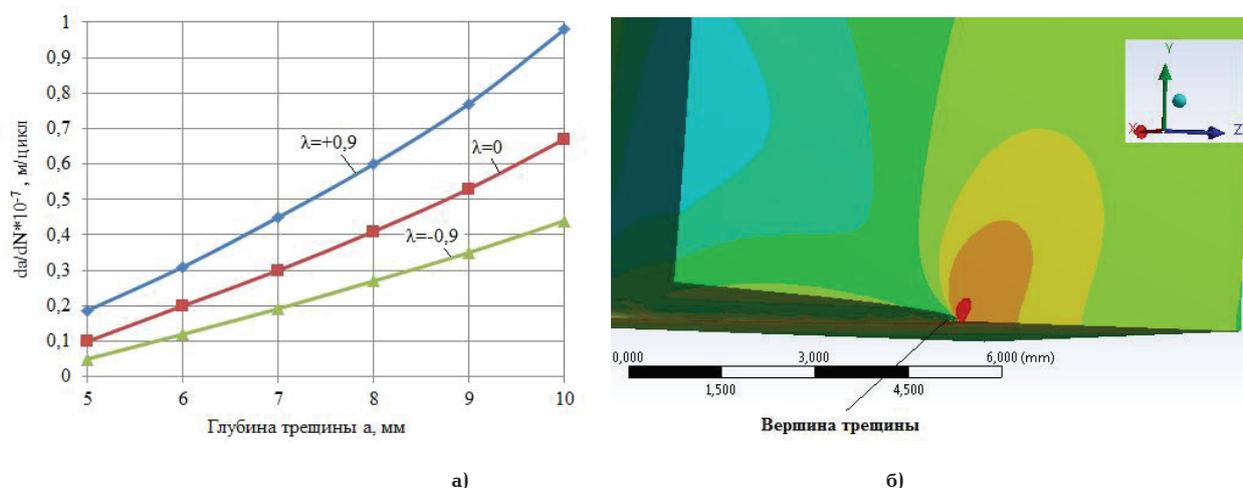


Рис. 2. Результаты испытаний стали 20: а) диаграммы скорости роста для различных видов нагружения; б) модель поверхностной трещины

В настоящее время для расчета остаточного ресурса трубопроводов используются компьютерные программы, которые позволяют в интерактивном режиме оценивать подрастание наиболее опасных трещин, обнаруженных при проведении диагностики неразрушающими методами контроля [5].

**Постановка задачи.** Актуальными являются исследования роста усталостных трещин с позиций механики разрушения, учитывающие эффекты, связанные с развитием пластической деформации при увеличении размеров трещины за каждый цикл нагружения. К таким эффектам, в первую очередь, относятся остаточные напряжения, закрытие трещины, торможение скорости роста, взаимодействие изменяемых циклов нагружения [6, 7]. В экспериментальных исследованиях [8, 9] изучено взаимодействие постоянных и изменяющихся циклов нагружения на скорость роста усталостных трещин в стальных и никелевых образцах. В этих исследованиях изучалось явление закрытия трещин и было установлено, что упругая механика разрушения не позволяет моделировать эффекты, сопровождающиеся большими пластическими деформациями в вершине трещины.

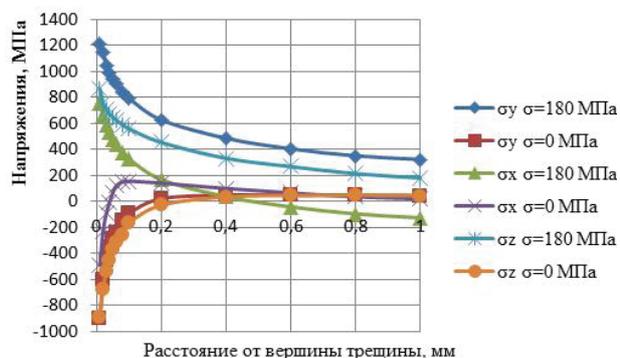
В предлагаемом исследовании описан метод прогнозирования роста поверхностных трещин в стенке стального магистрального трубопровода при постоянных и переменных циклах нагружения с учётом двухосного напряженного состояния.

**Метод исследования.** Для магистральных трубопроводов самыми опасными дефектами стенки трубы являются продольные трещины, которые регистрируются диагностическими снарядами, двигающимися вместе с транспортируемым продуктом (рис. 1а). В ходе диагностики устанавливается точное место положения дефекта, его размеры и форма, после чего составляется расчетная схема, на которой обнаруженные дефекты чаще всего моделируются в виде полуэллиптической трещины [10].

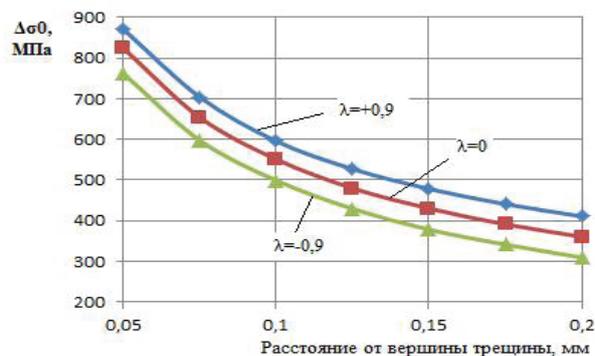
При транспортировке по магистральному трубопроводу продукта под давлением в его стенке возникает двухосное напряженное состояние (рис. 1б). В продольных осевых сечениях трубы возникают кольцевые напряжения  $\sigma_{\varphi\varphi}$ , которые являются максимальными и зависят от диаметра трубы, толщины стенки и величины рабочего давления в трубопроводе, поэтому они всегда растягивающие, т.е. положительные. Трещины нормального отрыва чаще всего зарождаются на поверхности трубы и развиваются в плоскости, перпендикулярной кольцевым напряжениям.

Продольные напряжения  $\sigma_{zz}$  возникают в поперечных сечениях трубопровода. Они меняются при изменении температуры в трубе, а также в зависимости от направления изгиба могут быть как растягивающими, так и сжимающими [2].

**Результаты экспериментов.** В статьях [9, 10] исследована зависимость скорости роста усталостных



а)



б)

Рис. 3. Определение нормальных напряжений в вершине трещины для стали 20:  
а) напряжения при нагрузке и разгрузке; б) разность средних напряжений за цикл

трещин от вида напряженного состояния впереди фронта усталостной трещины, полученная при сравнении экспериментальных данных и данных вычислений, сделанных методом конечных элементов в упругопластической постановке задачи. Установлено, что скорость роста усталостных трещин зависит от размеров, формы и величины пластических деформаций в вершине трещины. В работе [9] описан подход к вычислению скорости роста усталостных трещин, учитывающий как стадию нагрузки объекта с поверхностной трещиной, так и стадию его разгрузки. Получена формула скорости роста усталостных трещин в зависимости от величины средних напряжений в зоне охрупчивания у вершины трещины.

В данной работе исследования проводились для модели трубопровода из стали 20. Была проведена серия испытаний, в которых для различных видов двухосного нагружения экспериментально определена скорость роста поверхностных трещин (рис. 2).

Как следует из рис. 2а, наибольшая скорость роста усталостной трещины зарегистрирована для более хрупкого состояния стали при двухосном растяжении (степень двухосности нагружения  $\lambda = +0,9$ ), а наименьшая при более пластичном состоянии при двухосном растяжении-сжатии (степень двухосности нагружения  $\lambda = -0,9$ ).

**Обсуждение.** Поверхностные трещины моделировались методом конечных элементов в программе ANSYS Workbench (рис. 2б).

В упругопластической постановке задачи определялись напряжения в вершине трещины за цикл нагружения модели и разгрузки до нуля. Для всех видов нагружения было установлено, что при нагрузке модели с трещиной до максимального раскрытия трещины в её вершине впереди фронта трещины все напряжения имеют высокие положительные значения, т.е. металл находится в состоянии трехосного растяжения. При разгрузке до нуля все напряжения в вершине трещины меняют знак на противоположный и имеют высокие отрицательные значения, т.е. металл переходит в состояние трехосного сжатия (рис. 3а). Такие эффекты объясняются развитием пластических деформаций в вершине трещины в направлении, нормальном к плоскости роста трещины при нагружении и возникновении остаточных деформаций при разгрузке тела с трещиной.

Для усталостных трещин нормального отрыва полагается, что их скорость роста при различных

видах нагружения зависит от величины средних напряжений, развивающихся впереди фронта трещины

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}. \quad (1)$$

Сумма нормальных напряжений является инвариантом напряженного состояния в рассматриваемой точке и, соответственно, может быть записана в главных напряжениях, а плоскость роста трещины будет ориентироваться нормально к наибольшему главному напряжению  $\sigma_1$ .

При сравнении скорости роста трещины при различных видах нагружения, определенной экспериментально, с величиной нормальных напряжений впереди фронта трещины, вычисленных методом конечных элементов (рис. 3а), установлена её зависимость от разности средних напряжений за цикл нагружения от максимальной нагрузки  $\sigma_0^{(+)}$  до максимальной разгрузки  $\sigma_0^{(-)}$

$$\Delta\sigma_0 = \sigma_0^{(+)} - \sigma_0^{(-)}. \quad (2)$$

На рис. 3а показано распределение разности средних напряжений в вершине трещины для максимальной нагрузки и разгрузки до нуля. По аналогии с коэффициентом интенсивности напряжений интенсивность средних напряжений можно описать с помощью коэффициента изменения средних напряжений за цикл нагружения  $\Delta K_{\sigma_0}$

$$\Delta K_{\sigma_0} = \Delta\sigma_0 \sqrt{2\pi r}, \quad (3)$$

где  $r$  — расстояние от вершины трещины до точки, в которой вычислена разность средних напряжений  $\Delta\sigma_0$  (рис. 3б).

Формула скорости роста усталостных трещин для упругопластической модели в общем виде примет следующий вид

$$\frac{da}{dN} = C_1 (\Delta K_{\sigma_0})^{n_1}, \quad (4)$$

где  $C_1$  и  $n_1$  — характеристики материала;  $a$  — размер трещины;  $N$  — число циклов нагружения.

Постоянные материала  $C_1$  и  $n_1$  отличаются от характеристик  $C$  и  $n$  в формуле Пэриса, которая наиболее часто используется для практических расчетов, однако они могут быть определены по данным любых усталостных испытаний, для которых

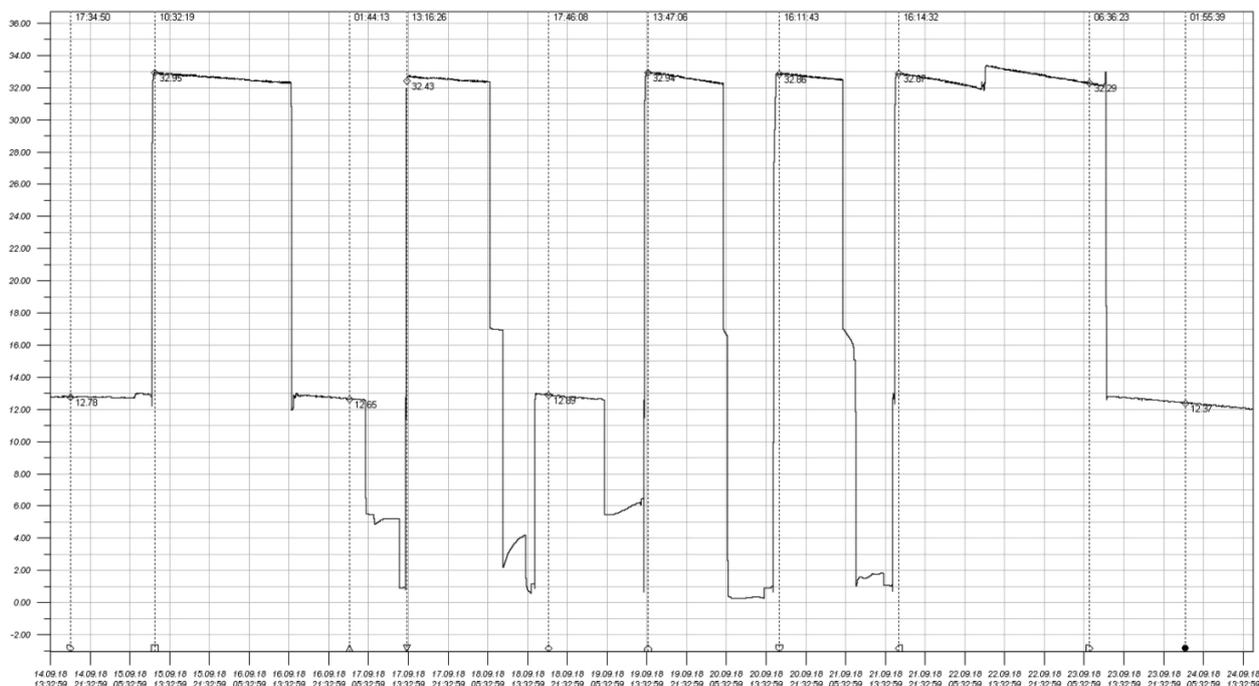


Рис. 4. Графическое представление изменения давления на линейном участке магистрального нефтепровода за 10 дней

можно построить кинетическую диаграмму и получить упругопластическую модель трещины в нагруженном теле или образце.

В предлагаемом исследовании по данным, описанным выше экспериментов была получена формула скорости роста усталостных трещин в стали 20

$$\frac{da}{dN} = 3,25 \cdot 10^{-11} (\Delta K_{c0})^{3,0} \quad (5)$$

С помощью полученной формулы можно вычислить остаточный ресурс трубопровода с трещиной при стабильных циклах нагружения

$$N_{op} = \int_{a_{per}}^{a_{kp}} \frac{1}{3,25 \cdot 10^{-11} (\Delta K_{c0})^{3,0}} da, \quad (6)$$

где  $N_{op}$  — остаточный ресурс или число циклов до критического размера трещины;  $a_{per}$  — размер трещины в момент её регистрации;  $a_{kp}$  — критический размер трещины.

Для магистрального трубопровода критический размер трещины может быть определен при её сквозном прорастании через толщину стенки или задан нормативными документами.

**Выводы и заключение.** На работоспособность труб в магистральных трубопроводах существенное влияние оказывают циклические нагрузки — циклы нагружения внутренним давлением (рис. 4).

Представленные на рис. 4 циклы нагружения, как правило, обусловлены различными производственными факторами: изменение технологических режимов работы при изменении суточных объемов транспортировки, технологическими переключениями при проведении ремонтных и подготовительных работ, неравномерностью заполнения резервуаров в резервуарных парках головных перекачивающих станций и так далее.

В условиях безостановочной перекачки трубопроводы работают в условиях жестких режимов.

Под жесткостью режима эксплуатации магистрального нефтепровода понимается частота из-

менения внутреннего давления в нефтепроводе в период эксплуатации. Жесткость режима эксплуатации может характеризоваться отношением числа циклов изменения внутреннего давления в рассматриваемом периоде к критическому числу циклов изменения внутреннего давления, при достижении которого может наступить разрушение трубопровода.

В связи с постоянно меняющейся конъюнктурой международного рынка углеводородного сырья и, как следствие, переориентацией грузопотоков прогнозирование периодичности колебаний внутритрубного давления является проблемной задачей, а определение скорости роста усталостных трещин в междиagnostический период на основе зарегистрированных данных об эксплуатационных нагрузках трубопровода в месте трещины — перспективным и очень важным направлением мониторинга работоспособности трубопроводных сетей.

#### 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. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-5-1759.
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. DOI: 10.28999/2541-9595-2018-8-4-384-396.

5. Нефтепроводы и нефтепродуктопроводы магистральные. Определение прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами: РД-23.040.00-КТН-115-11: утв.10.07.2011: ввод в действие с 10.08.2011. М.: ОА ОАК Транснефть, 2011. 143 с.

6. Сиратори Т., Миёси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения. М.: Мир, 1986. 334 с.

7. Матвиенко Ю. Г. Тенденции нелинейной механики разрушения в проблемах машиностроения. Ижевск: Изд-во ин-та компьютерных исследований, 2015. 56 с. ISBN 978-5-4344-0271-2.

8. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Введ. 2013–07–01. 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. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.329.

10. Terfas O., Alaktwi 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. Оценка развития роста трещин в магистральном трубопроводе на основе упругопластической модели // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 10–14. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-10-14.

Статья поступила в редакцию 04.10.2019 г.

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