УДК 539.3 : 621.643

ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЕВ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Г. Х. Мурзаханов
Московский энергетический институт — Технический университет, Москва, Россия

Изложены детерминистический и полудетерминистический методы оценки остаточного ресурса магистральных трубопроводов, основанные на применении критериев механики разрушения. Приведены результаты экспериментального исследования характеристик прочности и трещиностойкости материала линейных участков трубопровода, находящегося в эксплуатации более 20 лет. В качестве примера оценен остаточный ресурс магистрального трубопровода, содержащего дефекты типа вмятин, царапин, коррозионных язв и т. п.

Применительно к магистральным трубопроводам основным понятием ресурса является индивидуальный остаточный ресурс — продолжительность эксплуатации от момента контроля его технического состояния до достижения предельного состояния [1]. Индивидуальное прогнозирование ресурса не только позволяет предупреждать возможные отказы, но и более правильно планировать режимы эксплуатации и профилактические мероприятия. В ряде случаев рентабельная эксплуатация может быть продолжена в условиях сниженных нагрузок. Поэтому можно рассматривать прогнозирование индивидуального остаточного ресурса как своего рода систему управления процессом эксплуатации , технического обслуживания и капитального ремонта.

Большинство эксплуатационных разрушений (отказов) магистральных трубопроводов обусловлено недостаточным сопротивлением стали труб и сварных соединений зарождению и развитию трещин. Традиционный прочностной расчет признает конструкцию приемлемой, если эквивалентные максимальные напряжения в трубопроводе не превышают предела прочности материала или предела текучести с учетом соответствующих коэффициентов запаса. Реальная конструкция всегда содержит дефекты (вмятины, царапины, каверны и т. д.), которые в процессе эксплуатации приводят к зарождению и росту усталостных трещин, инициирующих разрушение. Поэтому традиционные расчеты на прочность и усталость должны быть дополнены критериями статической и циклической трещиностойкости.

Необходимо отметить, что действующие нормативные документы не устанавливают срока службы нефтепроводов. В связи с этим установление сроков реконструкции и ремонта магистральных нефтепроводов давно является чрезвычайно актуальной задачей в деле прогноза и обеспечения долговременных показателей надежности нефтепроводов. Безусловно, внутритрубная диагностика, получающая все большее распространение и основанная на современных методиках и приборных средствах, в состоянии ответить на многие вопросы оценки риска и прогноза ресурса работы трубопровода. Систематическая диагностика позволяет осуществлять выборочный ремонт трубопроводов, предупреждать аварийные ситуации и при наличии дефектов выбирать безопасное рабочее давление.

Вообще говоря, наработка до отказа, ресурс и другие показатели долговечности могут быть определены лишь после того, как наступил отказ. Пока это событие не наступило, можно говорить о его прогнозировании с большей или меньшей достоверностью. Ситуация осложнена тем, что наработка до отказа зависит от большого числа факторов, часть которых не может быть проконтролирована, остальные заданы с той или иной степенью неопределенности. В этой связи мож-

но рассматривать два подхода к прогнозированию наработки до постепенного отказа. Первый — детерминистический подход, при котором факторы, влияющие на наработку до отказа, считаются заданными детерминистическими функциями неслучайных величин. Второй подход — вероятностный. Когда методами теории вероятностей и математической статистики учитывается неопределенность задания факторов, влияющих на оценку долговечности. В настоящее время в практику инженерных расчетов внедряются полудетерминистические методы, основанные на сочетании таких методов.

Вначале изложим детерминистическую методику прогнозирования остаточного ресурса магистральных трубопроводов 12]. Рассмотрим трещины (и трещиноподобные дефекты) однопараметрические, характеризуемые глубиной a, и многопараметрические (например эллиптические в плане). Сначала приведем формулы для коэффициентов интенсивности напряжений (K_1) и деформации (K_{1e}) однопараметрической трещины [3]:

$$\left.\begin{aligned} K_1 &= \sigma_6 \sqrt{a}\, Y(\eta), \\ K_{1e} &= \left(K_1 / \sigma_\tau I\right)^{p_{cc}} \end{aligned}\right\}, \qquad \sigma_H \le \sigma_\tau I. \tag{1}$$

$$K_{1e} = \left(\frac{K_1}{\sigma_\tau I}\right)^{p_{cc}} \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_\tau I}\right)^{\frac{1-m}{(1+m)m}}, \quad \sigma_H > \sigma_\tau I. \tag{2}$$

Здесь a — глубина дефекта; $\eta = a/b$ — относительная глубина дефекта;

$Y(\eta)$ — поправочная функция, учитывающая геометрию дефекта [4];

m — параметр деформационного упрочнения;

I — коэффициент, учитывающий двухосность напряженного состояния трубы [4];

$\sigma\tau$ — предел текучести металла трубы;

σ_6, σ_H — средние напряжения по брутто- и нетто-сечениям;

p_{ec} — показатель, зависящий от механических характеристик металла.

Рассмотрим поведение трещины, не являющейся трещиной нормального отрыва. Пусть на фронте трещины действуют нормальные и касательные напряжения. Тогда в зависимости от расположения трещины — в продольном или окружном направлении — появится коэффициент K_2 или K_3. Выражения для коэффициентов K_2 (K_3) аналогичны приведенным выше для K_1 с заменой σ на τ.

Перейдем к анализу многопараметрических трещин и расслоений. Рассмотрим усталостную полуэллиптическую трещину глубиной a и длиной $2b$ в стенке трубопровода толщиной b. Плоскость трещины локально перпендикулярна поверхности стенки. Участок стенки с трещиной загружен нормальными σ и касательными τ напряжениями. Коэффициенты интенсивности напряжений, описывающие напряженные состояния вблизи фронта трещины в направлении малой a и большой b полуоси эллипса, вычислим по формулам:

$$\begin{aligned} K_{1a} &= \sigma(\pi a / Q)^{1/2} F(a/b, a/b); \qquad K_{3a} = \tau(\pi a / Q)^{1/2} F, \\ K_{1b} &= \sigma\left[\pi a^2 / (bQ)\right]^{1/2} F(a/b, a/b); \quad K_{2a} = \tau\left[\pi a^2 / (bQ)\right]^{1/2} F. \end{aligned} \tag{3}$$

Поправка Q учитывает влияние эллиптичности трещины, поправка F — влияние толщины стенки трубопровода [5]. Аналогичные выражения для эллиптической трещины получены в [6].

Нагрузки, действующие на трубопровод, складываются из внутреннего давления p и внешних сил. Внутреннее давление создает в линейной части трубопровода окружные (кольцевые) $\sigma\theta$ и осевые (продольные) напряжения $\sigma_{пр}$, определяемые по безмоментной теории оболочек. Для участков трубопровода, находящихся в сложных условиях залегания (например в пучинистых грунтах), напряженное состояние отличается от безмоментного. Для оценки нормальных продольных и окружных напряжений и касательных напряжений необходимо выполнить специальные расчеты, применяя методы строительной механики трубопроводов.

Зарождение трещин в вершине дефектов происходит при достижении максимальной упругопластической деформации предельного значения: $e_{max} = e_k$, где $e_k = \ln\left[1 / (1 - \psi_k)\right]$, ψ_k — относительное поперечное сужение в момент разрыва. Разрушение по типу нормального отрыва трубопровода с трещиной происходит при выполнении определенного условия по коэффициенту интенсивности напряжений при хрупком разрушении $K_1 = K_{1c}$ или по коэффициенту интенсивности деформации при вязком разрушении $K_{1c} = K_{1ec}$. Здесь K_{1c} и K_{1ec} — критические значения соответствующих коэффициентов. При сочетании нормального отрыва со сдвигом (например для эллиптических и полуэллиптических трещин) разрушение можно оценить по модифицированному критерию разрушения [3]:

$$G_1 / G_{1c} + G_2 / G_{2c} + G_3 / G_{3c} = 1, \qquad (4)$$

где G_1, G_2, G_3 — интенсивности высвобождения энергии деформации трубы при соответствующих парциальных нагружениях. Их также можно истолковать как обобщенные силы в смысле многопараметрической механики разрушения; G_{1c}, G_{2c}, G_{3c} — соответствующие удельные работы разрушения. Обобщенные силы вычисляются через коэффициенты интенсивности напряжении по известным формулам. Используя приведенные статические критерии прочности и трещиностойкости, можно определить предельно допустимый размер дефекта, обнаруженного в трубопроводе при дефектоскопии, максимальное давление и минимально допустимую толщину стенки.

Особенностью эксплуатации магистральных трубопроводов является то, что в них наблюдаются перепады давления, вызванные изменениями режимов работы насосов (компрессоров). Нерегулярный спектр нагруженности может быть сведен к регулярному блочному, характеризуемому количеством перепадов давления за год N_r, при котором снижение давления составляет до r % от рабочего. Обычно весь спектр разбивают на дискретные значения r = 25; 50; 75; 100 %.

Число циклов до зарождения в вершине дефекта усталостной трещины определяется уравнениями Коффина-Мэнсона [7]. Эти уравнения устанавливают взаимосвязь между амплитудой изменения истинных деформаций в вершине дефекта, механическими характеристиками металла и числом циклов нагружения. Для оценки числа циклов N_p от момента зарождения трещины до момента, когда трещина становится сквозной, используются уравнения Пэриса-Махутова

$$\frac{da}{dN} = C_\sigma (\Delta K_1)^{n_\sigma}, \quad \frac{da}{dN} = C_e (\Delta K_{1e})^{n_e}, \qquad (5)$$

где ΔK — размах соответствующего коэффициента K, $C\sigma$, C_e, $n\sigma$, n_e, — параметры уравнения.

Уравнения (5) Пэриса-Махутова являются полуэмпирическими и не учитывают накопление повреждений, вызванное деформационным и коррозионным старением материала трубы в процессе эксплуатации. В [1] приведен достаточно общий класс уравнений роста усталостных трещин на основе классической концепции Гриффитса. При выводе используется гипотеза о том, что медленно подрастающая усталостная трещина в момент достижения наибольших напряжений цикла удовлетворяет условиям равновесности по Гриффитсу. Однако обобщенные силы сопротивления материала продвижению трещины существенно снижаются вследствие предварительно накопленных повреждений. Для силы сопротивления Γ примем степенную зависимость от суммарного повреждения ψ: $\Gamma = \gamma_0\left(1-\psi^a\right)$, где γ_0 — удельная работа разрушения для первоначально неповрежденного материала трубопровода; ψ — функция накопления повреждений как механического, так и коррозионного происхождения; α — параметр. Запишем один из вариантов уравнения усталостного роста однопараметрической трещины

$$\frac{da}{dN} = \left[\lambda_\sigma\left(\frac{\Delta G_1 - \Delta G_{1th}}{G_{1f}}\right)^{\mu_1} + \lambda_\tau\left(\frac{\Delta G_2 - \Delta G_{2th}}{G_{2f}}\right)^{\mu_2}\right]\left(1-\frac{G_1}{G_{1c}}-\frac{G_2}{G_{2c}}\right)^{-1/a}_{\max}, \qquad (6)$$

где N — число циклов нагружения; $\lambda\sigma$ и $\lambda\tau$ — длины зон интенсивного накопления повреждений, имеющие порядок длин краевых эффектов; G_f — характеристика сопротивления материала накоплению повреждений; ΔG_{1th} и ΔG_{2th} — пороговые значения размаха обобщенных сил, продвигающих фронт трещины; ΔG_1 и ΔG_2 — размах обобщенных сил; α, μ_1, μ_2 — параметры, определяемые экспериментально по диаграмме усталостного разрушения.

В соответствии с расчетной диаграммой циклического разрушения, число циклов N_p на этапе роста трещины при циклическом нагружении определяется по формуле

$$N_p = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C_e\left(\Delta K_{1e}\right)^{n_e}}, \qquad (7)$$

где a_0 — исходная глубина дефекта-трещины; a_c — критическая глубина, удовлетворяющая хотя бы одному из условий статического разрушения.

Аналогичную формулу можно получить для уравнения (6).

В процессе эксплуатации трубопроводы работают в сложных условиях нагружения. Изменяются рабочее давление, температура, внешние нагрузки и т.д. Для оценки долговечности и остаточного ресурса обычно применяют гипотезу линейного суммирования повреждений. Согласно гипотезе при эксплуатации трубопровода в сложном циклическом режиме нагружения происходит накопление повреждений в дефектных местах. Как только на каком-то дефекте функция накопления повреждений будет равна единице, то здесь и происходит разрыв трубы.

Перейдем к изложению особенностей полудетерминистического метода прогнозирования остаточного ресурса. Как уже отмечалось, наработка до отказа — разгерметизации трубопровода в результате прорастания усталостной трещины, зависит от большого числа факторов, заданных с некоторой степенью неопреде-

ленности, т. е. по сути являющихся случайными величинами или функциями. Для рассматриваемого трубопровода под действием циклически изменяющегося давления в качестве случайных величин примем: изменение рабочего давления (Δp) и начальные размеры трещин (a_0). Таким образом, критическая наработка до отказа N_c, рассматриваемая как число циклов изменения давления, представляется функцией случайных величин

$$N_c = N_c\left(\Delta\sigma_\theta\left(\Delta p\right), a_0\right), \tag{8}$$

где a_0 — начальная длина трещины, равномерно распределенная случайная величина; $\Delta\sigma_\theta\left(\Delta p\right)$ — размах окружных напряжений — функция случайной величины Δp, распределенная по нормальному закону.

Что касается вычисления характеристик случайной величины N_c, то, учитывая современный уровень развития вычислительной техники, наиболее эффективным представляется проведение численного эксперимента. Суть эксперимента заключается в многократном моделировании случайных величин, распределенных по заданным законам, и последующей обработке полученных результатов. После построения статистического ряда для N_c можно получить следующие оценки:

математического ожидания:

$$m_{N_c} = \sum_{j=1}^{K} N_{cj}\,\frac{n_j}{n}, \tag{9}$$

выборочной дисперсии:

$$\sigma^2_{N_c} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{K} n_j\left(N_{cj} - m_{N_c}\right)^2 \tag{10}$$

и коэффициента вариации:

$$\gamma_{N_c} = \frac{\sigma_{N_c}}{m_{N_c}}. \tag{11}$$

На основе изложенной методики разработан программный комплекс для персональных компьютеров типа IBM PC. Расчеты и экспериментальные исследования проведены для участка магистрального нефтепровода протяженностью более 1000 км.

При расчетах используются различные типы дефектов труб, обнаруживаемые достаточно часто на трубопроводах: царапины, каверны, вмятины и др. Происхождение их может быть самым различным — в процессе изготовления труб, при транспортировке и их укладке и засыпке грунтом, во время эксплуатации от различных причин. Циклические характеристики нагружений труб определялись по данным эксплуатации в различные периоды времени, существенно отличавшиеся по объемам перекачки и уровням давления.

Свойства металлов труб исследовались на образцах, взятых из аварийных, действующих и запасных труб, и включали также сварные соединения. Исследовались химический состав, механические свойства, ударная вязкость, работа зарождения и распространения трещин и склонность к хрупкому разрушению металла и сварных соединений. Кроме типовых методик определения свойств металла

использовались и специально разработанные, например, для оценки склонности стали к образованию трещин в коррозионной среде и сопротивления металла разрушению в условиях с переменной нагрузкой, имитирующей циклические нагрузки, возникающие при перекачке нефти.

В результате исследований находились значения критического коэффициента интенсивности напряжений, необходимые для определения ресурса трубы до первого отказа. Значение критического коэффициента интенсивности напряжений за время длительной эксплуатации уменьшается. На рис. 1 приведена такая зависимость для трубной стали марки 17ГС. Кроме того, было установлено, что в результате длительной эксплуатации происходит снижение сопротивления металла труб из некоторых марок стали хрупкому разрушению, со сдвигом переходных кривых ударной вязкости к более высоким температурам. На рис. 2 представлен пример изменения критической температуры перехода металла труб из стали марки 17ГС в хрупкое состояние за время длительной эксплуатации. Следует отметить, что после 20 лет эксплуатации критическая температура хрупкости металла некоторых труб находится выше +20 °С, что необходимо учитывать при эксплуатации наземных участков трубопроводов в зимние периоды, особенно после так называемого режима "хранения".

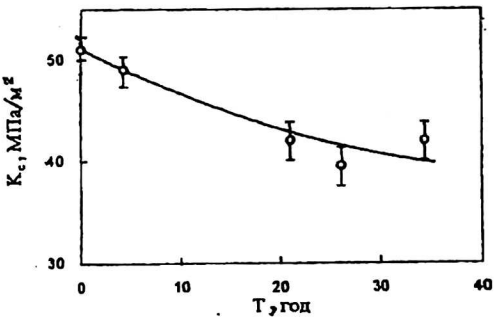


Рис. 1. Изменение критического коэффициента интенсивности напряжений в ходе эксплуатации труб изстали 17ГС

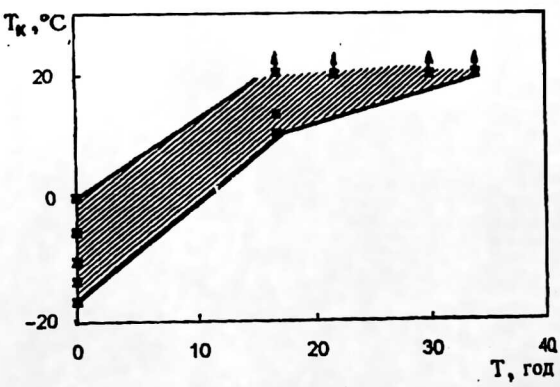


Рис. 2. Изменение критической температуры хрупкости в ходе эксплуатации труб изстали типа 17 ГС

Проведенные исследования показали, что одной из основных причин уменьшения сопротивления металла труб хрупкому разрушению в ходе длительной эксплуатации является деформационное старение, развитию которого способствует локальная пластическая деформация металла под воздействием напряжений, возникающих в стенке трубопровода. Можно полагать, что деформационное старение понижает сопротивление микропластической деформации, уменьшая наиболее важный для нефтепроводов запас пластичности и вязкости стали.

На основе результатов исследований механических свойств металла труб и статистических данных о нагружениях нефтепровода за время его эксплуатации по разработанному алгоритму рассчитываются графики зависимости ресурса различных сортов стали от действовавших значений давлений на трубу. Два таких графика для трубы из стали 17Г1С при толщине стенки 9 мм (сплошные линии) и 10 мм (штриховые) и эксплуатировавшейся 22 года приведены на рис. 3.

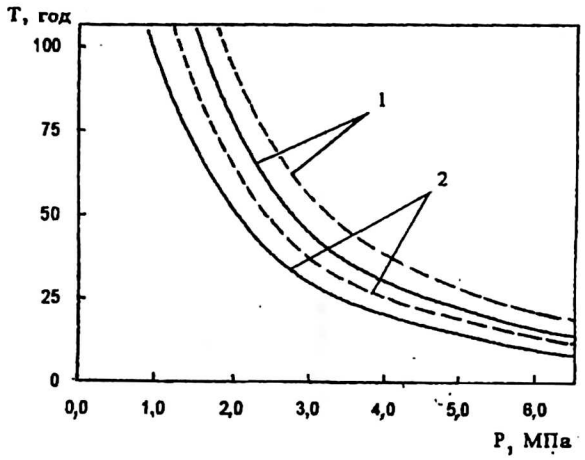


Рис. 3. Зависимость долговечности трубы 17Г1С диаметром 1020 мм от действующего давления:
1 — N_{50} = 80 циклов; 2 — N_{50} = 120

Используя рассчитанные подобным образом ресурсы труб всех марок, затем строится итоговый график изменения ресурса вдоль трассы линейного участка. На рис. 4 приведен пример такого графика для трех участков, на первых двух из которых ресурс до отказа на данный момент времени эксплуатации у некоторой части труб закончился, а на третьем имеется остаточный ресурс. Наглядность такой формы представления результатов расчетов вместе с нанесенными на трассе местами возникавших отказов и обнаруженных дефектов очевидна.

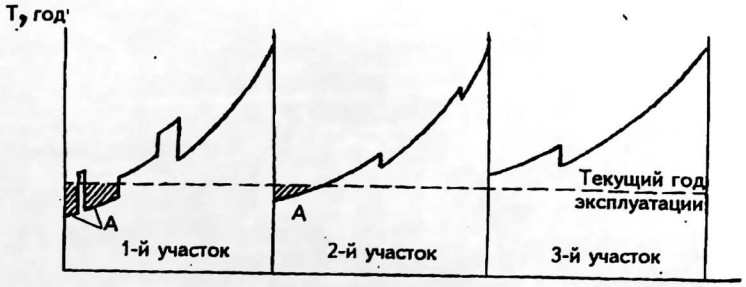


Рис. 4. Пример оценки ресурса трех линейных участков нефтепровода

Наибольшая ценность такой формы представления подобной информации заключается в доступности сравнительной оценки ресурса отдельных участков всего нефтепровода. Риск отказов на участках можно оценить по площади А (рис. 4), ограниченной графиком ресурса, и прямой, соответствующей текущему

году работы трубы. Очевидно, что большая площадь A соответствует худшему показателю риска, а максимальная разность между двумя этими графиками показывает потенциальную наихудшую точку трубопровода по риску отказа.

Результаты статистического моделирования по оценке остаточного ресурса нефтепровода на основе полудетерминистического метода приведены в работе [8].

Проведенные расчеты для конкретных нефтепроводов по определению опасных участков подтверждаются статистикой случившихся отказов на этих участках. Подобные исследования в сочетании с информацией об отказах, природных и селитебных изменениях в зоне прохождения трубопровода за время его эксплуатации позволяют наметить оптимальную стратегию капитального ремонта трубопровода по линейным участкам, а также режимы работы нефтепровода с учетом возможного ограничения давления в трубопроводе на период ожидания ремонта.

Литература

1. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1990. — 447 с.

2. Мурзаханов Г. Х. Прогнозирование индивидуального остаточного ресурса магистральных трубопроводов // Строительство трубопроводов. 1994. № 5. С. 31—35.

3. Мурзаханов Г. Х., Кузнецов С. Ф. Математическое моделирование процессов разрушения. М.: Моск. энерг. ин-т, 1989. — 88с.

4. Методика оценки статической прочности и циклической долговечности магистральных нефтепроводов. Уфа / ВНИИСПТ нефть, 1990. — 89 с.

5. Part-through crack fatigue life prediction / Ed. J.B. Chang. ASTM STP 687. Philadelphia: ASTM, 1979.

6. Kassir M. K., Sih G. C. Mechanics of fractare. Three dimensional crack problems. Leyden: Nether lands Noordhoff Intern pabl., 1975. V. 2. — 252 p.

7. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин на прочность и долговечность. М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.

8. Дмитриев В. Ф., Мурзаханов Г. Х., Филиппов Г. А. Оценка остаточного ресурса нефтепровода и планирование его капитального ремонта // Строительство трубопроводов .1997. № 3.

APPLICATION OF FRACTURE MECHANICS CRITERION FOR RESIDUAL RESOURCE ESTIMATION OF TRUNK PIPELINES

G. H. Murzakhanov

Moscow Power Engineering Institute — Technical University, Moscow, Russia

Deterministic and halfdeterministic methods of residual resource estimation of trunk pipelines based on fracture mechanics criterion are presented. The results of experimental study of strength and fracture toughness characteristics of material on linear parts of trunk pipeline being exploited for more than 20 years are given. As an example, residual resource of trunk pipeline containing such defects as dents, scratches, pits etc. is estimated.