

## Метод оценки остаточного ресурса магистрального нефтепровода при наличии поверхностной трещины в условиях эксплуатационных нагрузок

© К.А. Вансович<sup>1</sup>, И.П. Аистов<sup>1</sup>, Д.С. Беселия<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОмГТУ, Омск, 644050, Россия

<sup>2</sup>АО «Транснефть — Западная Сибирь», Омск, 644033, Россия

*Предложен метод определения скорости роста поверхностных трещин в стенке магистрального трубопровода под действием переменного двухосного циклического нагружения. Выполнен анализ трехмерного упругопластического напряженного состояния в вершине поверхностных трещин на примере стали марки 40Х при различных видах двухосного нагружения. Приведены результаты усталостных испытаний крестообразных образцов с поверхностной трещиной при двухосном нагружении. Исследовано изменение нормальных напряжений впереди фронта трещины при нагружении образцов до максимальной нагрузки и последующей их разгрузки до нуля. Установлена зависимость вида нагружения образцов с раскрытием трещины. Предложена характеристика напряженного состояния в вершине трещины, коррелирующая со скоростью роста трещины при различных видах нагружения. Получена формула, описывающая рост усталостных трещин. На примере исследования процесса нагружения образца при наличии цикла перегрузки показано, что полученная зависимость может применяться для предсказания развития трещин и оценки остаточного ресурса при переменных эксплуатационных нагрузках.*

**Ключевые слова:** *поверхностная трещина, двухосное нагружение, метод конечных элементов, скорость роста трещины, циклические напряжения, коэффициент изменения средних напряжений за цикл нагружения, остаточный ресурс*

**Введение.** Для уменьшения числа аварий на трубопроводном транспорте важно эффективно оценивать остаточный ресурс трубопровода. Знание остаточного ресурса позволяет оптимизировать стратегию эксплуатации и уменьшить затраты на текущий и капитальный ремонт трубопроводов [1, 2]. Как показывает анализ большинства аварий в трубопроводах, наибольшую опасность вызывают продольные трещины, подрастание которых обуславливают преимущественно кольцевые напряжения от внутреннего давления.

Образование сквозной трещины в элементе трубопровода [3, 4] следует понимать как разрушение. В процессе эксплуатации магистрального нефтепровода специалисты, обеспечивающие его безотказную работу, должны использовать модели роста усталостных трещин для оценки влияния внутреннего давления и температурных деформаций на развитие дефектов в стенке трубы в целях оценки остаточного ресурса и назначения срока следующей диагностики трубопровода.

Определение чувствительности трубопровода к переменным циклам давления включает в себя информацию о материале и технологии производства трубы, историю нагружения и размаха циклов давления [5]. В современных условиях остаточный ресурс трубопроводов оценивают с помощью управляющих компьютерных программ, позволяющих в интерактивном режиме проводить расчеты остаточного ресурса трубопроводов в ходе диагностики неразрушающими методами контроля [6].

Известны результаты экспериментов и выполненного анализа влияния постоянных и изменяющихся амплитуд нагружения на скорость роста усталостных трещин в компактных образцах из никелевого сплава и коррозионностойкой стали [7, 8]. В этих работах учтен эффект закрытия трещин и сделан вывод о том, что в рамках линейной упругой механики разрушения невозможно исследовать рост трещин при больших пластических деформациях в вершине трещины.

Согласно проведенным исследованиям, можно предложить к применению методы предсказания роста трещин при изменяющихся нагрузках.

Цель настоящей работы — исследование метода прогнозирования роста поверхностных трещин и оценки остаточного ресурса магистрального трубопровода при эксплуатационных нагрузках с учетом двухосного напряженного состояния в стенке трубопровода.

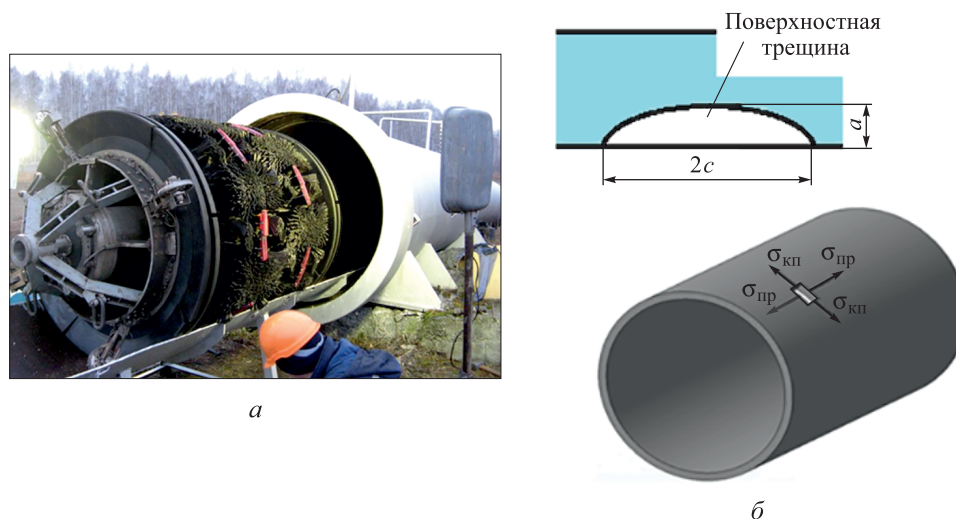
**Метод исследования и анализ результатов.** В процессе эксплуатации магистральных трубопроводов наиболее опасны продольные дефекты, которые обнаруживают с помощью методов неразрушающего контроля при внутритрубной диагностике специальным снарядом,двигающимся вместе с транспортируемым продуктом (рис. 1, а). После определения местоположения дефекта и его размеров составляют расчетную схему, на которой трещиноподобные дефекты представляют в виде полуэллиптической трещины [6, 9]. В стенке магистрального трубопровода в зоне поверхностной трещины возникает двухосное напряженное состояние (рис. 1, б).

Кольцевое напряжение  $\sigma_k$  зависит от рабочего давления в трубопроводе, поэтому оно всегда растягивающее, т. е. положительное [10]:

$$\sigma_k = \frac{pD_{\text{вн}}}{2\delta}, \quad (1)$$

где  $p$  — давление в трубопроводе;  $D_{\text{вн}}$  — внутренний диаметр трубы;  $\delta$  — толщина стенки трубы.

Продольные поверхностные трещины развиваются прежде всего в результате воздействия кольцевого напряжения, наибольшего по значению и по направлению перпендикулярного плоскости роста этих трещин.



**Рис. 1.** Магистральный трубопровод:

*a* — снаряд для внутритрубной диагностики; *б* — напряженное состояние трубопровода (вверху — схема трещины, внизу — общий вид)

В зависимости от температурного перепада или направления изгиба продольное напряжение  $\sigma_{пр}$  может быть как растягивающим, так и сжимающим, т. е. отрицательным. Для защемленного с двух концов элемента трубопровода продольное напряжение определяется уравнением [10]

$$\sigma_{пр} = -\alpha\Delta tE + \mu\sigma_{к} \pm \frac{ED_{н}}{2\rho_{у.и}}, \quad (2)$$

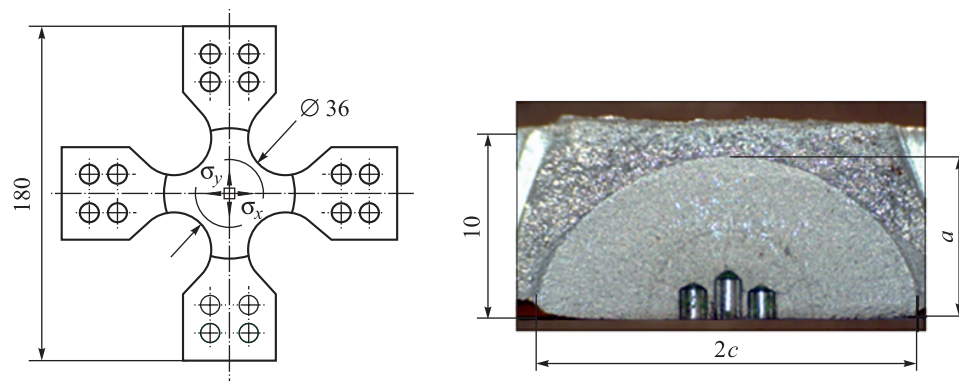
где  $\alpha$  — температурный коэффициент линейного расширения;  $\Delta t$  — перепад температуры;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $D_{н}$  — наружный диаметр трубы;  $\rho_{у.и}$  — радиус упругого изгиба оси трубопровода.

Степень двухосности напряженного состояния в стенке трубы  $\lambda = \frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{к}}$  (см. рис. 1) может быть больше или меньше нуля, в зависимости от значений продольного напряжения.

Модель роста усталостных трещин при двухосном нагружении предложена в [11], описана методика проведения испытаний на крестообразных образцах, в [12] приведены результаты испытаний для сплава АК6 и стали марки 20. Показано в [11], что рост усталостных трещин зависит от явлений охрупчивания впереди фронта трещины и от развития пластических деформаций в направлении, нормальном относительно плоскости трещины. Однако описанная модель роста

трещины не является завершенной, поскольку не учитывает деформирование металла в вершине трещины после разгрузки образца. В настоящей статье на примере исследований крестообразных образцов, выполненных из стали марки 40Х, описана модель роста усталостных поверхностных трещин за полный цикл нагружения: от максимальной нагрузки до полной разгрузки образца.

Рассмотрим геометрию крестообразного образца (рис. 2, а) и поверхность излома, полученную в процессе роста усталостной трещины (рис. 2, б).

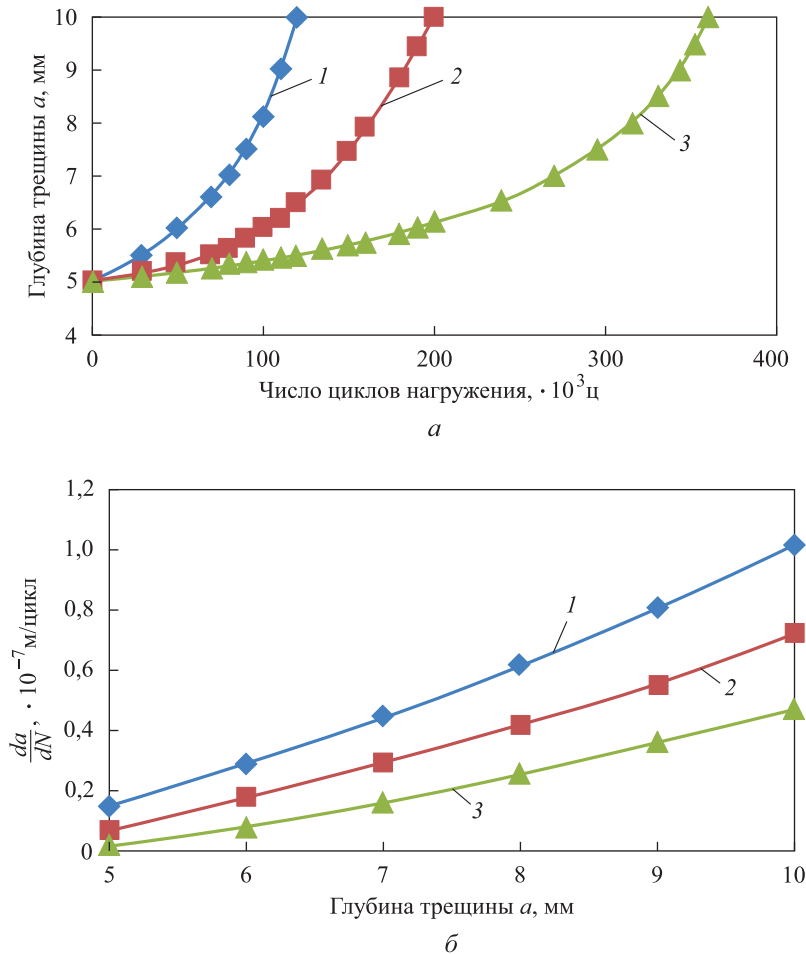


**Рис. 2.** Крестообразный образец для двухосных испытаний:  
а — геометрия образца; б — поверхность излома усталостной трещины

По результатам проведенных испытаний на крестообразных образцах из стали марки 40Х построены диаграммы роста усталостных трещин  $a - N$  (рис. 3, а) и диаграммы скорости роста трещин  $\frac{da}{dN}$  (рис. 3, б).

Анализ данных на рис. 3 показывает, что для стали марки 40Х скорость роста усталостных трещин зависит от степени двухосности нагружения  $\lambda = \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$  (см. рис. 2, а). Так, по сравнению с одноосным нагружением ( $\lambda = 0$ ) скорость роста трещины увеличивается при двухосном растяжении ( $\lambda = +0,9$ ) и уменьшается при растяжении — сжатии ( $\lambda = -0,9$ ).

В процессе исследования напряженного состояния в вершине трещины с помощью метода конечных элементов и компьютерного моделирования в программе ANSYS Workbench установлено, что при максимальной нагрузке крестообразного образца и последующей его разгрузке до нуля в вершине трещины возникает высокое сжимающее остаточное напряжение (рис. 4).



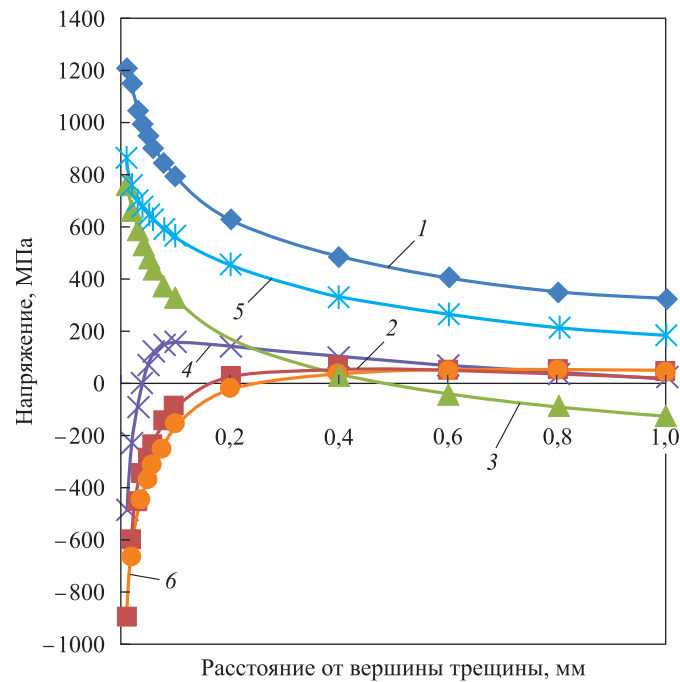
**Рис. 3.** Диаграммы скорости роста трещин (*a*) в образцах из стали 40Х и скорости роста трещин (*b*) для различных видов нагружения ( $\sigma = 180$  МПа):  
 1 —  $\lambda = 0,9$ ; 2 —  $\lambda = 0$ ; 3 —  $\lambda = -0,9$

При максимальном нагружении образца все три значения нормального напряжения в вершине трещины положительны (см. рис. 4), т. е. материал находится в состоянии трехосного растяжения. В процессе разгрузки до нуля напряжение в вершине трещины становится отрицательным и материал переходит в состояние трехосного сжатия при очень высоком значении напряжения.

Причина возникновения эффекта развития большого сжимающего напряжения в вершине трещины при разгрузке — остаточное напряжение, возникающее от воздействия упругодеформированного металла на зону, где развивались пластические деформации.

Далее при разработке модели роста поверхностных трещин при циклическом нагружении высказано предположение о том, что рост трещины характеризуется только нормальным напряжением в зоне

охрупчивания впереди фронта трещины. За один цикл нагружения интенсивность процесса разрушения определяется и максимумом растягивающего напряжения во время нагрузки, и максимумом сжимающего напряжения в период разгрузки. Мнение о влиянии сжимающего напряжения на рост трещин изложено в работах [13, 14].



**Рис. 4.** Изменение нормального напряжения в вершине трещины образца из стали 40X за цикл нагружения нагрузка — разгрузка ( $\lambda = -0,9$ ):  
 1, 3, 5 —  $\sigma = 180$  МПа ( $\sigma_y, \sigma_x, \sigma_z$ ); 2, 4, 6 —  $\sigma = 0$  МПа ( $\sigma_y, \sigma_x, \sigma_z$ )

Поскольку нормальное напряжение впереди фронта трещины имеет высокие значения по всем трем направлениям, мерой хрупкого разрушения в вершине трещины принято считать среднее напряжение

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

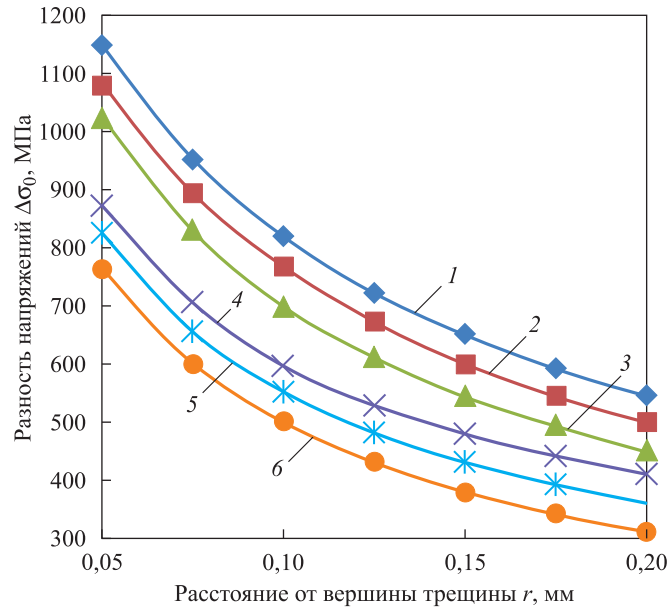
где сумма  $\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$  — первый инвариант тензора напряжений.

Мерой хрупкого разрушения за один цикл нагружения принята разность среднего напряжения при нагрузке и разгрузке:

$$\Delta\sigma_0 = \sigma_0^{(+)} - \sigma_0^{(-)}. \quad (4)$$

Результаты вычисления разности значений среднего напряжения для стали марки 40X приведены на рис. 5. Диаграмма двухосного

растяжения находится выше диаграммы одноосного растяжения, а диаграмма растяжения — сжатия находится ниже диаграммы одноосного растяжения.



**Рис. 5.** Размах средних значений напряжения  $\Delta\sigma_0$  в вершине трещины образца из стали 40X при нагрузке и разгрузке:  
 1, 3 —  $\lambda = +0,9$ ,  $a = 7$  мм; 2, 5 —  $\lambda = 0$ ; 3, 6 —  $\lambda = -0,9$ ,  $a = 5$  мм

Диаграммы плавные и возрастают в направлении к вершине трещины. В связи с этим предлагаем для описания изменения среднего напряжения в вершине трещины за один цикл нагружения ввести характеристику, аналогичную коэффициенту интенсивности напряжения  $K_I$ . Такую характеристику обозначим  $\Delta K_{\sigma_0}$  (коэффициент изменения средних напряжений за цикл нагружения) и вычислим:

$$\Delta K_{\sigma_0} = \Delta\sigma_0 \sqrt{2\pi r}, \quad (5)$$

где  $r$  — расстояние от вершины трещины до точки, в которой определена величина  $\Delta\sigma_0$  (см. рис. 5).

Коэффициент  $\Delta K_{\sigma_0}$  отражает изменение среднего напряжения в конкретной точке впереди фронта трещины, что дает возможность выполнять сравнительный анализ роста усталостных трещин при различных видах нагружения в условиях подобия механизмов разрушения.

По экспериментальным данным определения скорости роста усталостных трещин при различных видах нагружения (см. рис. 3, б)

и результатам вычисления коэффициента изменения среднего напряжения впереди фронта трещины по формуле (5) построены кинетические диаграммы в двойных логарифмических координатах  $\frac{da}{dN} = \lg \Delta K_{\sigma_0}$  (рис. 6, а). Точки на диаграмме аппроксимированы прямой линией, уравнение которой в нормальных координатах имеет вид

$$\frac{da}{dN} = C_1 \left( \Delta K_{\sigma_0} \right)^{n_1}, \quad (6)$$

где  $C_1$  и  $n_1$  — постоянные характеристики материала (их определяют по схеме, представленной на рис. 6, б).

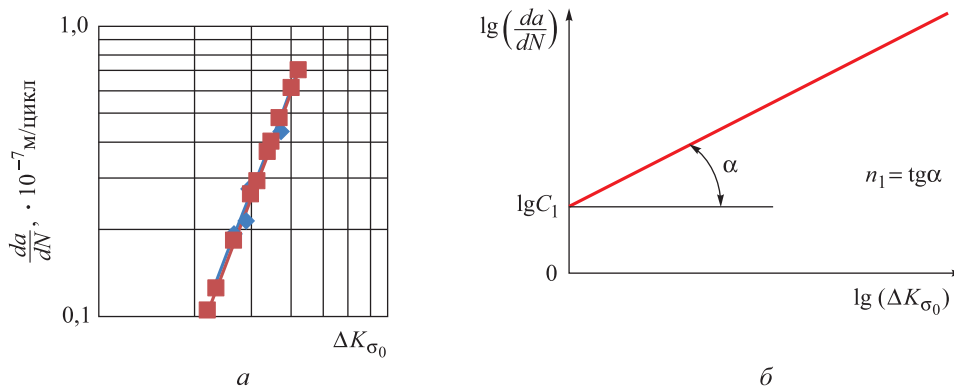


Рис. 6. Характеристики стали 40X:

а — кинетическая диаграмма; б — схема определения постоянных материала  $C_1$  и  $n_1$

Для стали марки 40X формула определения скорости роста усталостных трещин приобрела вид

$$\frac{da}{dN} = 8,12 \cdot 10^{-12} \left( \Delta K_{\sigma_0} \right)^{3,01}, \quad (7)$$

где  $a$  — размер трещины;  $N$  — количество циклов нагружения;  $\Delta K_{\sigma_0}$  — коэффициент изменения среднего напряжения за цикл нагружения.

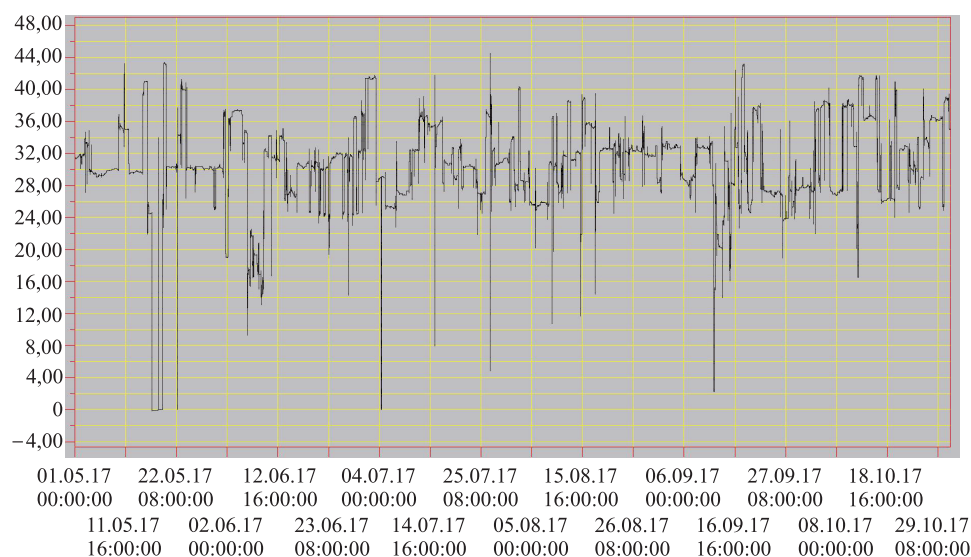
Предложенная модель роста усталостных трещин позволяет оценить остаточный ресурс трубопровода при наличии поверхностной или несквозной трещины [15]. Для этого интегрируется уравнение (6) и определяется остаточный ресурс  $N_{o,p}$ , т. е. количество циклов нагружения от момента регистрации трещины  $l_{рег}$  до критического размера трещины  $l_{кр}$ :



$$N_{o.p} = \int_{l_{per}}^{l_{кр}} \frac{1}{C_1 (\Delta K_{\sigma_0})^{n_1}} da. \quad (8)$$

Для магистрального трубопровода критический размер определяется в момент образования сквозной трещины, т. е. толщиной стенки трубы.

Магистральные нефтепроводы в процессе эксплуатации подвергаются воздействию циклически изменяющихся нагрузок, работают в условиях нестабильных режимов, что приводит к постоянному изменению давления в трубопроводе (рис. 7) [16].



**Рис. 7.** Графическое представление изменения давления на линейном участке магистрального нефтепровода за 6 мес

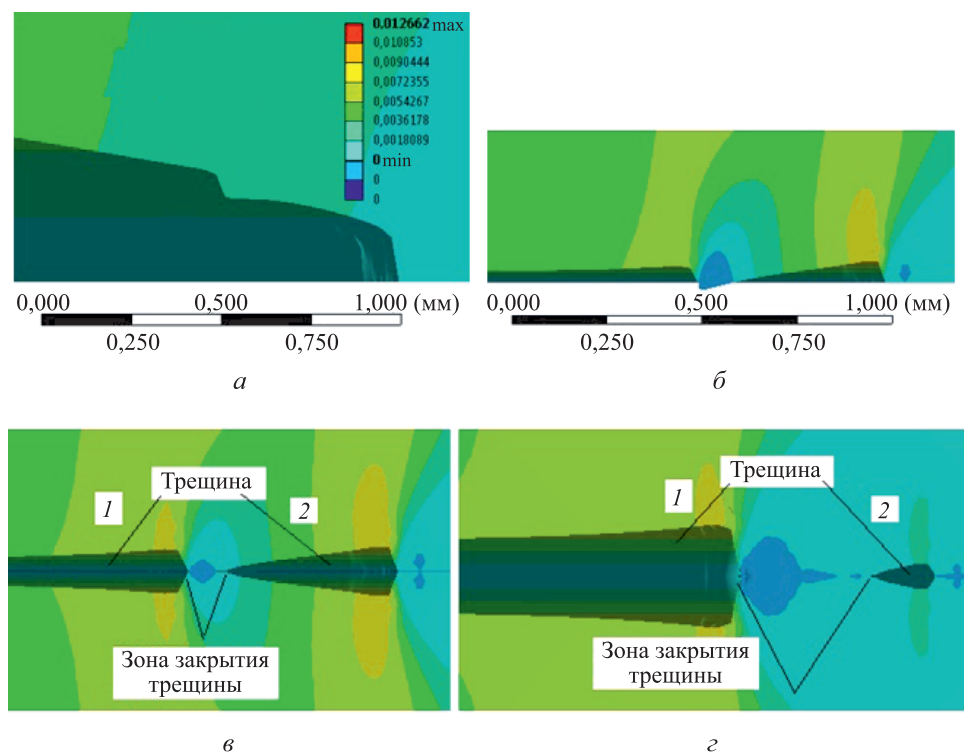
Данные циклы изменения давления преимущественно имеют случайный характер, обусловленный различными производственными факторами, такими, как неравномерность плановых объемов прокачки нефти, цикличность отборов и подкачек нефти по магистрали, изменения взливов в резервуарах головных станций, прохождения партий нефти с различными реологическими свойствами и т. д.

Опыт эксплуатации магистральных нефтепроводов показывает, что перепадов давления, причем самых незначительных (до 0,02 МПа), в нефтепроводе может быть много даже в течение 1 сут. Как отмечалось, изменение колебаний внутреннего давления в трубопроводе при нестабильном грузообороте транспортируемых нефтепродуктов носит случайный характер, поэтому для оценки возможности использования формулы (6) в целях предсказания роста трещин при эксплуатацион-

ных циклах нагружения рассмотрен известный эффект снижения скорости роста трещины после циклов перегрузки [17, 18]. В программе ANSYS Workbench создана модель процесса изменения полей напряжения и деформации при подрастании круговой поверхностной трещины на примере крестообразного образца из стали марки 40Х. Толщина рабочей части образца 10 мм, глубина трещины  $a$  (см. рис. 2, б) изменялась от 5 до 5,5 мм с шагом 0,1 мм. Стабильный рост трещины моделировался для следующего цикла нагружения: нагрузка зоны с трещиной до  $\sigma_y = 150$  МПа с последующей разгрузкой до нуля (см. рис. 2, а). При перегрузке первый цикл нагружения достигал напряжения  $\sigma_y = 200$  МПа. С учетом двойной симметрии зоны с поверхностной трещиной рассматривалась только одна четвертая часть в центре образца.

Для первого цикла одноосного нагружения в зоне трещины в вертикальном сечении образца (рис. 8, а) максимальное напряжение  $\sigma_y = 200$  МПа, глубина трещины  $a = 5,0$  мм, для второго —  $\sigma_y = 150$  МПа, глубина трещины  $a = 5,5$  мм. На поверхности разрушения остался след от остаточных пластических деформаций металла в вершине трещины после первого цикла нагружения (рис. 8, б). Имеется сечение верхней половины трещины при разгрузке до напряжения  $\sigma_y = 0$  после второго цикла нагружения в случае свободного перемещения половины трещины. Отчетливо видно, что при разгрузке после второго цикла нагружения происходит контакт берегов трещины, т. е. закрытие трещины в соответствии с теорией Элбера [19].

Далее моделировался процесс деформации берегов трещины за два цикла нагружения с учетом их контакта, т. е. закрытия трещины. Можно сравнить результаты (см. рис. 8, в, г) вычисления раскрытия берегов трещины, полученные после разгрузки для двух вариантов нагружения: первый вариант — стабильное нагружение зоны с трещиной до  $\sigma_y = 150$  МПа для обоих циклов; второй вариант — перегрузка в первом цикле нагружения до  $\sigma_y = 200$  МПа. Для случая нагружения с циклом перегрузки (см. рис. 8, г) зона закрытия трещины оказалась намного больше, чем для случая двух одинаковых циклов нагружения (см. рис. 8, в). Результаты проведенных испытаний образцов при переменных циклах нагружения [17, 18, 20] показали, что циклы перегрузки приводят к снижению скорости роста усталостных трещин на последующих циклах нагружения. В связи с этим сформулирован вопрос: можно ли применять формулу (6) для вычисления скорости роста усталостных трещин при переменных циклах нагружения и, в частности, при наличии цикла перегрузки?



**Рис. 8.** Раскрытие трещины в зоне ее вершины:

*а* — нагрузка (два цикла); *б* — разгрузка (два цикла); *в* — закрытие трещины без цикла перегрузки; *г* — закрытие трещины после цикла перегрузки

Нормальные напряжения на расстоянии  $r = 0,1$  мм впереди фронта трещины вычислены для двух случаев: при постоянном цикле нагружения (табл. 1) и при нагружении с циклом перегрузки (табл. 2).

Таблица 1

**Нормальные напряжения при постоянном цикле нагружения на расстоянии  $r = 0,1$  мм от вершины трещины (режим 1)**

Параметр	Нагружение, МПа		
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$
Нагрузка	200	542	359
Разгрузка	7	-31	-68
$\Delta\sigma$ , МПа	193	573	427

Таблица 2

**Нормальные напряжения при цикле нагружения с перегрузкой на расстоянии  $r = 0,1$  мм от вершины трещины (режим 2)**

Параметр	Нагружение, МПа		
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$
Нагрузка	189	533	340
Разгрузка	24	15	-41
$\Delta\sigma$ , МПа	165	518	381

По результатам, приведенным в табл. 1 и 2, вычисляли разность средних напряжений  $\Delta\sigma_0$ , коэффициент изменения средних напряжений  $\Delta K_{\sigma_0}$  и скорость роста трещин  $\frac{da}{dN}$  для режимов 1 и 2 (табл. 3).

Таблица 3

Сравнительные характеристики режимов нагружения 1 и 2

Параметр	Режимы нагружения	
	1	2
$\Delta\sigma_0$ , МПа	398	355
$\Delta K_{\sigma_0}$ , МПа · м <sup>0.5</sup>	9,97	8,89
$\frac{da}{dN}$ , м/цикл	$8,22 \cdot 10^{-9}$	$5,82 \cdot 10^{-9}$

При постоянных циклах нагружения разность между напряжениями при максимальной нагрузке и полной разгрузке образца оказалась выше, чем при переменных циклах нагружения с циклом перегрузки. Этот эффект объясняется наличием значительно больших остаточных деформаций раскрытия трещины после цикла перегрузки, чем при стабильных циклах нагружения. После цикла перегрузки остаточные напряжения впереди фронта трещины после разгрузки оказались ниже, чем при постоянных циклах нагружения вследствие возникновения значительно большей зоны закрытия берегов трещины (см. рис. 8).

После вычисления разности среднего напряжения  $\Delta\sigma_0$  (4) и коэффициента изменения разности среднего напряжения  $\Delta K_{\sigma_0}$  (5) по формуле (7) определены скорость роста трещины при постоянном цикле нагружения  $\frac{da}{dN_{const}} = 8,22 \cdot 10^{-9}$  м/цикл и скорость роста

трещины после цикла перегрузки —  $\frac{da}{dN_{overload}} = 5,82 \cdot 10^{-9}$  м/цикл.

Скорость роста трещины для варианта нагружения с циклом перегрузки снизилась на 40 % по сравнению с вариантом постоянных циклов нагружения, что качественно соответствует результатам исследований других авторов [17, 18, 20]. Рассмотренный пример показал, что предложенный коэффициент изменения разности среднего напряжения  $\Delta K_{\sigma_0}$  и полученную формулу (7) можно использовать для определения скорости роста усталостных трещин как для постоянных, так и для переменных циклов нагружения при одноосном и двухосном нагружениях стенки трубопровода.

**Заключение.** С помощью предложенной модели роста усталостных трещин можно прогнозировать развитие дефектов в стенке трубопровода, обнаруженных методами неразрушающего контроля, и оценивать остаточный ресурс при переменных циклах его нагружения. Для этого следует установить зависимость между скоростью роста усталостной трещины и напряженным состоянием в вершине трещины (6). В уравнении (6) характеристики материала  $C_1$  и  $n_1$  определяются по результатам одноосных усталостных испытаний образцов с трещиной. При известных кольцевом  $\sigma_k$  и продольном  $\sigma_{пр}$  напряжениях моделируется зона трубопровода с поверхностной трещиной, форма и размеры которой можно определить методами неразрушающего контроля. В вершине трещины исследуется напряженное состояние и определяется коэффициент изменения среднего напряжения  $\Delta K_{\sigma_0}$  за каждый цикл нагружения с учетом остаточных деформаций, полученных на предыдущих циклах нагружения. С помощью интегрального уравнения (8) последовательно суммируются результаты вычислений подрастания трещины для зафиксированных циклов нагружения.

Таким образом, описанный метод определения скорости роста усталостной трещины позволяет предсказать размер сквозной трещины при известных циклах нагружения трубопровода в процессе эксплуатации. С учетом этой информации работники эксплуатационных служб могут назначать сроки внутритрубной диагностики и оценивать остаточный ресурс магистрального трубопровода.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мурзаханов Г.Х. *Диагностика технического состояния и оценка остаточного ресурса магистральных трубопроводов*. Москва, Изд-во Независимого института нефти и газа, 2005, 70 с.
- [2] Остсёмин А.А., Заварухин В.Ю. Прочность нефтепровода с поверхностными дефектами. *Проблемы прочности*, 1993, № 12, с. 1–59.
- [3] Мурзаханов Г.Х., Скрепнюк А.Б. Оценка остаточного ресурса магистральных трубопроводов по моделям механики разрушения. *Управление качеством в нефтегазовом комплексе*, 2005, № 4, с. 38–44.
- [4] Фокин М.Ф. Оценка прочности труб магистральных трубопроводов с дефектами стенки, ориентированными по окружности трубы, по критерию возникновения течи перед разрушением. *Прикладная механика и технологии машиностроения. Сб. науч. тр.* Нижний Новгород, Интелсервис, 2005, с. 69–76.
- [5] Polasik S.J., Jaske C.E. Effective modeling of fatigue crack growth in pipelines. *Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Conference PVP2012, July 15-19, 2012, Toronto, Ontario, CANADA*, 2012, pp. 1–7.
- [6] Мурзаханов Г.Х., Небабин В.В., Шевченко И.А. Оценка остаточного ресурса — эффективный способ повышения экологической безопасности нефтепроводов. *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*, 2007, № 3, с. 24–26.

- [7] Ljustell P., Nilsson F. Effects of different load schemes on the fatigue crack growth rate. *Journal of Testing and Evaluation*, 2006, no. 34 (4), pp. 333–341.
- [8] Ljustell P., Nilsson F. Variable amplitude crack growth in notched specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005, no. 72 (18), pp. 2703–2720.
- [9] 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, pp. 46–52.
- [10] СП 36.13330.2012. *Магистральные трубопроводы*. Москва, Госстрой, 2013, с. 93.
- [11] Вансович К.А. Упругопластическая модель роста усталостных поверхностных трещин в толстостенных конструкциях при двухосном нагружении. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 3 (63). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-3-1596
- [12] Vansovich K., Jadrov V., Beseliya D. The Effect of Stress State Characteristics on the Surface Fatigue Cracks Growth Rate into Account Plastic Deformations. *Procedia Engineering*, 2015, no. 113, pp. 244–253.
- [13] Шабанов А.П. О механизме роста усталостных трещин в поле внешних сжимающих напряжений. *Прикладная механика и техническая физика*, 2005, т. 46, № 6, с. 108–115.
- [14] Тихомиров В.М. Рост трещины при знакопеременном цикле нагружения. *Прикладная механика и техническая физика*, 2008, № 5, с. 190–198.
- [15] Mohanty J.R., Verma B.B., Ray P.K. Prediction of fatigue crack growth and residual life an exponential model: Part I (constant amplitude loading). *International Journal of Fatigue*, 2009, vol. 31, pp. 418–424.
- [16] Чепурной О.В., Мызников М.О., Беселия Д.С., Вансович К.А., Суриков В.И. Определение и учет циклов нагружения магистрального нефтепровода. *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*, 2015, № 3 (19), с. 23–29.
- [17] Емельянов О.В., Пелипенко М.П. Влияние перегрузок на скорость роста усталостных трещин. *Вестник ЮУрГУ*, 2011, № 35, с. 21–24.
- [18] Xiaoping H., Moan T., Weicheng C. An Engineering Model of Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading. *International Journal of Fatigue*, 2008, vol. 30, pp. 2–10.
- [19] Elber W. The Significance of Fatigue Crack Closure. *ASTM STP 486, American Society for Testing and Materials (Philadelphia)*, 1971, pp. 230–242.
- [20] Sander M. Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading. Part I: Experimental Investigations. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2006, vol. 29, pp. 291–301.

Статья поступила в редакцию 22.01.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-5-1759>

**Вансович Константин Александрович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета, специалист в области механики разрушения. Область научных интересов: усталостное разрушение толстостенных конструкций с поверхностными трещинами. e-mail: vansovichka@mail.ru

**Аистов Игорь Петрович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Промышленная экология и безопасность» Омского государственного технического университета. Область научных интересов: механика разрушения, теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния упругопластических деформирующихся материалов, кинетика роста усталостных, поверхностных трещин в условиях двухосного напряжения; динамика и прочность механизмов с упругими звеньями; динамика и ресурс шестеренных насосов; трибология и методы теории фрикционной усталости поверхностей трения трущихся деталей. e-mail: aistov\_i@mail.ru

**Беселия Давид Симонович** — зам. нач. отдела гл. технолога АО «Транснефть — Западная Сибирь». Область научных интересов: влияние цикличности магистральных трубопроводов на остаточный ресурс нефтеперекачивающей системы. e-mail: davem@list.ru

## Method for estimating the residual operating life of the trunk pipeline in the presence of a surface crack under conditions of operational loads

© K.A. Vansovich<sup>1</sup>, I.P. Aistov<sup>1</sup>, D.S. Beseliya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Russia

<sup>2</sup> Joint-Stock Company "Transneft Western Siberia", Omsk, 644033, Russia

*The study proposes a method for determining the surface crack propagation rate in the wall of a trunk pipeline under the influence of variable biaxial cyclic loading. The analysis of the three-dimensional elastoplastic stress state at the tip of surface cracks is carried out by means of 40X steel for various types of biaxial loading. The study shows the results of fatigue tests of cross-edged specimens with the surface crack during biaxial loading. The change in the normal stresses in front of the crack front is studied when the samples are loaded to the maximum value and then off-loaded to zero. The dependence of the type of loading the samples with crack opening is identified. Moreover, we introduce a characteristic of the stress state at the crack tip, the characteristic correlating with the crack propagation rate for various types of loading. As a result, a formula is obtained that describes the propagation of fatigue cracks. Having studied the process of loading a sample in the presence of an overload cycle, we found that the obtained dependence can be used to predict the development of cracks and to estimate the residual operating life under variable operating loads.*

**Keywords:** surface crack, biaxial loading, finite element method, crack propagation rate, cyclic stresses, coefficient of variation of average stresses per loading cycle, residual operating life

### REFERENCES

- [1] Murzakhanov G.Kh. *Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya i otsenka ostatochnogo resursa magistralnykh truboprovodov* [Diagnostics of technical condition and estimation of the residual operating life of main pipelines]. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas Publ., 2005, 70 p.
- [2] Ostsemin A.A., Zavarukhin V.Yu. *Problemy prochnosti — Strength of Materials*, 1993, no. 12, pp. 1–59.
- [3] Murzakhanov G.Kh., Skrepnyuk A.B. *Upravlenie kachestvom v neftegazovom komplekse — Quality Management in Oil and Gas Industry*, 2005, no. 4, pp. 38–44.
- [4] Fokin M.F. Otsenka prochnosti trub magistralnykh truboprovodov s defektami stenki, orientirovannymi po okruzhnosti trubyy, po kriteriyu vozniknoveniya techi pered razrusheniem [Strength estimation of trunk pipelines with wall defects oriented along the circumference of the pipe according to the leak criterion before destruction]. In: *Prikladnaya mekhanika i tekhnologii mashinostroeniya. Sb. nauch. tr.* [Applied mechanics and engineering technology. Coll. sc. pap.]. Nizhny Novgorod, Intelservis Publ., 2005, pp. 69–76.
- [5] Polasik S.J., Jaske C.E. Effective modeling of fatigue crack growth in pipelines. *Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Conference PVP2012, July 15-19, 2012, Toronto, Ontario, CANADA*, 2012, pp. 1–7.
- [6] Murzakhanov G.Kh., Nebabin V.V., Shevchenko I.A. *Zaschita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse (Environmental protection in the oil and gas sector)*, 2007, no. 3, pp. 24–26.



- [7] Ljustell P., Nilsson F. Effects of different load schemes on the fatigue crack growth rate. *Journal of Testing and Evaluation*, 2006, no. 34 (4), pp. 333–341.
- [8] Ljustell P., Nilsson F. Variable amplitude crack growth in notched specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005, no. 72 (18), pp. 2703–2720.
- [9] 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, pp. 46–52.
- [10] SP 36.13330.2012. *Magistralnye truboprovody* [Code of Regulations 36.13330.2012. Trunk pipelines]. Moscow, Gosstroy Publ., 2013, 93 p.
- [11] Vansovich K.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, no. 3 (63). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-3-1596
- [12] Vansovich K., Jadrov V., Beseliya D. The Effect of Stress State Characteristics on the Surface Fatigue Cracks Growth Rate into Account Plastic Deformations. *Procedia Engineering*, 2015, no. 113, pp. 244–253.
- [13] Shabanov A.P. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2005, vol. 46, no. 6, pp. 108–115.
- [14] Tikhomirov V.M. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2008, no. 5, pp. 190–198.
- [15] Mohanty J.R., Verma B.B., Ray P.K. Prediction of fatigue crack growth and residual life an exponential model: Part I (constant amplitude loading). *International Journal of Fatigue*, 2009, vol. 31, pp. 418–424.
- [16] Chepurnoy O.V., Myznikov M.O., Beseliya D.S., Vansovich K.A., Surikov V.I. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov - Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2015, no. 3 (19), pp. 23–29.
- [17] Emelyanov O.V., Pelipenko M.P. *Vestnik IuUrGU — Bulletin of SUSU*, 2011, no. 35, pp. 21–24.
- [18] Xiaoping H., Moan T., Weicheng C. An Engineering Model of Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading. *International Journal of Fatigue*, 2008, vol. 30, pp. 2–10.
- [19] Elber W. The Significance of Fatigue Crack Closure. *ASTM STP 486, American Society for Testing and Materials (Philadelphia)*, 1971, pp. 230–242.
- [20] Sander M. Fatigue Crack Growth under Variable Amplitude Loading. Part I: Experimental Investigations. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2006, vol. 29, pp. 291–301.

**Vansovich K.A.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Transport, Oil and Gas Storage, Standardization and Certification, Omsk State Technical University. Specialist in the field of fracture mechanics. Research interests: fatigue failure of thick-walled structures with surface cracks. e-mail: vansovichka@mail.ru

**Aistov I.P.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Industrial Ecology and Safety, Omsk State Technical University. Specialist in the field of fracture mechanics. Research interests: fracture mechanics, theoretical and experimental studies of stress-strain state of elastoplastic deforming materials, kinetics of growth of fatigue and surface cracks under conditions of biaxial stress; dynamics and strength of mechanisms with elastic links; dynamics and operating life of gear pumps; tribology and methods of theory of frictional fatigue of friction surfaces of friction parts. e-mail: aistov\_i@mail.ru

**Beseliya D.S.**, Deputy Head of the Chief Technologist Department, Joint-Stock Company “Transneft Western Siberia”. Research interests: effect of trunk pipelines cycling on the residual operating life of the oil pumping system. e-mail: davem@list.ru