

УДК 622.692.4:620.1

ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЯМ ТРУБОПРОВОДОВ С НАРУШЕННЫМИ РАБОЧИМИ СЕЧЕНИЯМИ

Харисов Р.А., Кантемиров И.Ф.

*Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа
кафедра «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ»
e-mail: pipe-ufa@mail.ru*

Исаев Ш.З.

ООО «Востокнефтепровод» АК «Транснефть»

Зайнуллин Р.С.

*Центр гидравлики трубопроводного транспорта
Академии наук Республики Башкортостан, г.Уфа*

Аннотация. Настоящая работа посвящена исследованию и разработке методов расчетной оценки сопротивляемости хрупкому и вязкому разрушениям труб с локализованными изменениями рабочих сечений.

Предложен и обоснован метод расчетного определения коэффициента прочности труб с многопараметрическими трещиноподобными повреждениями, образованными при их взаимодействии со скальным грунтом. Полученные результаты являются исходными для выполнения расчетов прогнозируемого и остаточного ресурса нефтепроводов и их базовых элементов.

Ключевые слова: дефекты, коррозионно-механическое воздействие, остаточные напряжения, напряженно-деформированное состояние, трещиноподобное повреждение, концентрация напряжений, трещиностойкость, пластическое деформирование

Механика разрушения в широком смысле этого понятия включает в себя ту часть науки о прочности материалов и конструкций, которая связана с исследованием несущей способности тела, как с учетом начальных трещин, так и без него, а также с изучением различных закономерностей развития трещин.

Известно, что разрушение представляет собой сложный, многоступенчатый процесс, который начинается задолго до появления видимых трещин. Ввиду отсутствия единой теории процесса разрушения изучают различные закономерности этого явления на разных масштабных уровнях. В пределах каждой масштабной области разрушение должно изучаться в соответствии с моделью, адекватно отражающей строение материала и учитывающей граничные условия со стороны, как левых, так и правых соседних (по масштабной шкале) областей.

Разрушение относится к одному из видов нарушений прочности, которые могут происходить в результате: 1) чрезмерной (упругой или пластической)

деформации; 2) потери устойчивости; 3) разрушения; 4) иных причин (износ, ползучесть, коррозия и т.п.).

Разрушение может быть частичным или полным. При частичном разрушении в теле возникают повреждения материала в виде отдельных трещин или распределенных по объему дефектов материала, приводящих к изменению (в неблагоприятную для прочности сторону) механических свойств материала. При полном разрушении происходит разделение тела на части.

Существуют следующие основные виды разрушения.

1. Вязкое (пластическое) разрушение. Происходит при существенной пластической деформации, протекающей почти по всему объему тела. Характерны большие затраты энергии на образование единицы площади вновь образующейся поверхности излома. Разновидность пластического разрушения – разрыв после 100 % - го сужения шейки при растяжении, происходящий в результате исчерпания способности материала сопротивляться пластической деформации.

2. Хрупкое (упругое) разрушение. Происходит в результате распространения магистральной трещины при пластической деформации, сосредоточенной в малой области разрушения. Характерны малые затраты энергии на образование единицы площади излома.

Идеально хрупкое разрушение происходит без пластической деформации, причем из осколков можно заново составить тело прежних размеров. Квазихрупкое разрушение предполагает наличие пластической зоны перед фронтом трещины и наклепанного материала у поверхности трещины (остальной, и значительно больший по величине, объем тела находится при этом в упругом состоянии). В технике квазихрупким называют разрушение, при котором разрушающее напряжение в нетто-сечении выше предела текучести, но ниже предела прочности.

3. Усталостное разрушение. Происходит при циклическом (повторном) нагружении в результате накопления необратимых повреждений. Излом макроскопически хрупкий, однако у поверхности излома материал существенно наклепан. Различают усталость и малоцикловую усталость.

Усталость характеризуется номинальными напряжениями, меньшими предела текучести, повторное нагружение макроскопически происходит в упругой области; число циклов до разрушения велико.

Малоцикловая усталость (иногда повторно-статическое нагружение) характеризуется номинальными напряжениями, превышающими предел текучести, при этом возникает макроскопическая пластическая деформация; число циклов до разрушения сравнительно невелико [1].

В связи с этим, большое практическое значение имеют разработка и совершенствование методов оценки степени поврежденности и оценки их влияния на характеристики безопасности эксплуатации нефтепроводов в сложных условиях строительства и эксплуатации на базе современных достижений специализиро-

ванного направления в механике разрушения, которая требует существенного дополнения в плане рассматриваемой в настоящей работе проблемы взаимодействия твердых тел и труб нефтепроводов в скальных грунтах.

Анализ существующих подходов к оценке ресурса нефтепроводов показывает, что в литературе недостаточно сведений по адекватной оценке влияния локализованных искажений формы и толщины стенок труб на их характеристики безопасной эксплуатации (число циклов нагружения до и во время разрушения). В частности, показано, что существующие подходы к оценке труб с локализованными искажениями формы (вмятинами) могут в несколько раз зажимать ресурс нефтепроводов. Указанный факт вызывает необходимость проведения исследований по оценке влияния локализованных механических воздействий на работоспособность и безопасность базовых элементов нефтепроводов [1, 2].

Настоящая работа посвящена исследованию и разработке методов расчетной оценки сопротивляемости хрупкому и вязкому разрушениям труб с локализованными изменениями рабочих сечений.

На начальном этапе работы произведена оценка степени напряженности труб с локализованными искажениями формы методами решения краевых задач теории оболочек и механики разрушения. В дальнейшем выполнены исследования сопротивляемости хрупкому разрушению труб с локализованными повреждениями. Произведена оценка деконцентрации напряжений и реализации остаточной напряженности труб в окрестности локализованных механических повреждений. Дана расчетная оценка несущей способности труб с локализованными отклонениями от круглости. Произведена оценка адекватности предложенных формул по результатам натурных испытаний труб.

В работе приводятся результаты исследования напряженного состояния труб с угловыми вмятинами с использованием подходов краевых задач и теории тонких оболочек вращения [1 - 4].

На основании полученного решения выведены соответствующие аналитические зависимости для расчетов теоретических коэффициентов концентрации напряжений α_σ . В дальнейшем, базируясь на теории Нейбера и Н.А. Махутова определены упруго-пластические коэффициенты концентрации деформаций K_ε и напряжений K_σ . Кроме этого, в работе выполнен анализ кинетики изменения напряжений и деформаций в процессе нагружения и разгрузки трубопровода с трещиноподобными повреждениями, вызванными локальными механическими воздействиями (рис. 1).

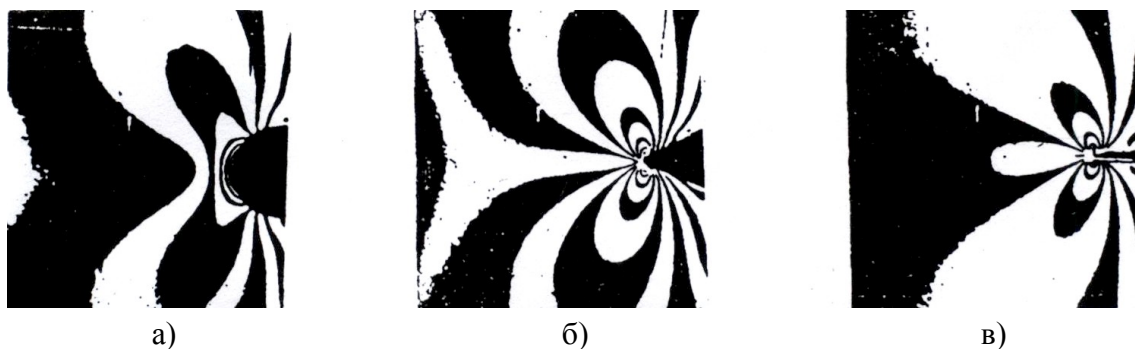


Рис. 1. Изохромы в упругих плоских моделях с локализованными повреждениями, вырезы:
а – круговой; б – угловой; в – прямоугольный

Особенностью рассматриваемой проблемы, затрудняющей теоретический анализ, является тот факт, что возникает необходимость решения двух задач о напряженно-деформированном состоянии конструктивных элементов: а – в упругой постановке; б – в упругопластической. При этом особую сложность представляет решение задачи в упругопластической постановке, когда связь между напряжениями и деформациями нелинейная.

В вершине локализованных повреждений радиус кривизны может быть весьма малым ($\rho \rightarrow 0$). В таких элементах (рис. 1б, в) отмечается высокая степень концентрации напряжений, что вызывает возникновение локальных пластических деформаций при нагружении и разгрузке. Такие (особые) точки с $\rho = 0$ принято называть сингулярными, ими могут быть точки приложения сосредоточенных сил Q (рис. 2).

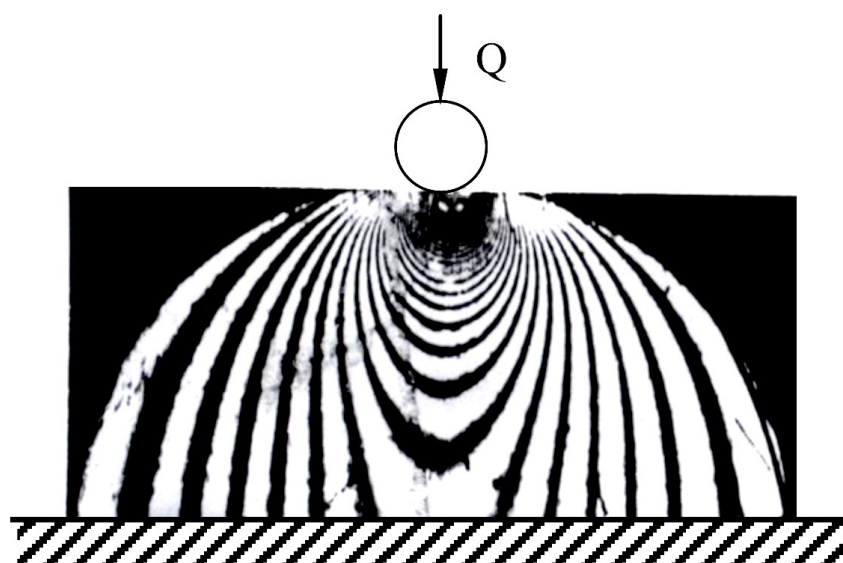


Рис. 2. Изохромы в модели, нагружаемой сосредоточенной силой Q

Согласно основным положениям теории упруго-пластичности в процессе разгрузки трубопровода металл должен укорачиваться по упругим законам.

В действительности, пластически деформированные участки не могут укорачиваться настолько, сколько требуют законы упругости. Поэтому, после полной разгрузки элемента от внешних сил в металле возникают остаточные напряжения, рис. 3 (кривая 2). Наряду с этим, происходит пластическое притупление вершины острых повреждений (рис. 4).

В работе выполнен анализ напряженно-деформированного состояния трубы с трещиноподобным повреждением (рис. 5) на всех этапах упруго-пластического деформирования металла, включая стадию полной разгрузки (рис. 3).

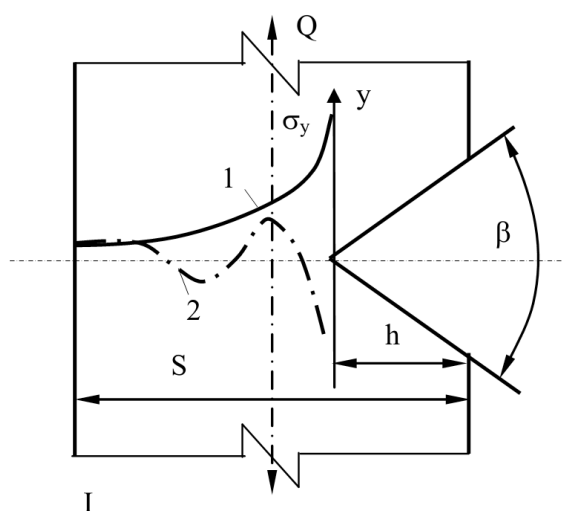


Рис. 3. Распределение осевых напряжений σ_y при нагружении (1) и после полной разгрузки элемента с острым надрезом (повреждением)

Взаимодействие скальных грунтов с трубами приводит к реализации в металле локализованных пластических деформаций, деформационного старения и макроскопического формоизменения. Все это снижает характеристики сопротивления хрупкому разрушению труб и ресурс нефтепроводов. Первые два фактора связаны с охрупчиванием металла и снижением трещиностойкости металла. В результате макроскопического формоизменения в зоне действия сосредоточенной нагрузки образуется вмятина, являющаяся источником концентрации напряжений и инициирования и развития трещин в трубах.

Необходимо отметить, что вмятины, квалифицированные как недопустимые в соответствии с требованиями нормативных материалов, могут не снижать статическую прочность труб даже при наличии трещин определенных размеров. Поэтому, имеет практический интерес оценка предельных параметров трещин, вызывающих разгерметизацию и разрушение труб при их последующем циклическом нагружении, характерном для нефтепроводов.

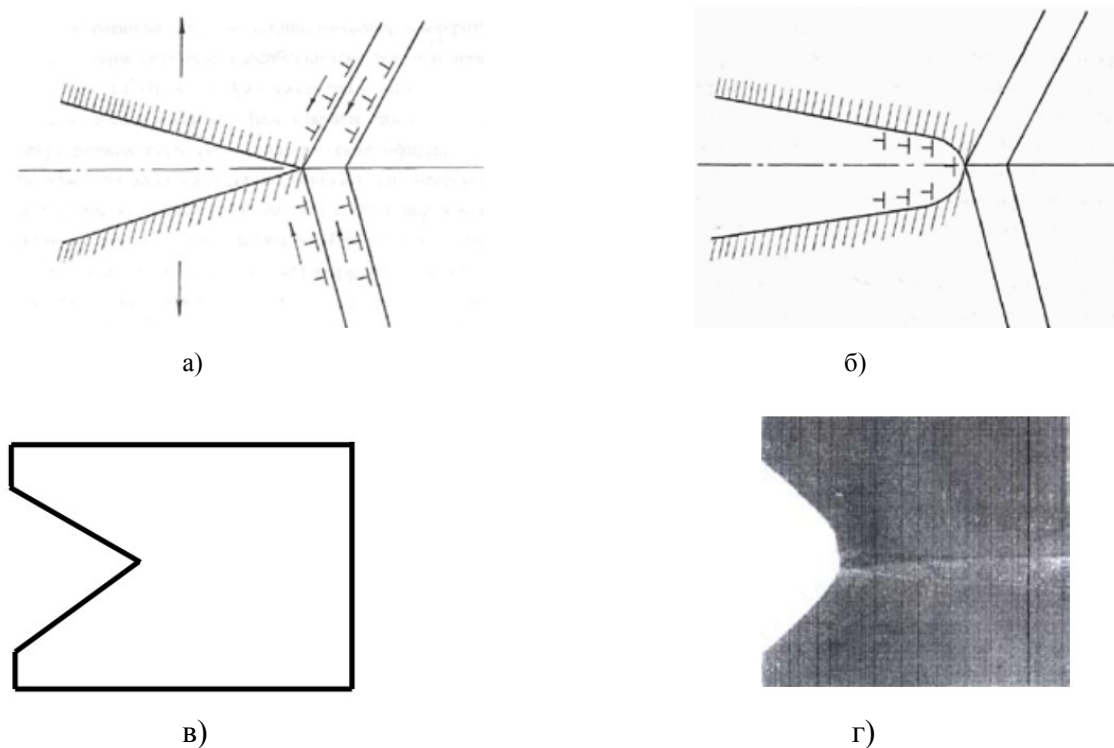


Рис. 4. Дислокационная модель (а, б) и фактическая реализация (в, г) пластического притупления вершины трещин и надрезов:
а, в – до нагружения; б, г – после нагружения

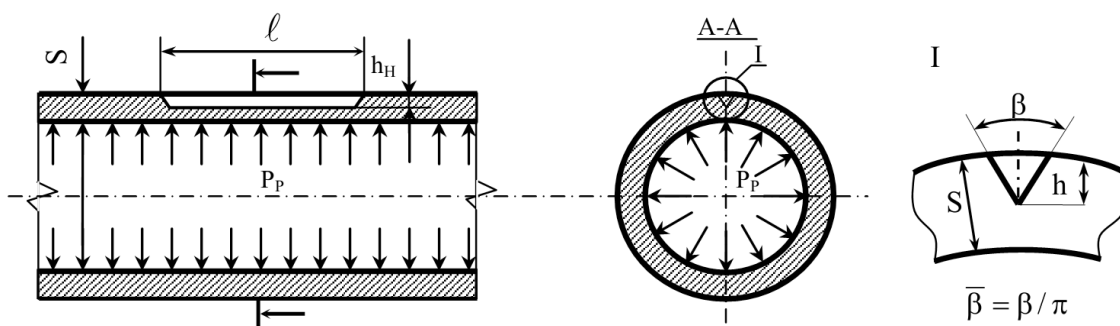


Рис. 5. Схема трубы с трещиноподобным повреждением

Анализ степени напряженности различных моделей с трещинами, возникающими при контактном взаимодействии труб с твердыми телами, показывает, что наиболее опасными и распространенными являются медианные двухпараметрические трещины глубиной h и протяженностью l .

В общем случае, для труб характерны трехпараметрические трещиноподобные повреждения с углом раскрытия β (рис. 5).

В качестве нормируемого параметра оценки степени опасности трещиноподобных повреждений доказана целесообразность [1, 3] введения безразмерного параметра φ_c , представляющего собой отношение предельных разрушающих ок-

ружных напряжений трубы с повреждением (σ_c) и без него (σ_b): $\varphi_c = \sigma_c / \sigma_b$. Этот параметр φ_c принято называть коэффициентом прочности. Ясно, что $\varphi_c \leq 1,0$. В общем случае $\varphi_c = f(D, \Gamma)$, где D и Γ – соответственно деформационный и геометрический параметры. Деформационный параметр D характеризует степень снижения разрушающих напряжений в нетто-сечении трубы, а геометрический параметр Γ – степень снижения рабочего сечения трубы, обусловленного повреждением. В работах ГУП «ИПТЭР» для расчетной оценки φ_c предлагается следующая формула: $\varphi_c = \alpha_{mp} \cdot K_{h\ell}$, где α_{mp} – коэффициент трещиностойкости стали; $K_{h\ell}$ – обобщенный параметр, характеризующий степень ослабления стенки трубы трещиноподобным повреждением: $K_{h\ell} = 1 - m_h \cdot \sqrt[4]{m_\ell}$. Здесь $m_h = h/S$; $m_\ell = \ell/S$; D – диаметр трубы. Другими словами, геометрический параметр $\Gamma = K_{h\ell}$. Показано, что коэффициент трещиностойкости $\alpha_{mp} = 2\sqrt{\psi_\epsilon + 0,125\psi}$, где ψ_ϵ и ψ – относительные равномерное и полное сужения образцов на растяжение до разрушения. Эти данные позволяют величину φ_c представлять в виде произведения D и Γ [3, 4]:

$$\varphi_c = D \cdot \Gamma = \alpha_{mp} \cdot K_{h\ell}. \quad (1)$$

Отсюда понятно, что чем выше деформационные характеристики стали и ниже степень ослабления рабочего сечения, тем больше прочность трубы с повреждением. На наш взгляд, для оценки деформационного параметра D лучше использовать обобщенную формулу:

$$D = a (\psi_\epsilon + \nu \cdot \psi)^c, \quad (2)$$

где a , ν , c – постоянные коэффициенты, уточняемые экспериментально для новых марок сталей в тех или иных структурно-прочностных состояниях. Заметим, что коэффициент трещиностойкости α_{mp} зависит от параметра m_h . Экспериментальное (минимальное) значение $\alpha_{mp}(m_h)$, соответствующее $m_h = 0,5$ принимается за расчетное $\alpha_{mp} = \alpha_{mp}^{(0,5)}$. При этом функциональная зависимость $\alpha_{mp}(m_h)$ адекватно описывается следующей формулой:

$$\alpha_{mp}(m_h) = 1 - 4m_h(1 - m_h) \cdot (1 - D). \quad (3)$$

В соответствии с данными ГУП «ИПТЭР» зависимости φ_c для труб с $\alpha_{mp} = 1,0$ и $\alpha_{mp} < 1,0$ будут определяться кривыми 1 и 2 на рис. 6.

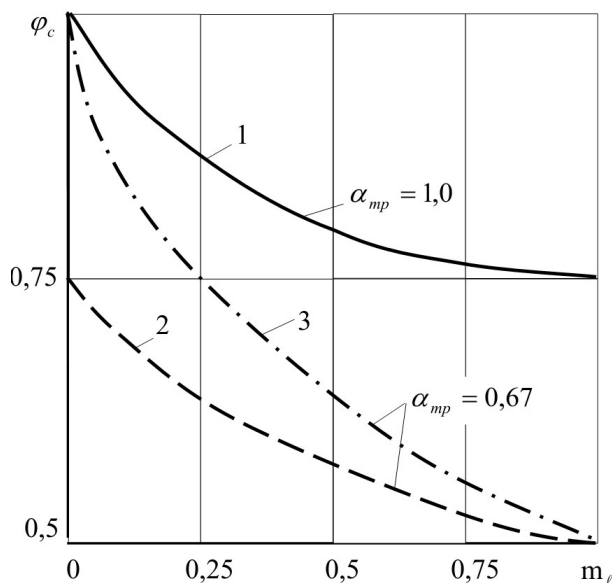
Видно, что для труб при $\alpha_{mp} < 1,0$ для случая, когда $m_h = 0$, $\varphi_c < 1,0$. С целью устранения этого недостатка, нами предлагается оценивать φ_c^{mn} в соответствии с кривой 3. С учетом этого факта для оценки φ_c для труб с произвольными параметрами D , m_h и m_ℓ , нами предложена и обоснована следующая формула:

$$\varphi_c = 1 - (1 - \varphi_{c*}) m_\ell^q, \quad (4)$$

где φ_{c*} – коэффициент прочности трубы с протяженным повреждением ($\ell > D$); q – константа, определяемая экспериментально (по данным [1] $q = 0,25$). Величина φ_{c*} определяется по формуле:

$$\varphi_{c*} = [1 - 4 \cdot (1 - m_h) \cdot (1 - D)] \cdot (1 - m_h). \quad (5)$$

При $D = 1,0$ ($\alpha_{mp} = 1,0$): $\varphi_{c*} = 1 - m_h$; $\varphi_c = K_{h\ell} = \Gamma$.

Рис. 6. Зависимости $\varphi_c(m_l)$

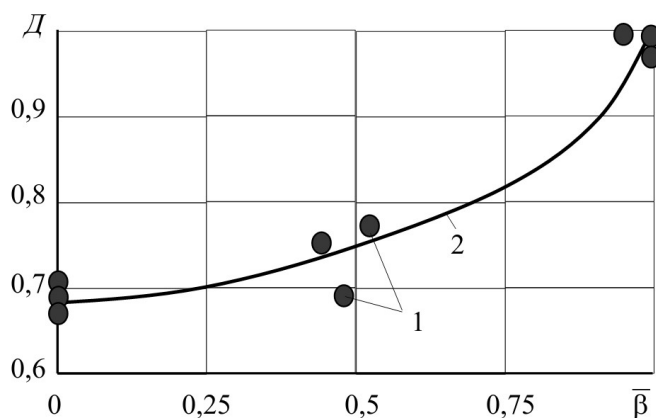
1, 2 – ГУП «ИПТЭР»; 3 – данные авторов (формула 4)

В большинстве случаев, механические повреждения (царапины, риски, задиры) можно моделировать в виде острого углового перехода (рис. 1). Базируясь на ранее проведенных нами экспериментальных исследованиях [1], можно показать, что при $D = 1,0$ трубы с трещинами и V-образными повреждениями (с радиусом закругления в вершине $\rho \approx 0,1$ мм) имеют одинаковые характеристики прочности. Это дает основание полагать, что параметр $\bar{\beta}$ соответствующим образом изменяет величину D (рис. 7):

$$D(\bar{\beta}) = D + (1 - D)\bar{\beta}^3. \quad (6)$$

При $\bar{\beta} = 0$ величина D устанавливается на основании формулы (2) в зависимости от исходных пластических характеристик.

Видно, что с ростом $\bar{\beta}$ отмечается увеличение деформационного параметра D и коэффициента трещиностойкости α_{mp} .

Рис. 7. Взаимосвязь D и $\bar{\beta}$:

1 – эксперимент (17ГС после термоупрочнения); 2 – по формуле (6)

Коэффициент прочности трубы с V-образными повреждениями φ_c определяется по формуле (4) с соответствующей корректировкой значение D в формуле (5).

Аналогичные закономерности установлены для труб с трещиноподобными повреждениями, ориентированными под различными углами по отношению к их продольной оси и радиальному направлению.

Выводы

Предложен и обоснован метод расчетного определения коэффициента прочности труб с многопараметрическими трещиноподобными повреждениями, образованными при их взаимодействии со скальным грунтом. Полученные результаты являются исходными для выполнения расчетов прогнозируемого и остаточного ресурса нефтепроводов и их базовых элементов.

Литература

1. Зайнуллин Р.С., Морозов Е.М., Александров А.А. Критерии безопасного разрушения элементов трубопроводных систем с трещинами. М: Наука, 2005. 316 с.
2. Зайнуллин Р.С., Александров А.А., Галлямов А.М. Расчеты малоцикло-вой долговечности элементов // Науч.-практ. изд. «Прикладная механика механо-химического разрушения». 2004. № 3. Уфа: МНТЦ «БЭСТС», С. 15-16.
3. Гумеров А.Г., Харисов Р.А., Галлямов А.М. Оценка сопротивления хрупкому и вязкому разрушениям труб с локализованными изменениями рабочих сечений // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. № 2 (84). С. 59 - 66.
4. Галлямов А.М., Кантемиров И.Ф., Шишков Э.О. Натурные испытания труб с локальными искажениями поверхностей // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2010. № 3 (81). С. 56 - 60.

EVALUATION OF RESISTANCE FAILURE OF PIPES WITH CHANGES OF NET SECTIONS

R.A. Kharisov, I.F. Kantemirov

Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia
e-mail: pipe-ufa@mail.ru

Sh.Z. Isaev

Vostokneftprovod LLC, Transneft JSC, Bratsk, Russia

R.S. Zainullin

Center of Pipeline Transport Hydraulics of RB Academy of Sciences, Ufa, Russia

Abstract. *This work is devoted to research and development of methods of estimation of resistance to brittle and ductile fracture of pipes with localized changes in the net sections.*

Proposed and justified method of calculation determining the coefficient of resistance of pipes with a multiparameter crack-damage formed during their interaction with the rocky soil. The results obtained are the starting point for calculations predicted and residual life of pipelines and their basic elements.

Keywords: *damage, corrosion-mechanical effect, temper, mode of deformation, crack-damage, stress concentration, fracture strength, plastic deformation*

References

1. Zainullin R.S., Morozov E.M., Aleksandrov A.A. Kriterii bezopasnogo razrusheniya elementov truboprovodnykh sistem s treshchinami (Safe destruction criteria for pipeline elements with cracks). Moscow, Nauka, 2005. 316 p.
2. Zainullin R.S., Aleksandrov A.A., Gallyamov A.M. Raschety malotsiklovoi dolgovechnosti elementov (Calculations of low-cycle durability of the elements), *Prikladnaya mekhanika mekhanokhimicheskogo razrusheniya*. Ufa, "BESTS", 2004. Issue 3, pp. 15-16.
3. Gumerov A.G., Kharisov R.A., Gallyamov A.M. Otsenka soprotivleniya khрупкому i vyazkomu razrusheniyam trub s lokalizovannymi izmeneniyami rabochikh sechenii (Evaluation of resistance to brittle and ductile failure of pipes with localized changes in the net section), *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*, 2011, Issue 2 (84), pp. 59 - 66.
4. Gallyamov A.M., Kantemirov I.F., Shishkov E.O. Naturnye ispytaniya trub s lokal'nymi iskazheniyami poverkhnostei (Full-scale testing of pipes with local surface distortions), *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*, 2010, Issue 3 (81), pp. 56 - 60.