

УДК 621.7:621.6(282.256.6)

Прогноз длительной прочности сварных соединений стыков труб дюкера ППМН ВСТО-1 через р. Лена

А.П. Аммосов, Ю.А. Яковлев, З.Г. Корнилова

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, г. Якутск

Вычислены напряжения в зависимости от конструктивно-технических особенностей параметров сварных соединений труб, так же обсуждается коррозионная повреждаемость основного металла труб и металла сварных соединений стыков труб нефтепровода. Произведен расчет концентраторов напряжений в местах сварных соединений труб. Дается прогнозная оценка развития коррозии в основном металле и металле сварных соединений. Выведена зависимость утонения стенки нефтепровода при различных объемах транспортируемой нефти. Определяются сроки утонения стенки и развития малоциклового усталости до предельно допустимых деформаций в области концентраторов. Обобщены данные по долговечности труб ППМН, соответствующие проектным срокам эксплуатации. Исходя из этих данных, выполнен качественный прогноз наступления критической ситуации в металле ЗТВ корневых швов сварных соединений в зависимости от воздействия нефункциональных нагрузок.

Ключевые слова: трубопровод, дюкер, напряженно-деформированное состояние, давление, коррозия, нефть, малоцикловая усталость, концентратор напряжений.

The Forecast of Long-Term Strength of Welded Joints of Pipes of a Siphon of the Underwater Crossing of the Oil Pipeline ESPO(VSTO)-1 across the Lena River

A.P. Ammosov, U.A. Yakovlev, Z.G. Kornilova

Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

In this paper stresses depending on constructive and technical features of welded pipe joints parameters are evaluated. Also corrosion of a pipe base metal and welds metal of a pipe joints of a main gas pipeline is discussed. A calculation of stress concentrators in the field of welded pipe joints is carried out. It provides a predictive assessment of corrosion of the base metal and weld metal. The dependence of an oil pipeline wall thinning at various volumes of transported oil is derived. Terms of wall thinning and low-cycle fatigue development to the limit values of deformations in the concentrators are defined. The data on the durability of UTP pipes, matching a design lifetime is summarized. Based on these data the qualitative forecast of the onset of the critical situation in the HAZ metal of root welds depending on the impact of non-functional loading is made.

Key words: main gas pipeline, siphon, stress-strained state, pressure, corrosion, oil, heat affected zone (HAZ), low cycle fatigue, stress concentrator.

Введение

Северные нефтепроводные системы, особенно их подводные переходы, являются экологически крайне опасными объектами. Современ-

ное состояние подводного перехода магистрального нефтепровода (ППМН) всей трубопроводной системы России, а также строительство ППМН ВСТО вызывают особую и обоснованную озабоченность всех жителей РФ и РС(Я). По сравнению со средней полосой Российской Федерации экологические проблемы в Якутии могут стать еще более угрожающими при аварийных разливах нефти по всей трассе и, особенно, на ППМН через малые, средние и крупные реки.

АММОСОВ Александр Прокопьевич – д.т.н., проф.;
ЯКОВЛЕВ Юрий Аркадьевич – вед.электроник,
djukka@mail.ru; КОРНИЛОВА Зоя Григорьевна –
к.т.н., с.н.с.

Т а б л и ц а 1

Расчетные напряжения в сварном соединении нефтепровода ППМН через р. Лена

Расчетное местное повышение напряжений	Значения, МПа
$\sigma_{см}$ (12,3)	46,42
σ_{yz} (12,4)	24,30
$\sigma_{ов}$ (12,5)	0,35
$\sigma_{из}$	71,07

Магистральный нефтепровод представляет собой сложное инженерное сооружение, и его работа обеспечивается головной насосной перекачивающей станцией (НПС) и несколькими промежуточными. Отключение по технологическим и эксплуатационным причинам агрегатов НПС приводит к падению давления на ее участке и создает переменность (циклическость) в воздействии внутреннего давления на трубопровод.

При циклическом нагружении разрушение труб происходит с образованием трещин от накопления повреждений. Трещина возникает в самой напряженной зоне, а именно в зоне перехода от шва к основному металлу на внутренней поверхности трубы [1, 2]. Продвижение трещины от цикла к циклу проходит перпендикулярно к поверхности трубы по толщине стенки и вдоль образующей [3].

Существуют два характерных случая разрушения сварных труб. В первом случае трещина в процессе циклического нагружения распространяется на значительную длину вдоль образующей. При этом скорость роста начальной трещины вдоль образующей во много раз превышает скорость роста по толщине стенки трубы [3].

Второй случай характерен тем, что при циклическом нагружении трещина из очага зарождения с увеличением числа циклов нагружения интенсивно распространяется по толщине стенки, что приводит к образованию сквозной трещины (свища) длиной 20–70 мм. При давлении свыше 20 кгс/см² через такую трещину начинается утечка продукта перекачки. Остаточные деформации в зоне разрушения отсутствуют [3, 4].

Эксплуатационная прочность нефтепроводов существенно зависит от конструктивно-технологических параметров сварных соединений труб и напряженно-деформированного состояния последних.

Местное возмущение напряжений определяется прежде всего концентрацией напряжений (усиление шва, подрез, непровар) и изгибными эффектами (смещение кромок, угловатость сварного соединения, овальность сечения трубы).

Влияние формы усиления шва на концентрацию напряжений рассмотрено в работе [5].

Местное повышение напряжений (табл. 1), вызываемое изгибными эффектами в зоне сварного шва, в общем случае будет равно:

$$\sigma_{из} = \sigma_{см} + \sigma_{yz} + \sigma_{ов}, \quad (1)$$

где $\sigma_{см}$ – изгибные напряжения от смещения кромок; σ_{yz} – изгибные напряжения от угловатости сварного соединения; $\sigma_{ов}$ – изгибные напряжения от овальности сечения трубы [2].

Величину изгибных напряжений в случае смещения кромок можно рассчитать по формуле, данной в работе [6]:

$$\sigma_{см} = \pm \frac{3\Delta}{1 + (bk/2)} \sigma_n; k = \sqrt{\frac{6PD_{вн}}{E\sigma^3}}, \quad (2)$$

где σ_n – номинальные напряжения (безмоментная зона); $\Delta = h/\delta$ – относительное смещение; h – величина смещения кромок; $D_{вн}$ – внутренний диаметр трубы; E – модуль упругости.

Для расчета изгибных напряжений из-за угловатости в районе продольного сварного шва трубы можно использовать эмпирическую формулу, дающую наилучшую сходимость с экспериментальными данными работы [4]:

$$\sigma_{yz} = \pm \frac{6b}{\delta} \text{tg} \beta \sigma_n, \quad (3)$$

где β – угол между осью стенки трубы и осью сварного шва.

Местное повышение напряжений от изгибных эффектов, вызванных смещением кромок, угловатостью сварного соединения и овализацией сечения, приходится на зону концентрации напряжений сварного шва. При этом α_σ при растяжении и изгибе оказываются практически одинаковыми [7]:

$$\sigma_{ов} = \pm \frac{3U\sigma_n}{(\delta/R) [1 + 4(1 - \mu)^2 (P/E)(R/\delta)^3]}, \quad (4)$$

где R – номинальный радиус трубы; $U = (D_{max} - D_{min})/2R$ – овальность трубы.

Принимая это во внимание, максимальные напряжения в зоне сварного шва можно вычислить по формуле:

$$\sigma_{max} = \alpha_\sigma (\sigma_n + \sigma_{из}). \quad (5)$$

Известно, что расчет на прочность труб магистральных трубопроводов производится по предельному состоянию при статическом нагружении внутренним давлением. При этом не учитываются концентрация напряжений и изгибные эффекты, вызываемые указанными факторами (усиление сварного шва, смещение кромок сварного шва, угловатость в области продольного сварного шва, овальность поперечного сечения). Уровень напряжений в трубе определяется выражениями из [8]:

$$\sigma_n = PD_{вн}/2\delta \leq R_1/n = [\sigma], \quad (6)$$

где $R_1 = R_1''m/K_1K_n$; P – рабочее давление в трубопроводе; n – коэффициент перегрузки рабочего давления в трубопроводе, принимаемый обычно равным 1,1; R_1 – расчетное сопротивление металла трубы; R_1'' – нормальное сопротивление, принимаемое равным временно-сопротивлению материала трубы; $m=0,9$; $K_1=1,55$ – коэффициент безопасности по материалу труб для прямошовных экспандированных труб из углеродистой стали, свариваемых двухсторонним швом дуговым методом (в основном используемых на нефтепроводах); $K_n=1,0$ – коэффициент надежности для нефте- и продуктопроводов с условным диаметром до 1000 мм.

Определение упругопластических коэффициентов концентрации напряжений (табл. 2) может быть выполнено с привлечением интерполяционного соотношения Нейбера [9]:

$$\alpha_\sigma^2 = K_\sigma K_e \text{ или } \alpha_\sigma^2 = K_S K_e, \quad (7)$$

либо модифицированного варианта зависимости:

$$K_e = \alpha_\sigma^{2/(1+m)} \bar{\sigma}^{-(1-m)/(1+m)} / (\alpha_\sigma \bar{\sigma})^{n(1-m)/(1+m) [1-(\bar{\sigma}-1/\alpha_\sigma)]}$$

при $\bar{\sigma} \leq 1$,

$$K_e = \alpha_\sigma^{2/(1+m)} / (\alpha_\sigma \bar{\sigma})^{n(1-m)/(1+m) [1-(\bar{\sigma}-1/\alpha_\sigma)]} \quad (8)$$

при $\bar{\sigma} \geq 1$.

Характерно, что независимо от типа материала и зон сварного соединения данные по долговечности образцов при жестком нагружении образуют единую полосу разброса [4]. Аналитическим выражением кривой малоциклового разрушения (появление трещины) может быть

уравнение Мэнсона в форме [10]:

$$\frac{1}{2} \varepsilon = \frac{1}{2} \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0,6} N^{-0,5} + 1,75 \frac{\sigma_e}{E} N^{-0,12}. \quad (9)$$

В работах [3, 4, 9] показано, что в зависимости от изменения в пределах максимального, среднего и минимального значений ψ и σ_e кривая малоциклового разрушения в зависимости от числа циклов несколько меняется.

Используя расчетные формулы и данные наших исследований, нами выполнен качественный расчет действующих напряжений.

С учетом всех коэффициентов $[\sigma]=0,53\sigma_b$, т.е. в зоне номинальных напряжений, материал трубопровода работает в пределах упругости (для низколегированных сталей $\sigma_m/\sigma_b > 0,64$).

Качественный прогноз коррозионного повреждения сварных соединений ППМН через р. Лена

Особую актуальность имеет рассмотрение коррозионных процессов в металле зоны термического влияния (ЗТВ) сварных соединений стыков труб дюкера ППМН через р. Лена. Для реализации этой задачи нами использованы данные натуральных и лабораторных исследований [11] с учетом технологии сварки стыков труб в полевых условиях в процессе протаскивания дюкера ППМН через р. Лена.

Для качественного прогноза коррозионного повреждения нами выполнен расчет возникновения максимальных напряжений в металле ЗТВ в продольном сварном соединении труб дюкера (рис. 1). Для расчета использованы результаты исследований [11].

Т а б л и ц а 2

Шов	Параметры шва						Коэффициент концентрации A_σ по (12.1)
	b , мм	r , мм	δ , мм	c , мм	h , мм	β , град	
Внешний	30±0,1	0,5±0,05	29±0,1	3±0,1	2±0,1	1±0,1	1,57
Внутренний	3±0,1	0,25±0,05		3±0,1			3,70

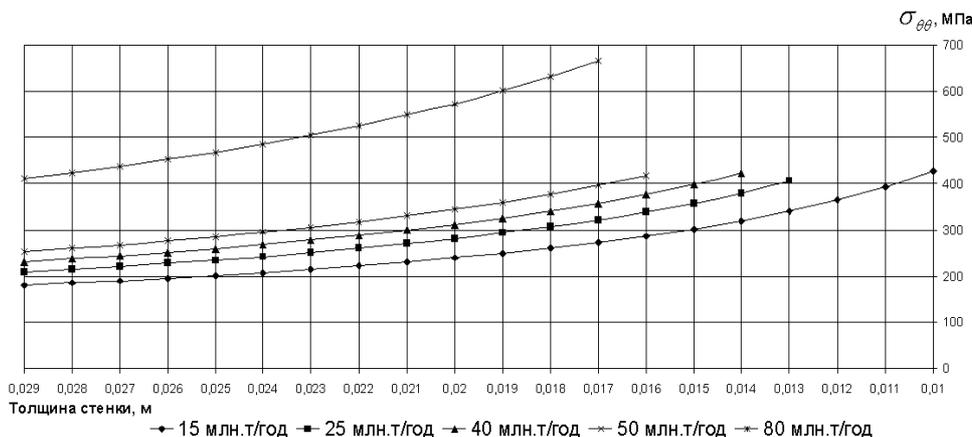


Рис. 1. Изменения значений максимальных напряжений в металле ЗТВ продольного шва в зависимости от расхода

Из рис. 1 видно, что с увеличением степени утонения стенки труб дюкера при учете коэффициентов концентрации напряжений значения максимальных напряжений возрастают. В свою очередь, с увеличением значения внутреннего давления и, соответственно, объема транспортируемой нефти значения максимальных напряжений в металле ЗТВ, соответствующих крити-

ческой величине ($\sigma_{кр} = \sigma_m$), достигаются при более большей толщине, чем в основном металле, стенки труб дюкера.

Аналогично вышеописанной методике также выполнен расчет максимальных напряжений в металле ЗТВ корневого и облицовочных швов сварного соединения стыков труб (рис. 2 и 3). Из этих данных видно, что процесс роста уров-

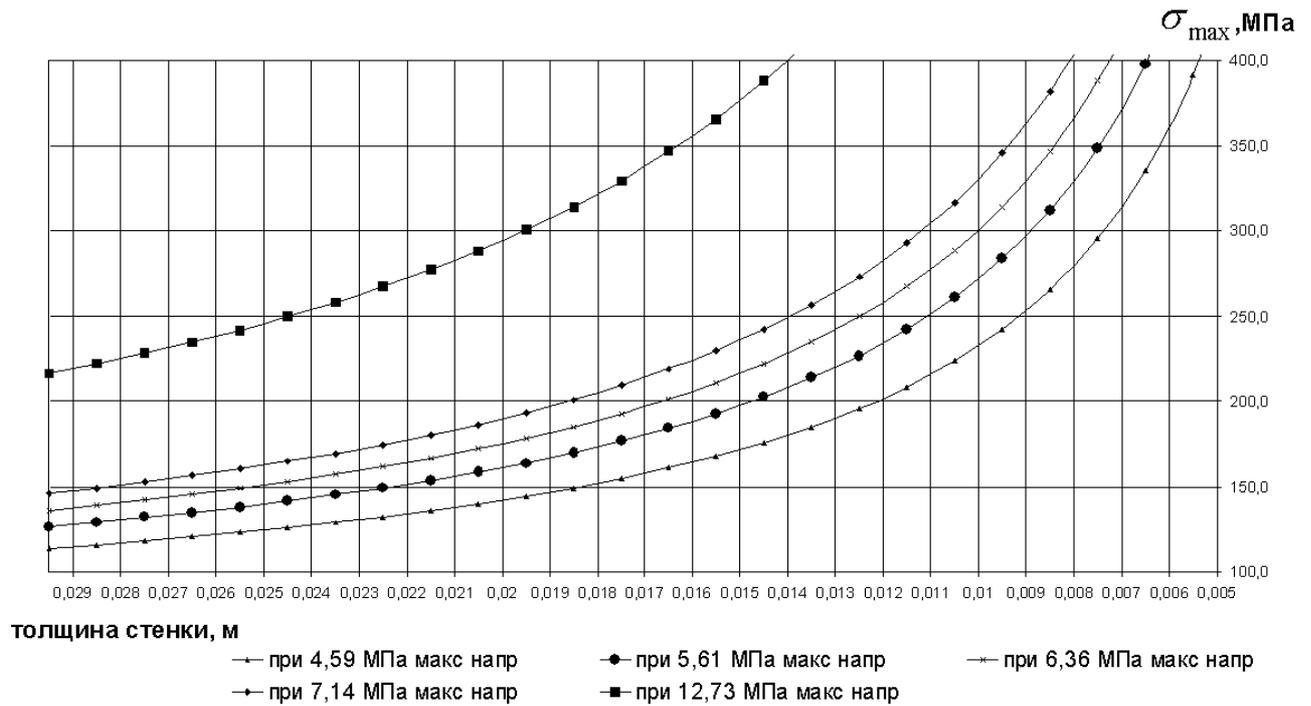


Рис. 2. Зависимость σ_{max} в металле ЗТВ облицовочного шва кольцевого сварного соединения стыков от коррозионного утонения толщины стенки труб

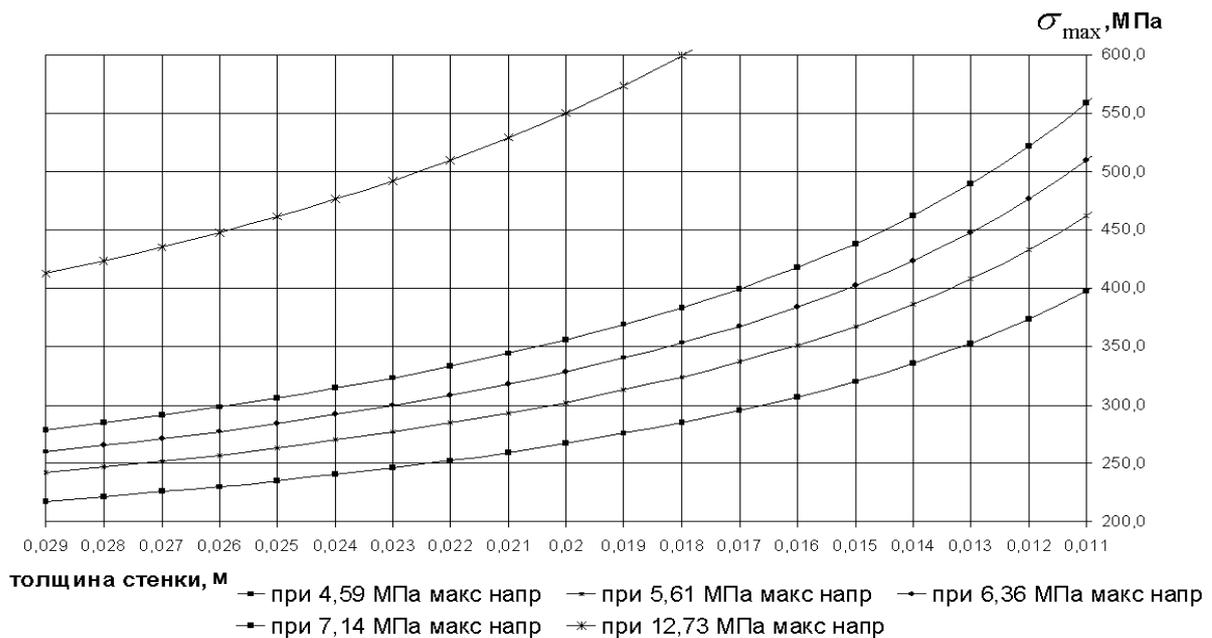


Рис. 3. Зависимость σ_{max} в металле ЗТВ корневого шва сварного соединения стыков от коррозионного утонения толщины стенки труб

ПРОГНОЗ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТЫКОВ ТРУБ ДЮКЕРА ППМН ВСТО-1

ня напряженно-деформированного состояния аналогичен предыдущему процессу. Например, значения максимальных продольных напряжений, равные пределу текучести металла ЗТВ облицовочного шва, достигаются с увеличением объема транспортируемой нефти при следующих толщинах стенки труб дюкера: 15 млн.т/год – $\delta = 5,5$ мм; 25 млн.т/год – $\delta = 6,65$ мм; 40 млн.т/год – $\delta = 7,45$ мм; 50 млн.т/год – $\delta = 8,5$ мм; 80 млн.т/год – $\delta = 14,4$ мм.

В металле ЗТВ корневого шва критические значения максимальных продольных напряжений ($\sigma_{\max \text{кр}} = \sigma_{\text{т ЗТВ}}$) достигаются при следующих значениях утонения стенки труб дюкера: 15 млн.т/год – $\delta = 11,5$ мм; 25 млн.т/год –

$\delta = 14,1$ мм; 40 млн.т/год – $\delta = 16,0$ мм; 50 млн.т/год – $\delta = 18,0$ мм. Полученные значения толщины связаны с высокими значениями σ_{zz} и коэффициента концентрации напряжений в области корневого шва.

Выполнен прогнозный расчет скорости коррозии металла ЗТВ корневого шва сварного соединения стыков труб дюкера (рис. 4, а). Приведенные результаты расчета показывают, что с увеличением уровня утонения стенки труб дюкера скорость коррозии интенсивно возрастает, особенно в области металла ЗТВ корневого шва (рис. 4, б).

Характерным является и то, что с увеличением объема транспортируемой нефти (внутренне-

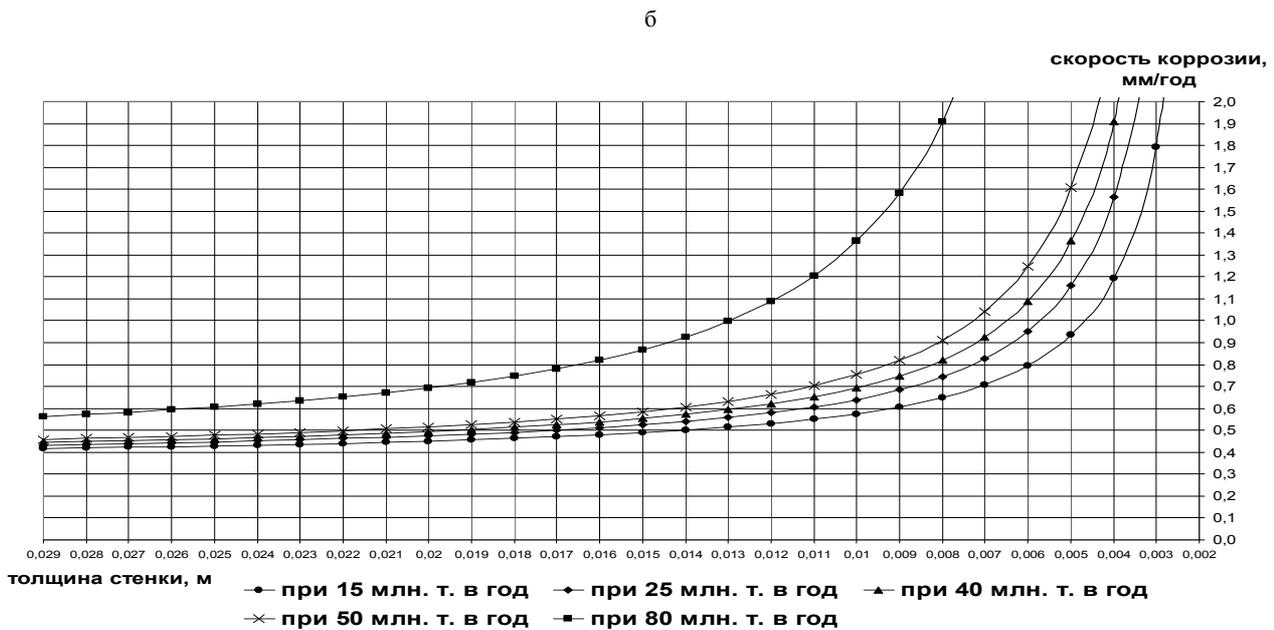
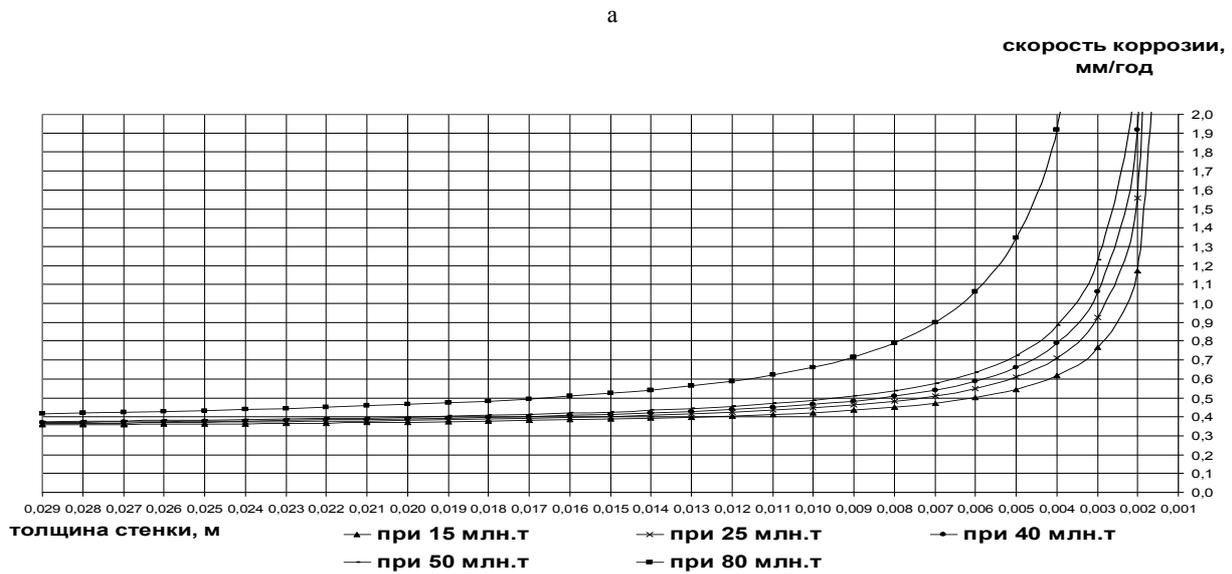


Рис. 4. Изменения скорости коррозии в металле ЗТВ при утонении стенки труб дюкера ППМН через р. Лена (а – облицовочный кольцевой шов; б – корневой шов)

го давления) скорость коррозии возрастает более интенсивно (рис. 4).

Процесс развития малоциклового усталости непосредственно связан с достижением действующих напряжений предела пропорциональности напряжений материала ($\sigma_{пл}$).

Результаты расчета приведены на рис. 5. Из этих данных видно, что с уменьшением количества циклов, т.е. при высоких значениях действующих напряжений, уровень развития упругопластических деформаций растет и приводит впоследствии к разрушению нефтепровода. С другой стороны уровень упругопластических деформаций в наиболее нагруженной зоне сварного соединения зависит от значения предела прочности (σ_b) металла этой зоны. Введя ограничение максимальной упругопластической деформации в области развивающегося концентратора напряжений, равным примерно 2,5%, получим для разных значений предела прочности следующие значения долговечности: при $\sigma_b = 796$ МПа и $\psi = 0,39\%$ – ~ 390, 716 МПа и $\psi = 0,46\%$ – ~ 450, 686 МПа и $\psi = 0,48\%$ – ~ 470, 570 МПа и $\psi = 0,55\%$ – ~ 520, 480 МПа и $\psi = 0,5\%$ – ~ 430 циклов.

При принятии расчетной долговечности металла ЗТВ сварных соединений трубопровода на уровне $7 \cdot 10^3$ обеспечивается уровень упругопластических деформаций от 0,68 до 0,79 %.

Исходя из вышеизложенных результатов экспериментальных и расчетных зависимостей, можно сделать качественный прогноз наступления критической ситуации на ППМН через

р. Лена с учетом развития сплошных и локальных коррозионных повреждений в основном металле и ЗТВ сварных соединений дюкера. При допущении того, что скорость начальной коррозии соответствует 0,3 мм в год, то при уровнях внутреннего давления, равных 4,59 МПа (15 млн. т/год); 5,61 МПа (25 млн. т/год); 6,36 МПа (40 млн. т/год); 7,14 МПа (50 млн. т/год) и 12,73 МПа (80 млн. т/год), достижение $\sigma_{кр} = \sigma_T$ на стенке труб дюкера ППМН через р. Лена произойдет примерно через 73,83; 68,83; 65,0; 41,7; 33,3 лет соответственно.

При этих же допущениях начальной скорости коррозии в ЗТВ продольных сварных соединений и росте давлений от 4,59 до 7,14 МПа, достижение $\sigma_{кр} = \sigma_T$ произойдет примерно через 59,67; 51,3; 45,33; 39,0 лет соответственно.

Результаты расчетных данных максимальных продольных напряжений ($\sigma_{zz \max}$) в металле ЗТВ обличовочного кольцевого шва сварного соединения труб дюкера в стык при этих же допущениях начальной скорости коррозии и таком же росте давлений от 4,59 до 12,73 МПа показывают, что достижение $\sigma_{кр} = \sigma_T$ произойдет примерно через 80,0; 74,6; 71,8; 69,0 и 48,7 лет соответственно.

Согласно расчетным данным максимальных продольных напряжений ($\sigma_{zz \max}$) в металле ЗТВ корневого шва сварного соединения труб в стык при этих же допущениях начальной скорости коррозии и росте давлений от 4,59 до 7,14 МПа, достижение $\sigma_{кр} = \sigma_T$ произойдет через 59,0; 50,7; 44,5; 38,3 лет соответственно.

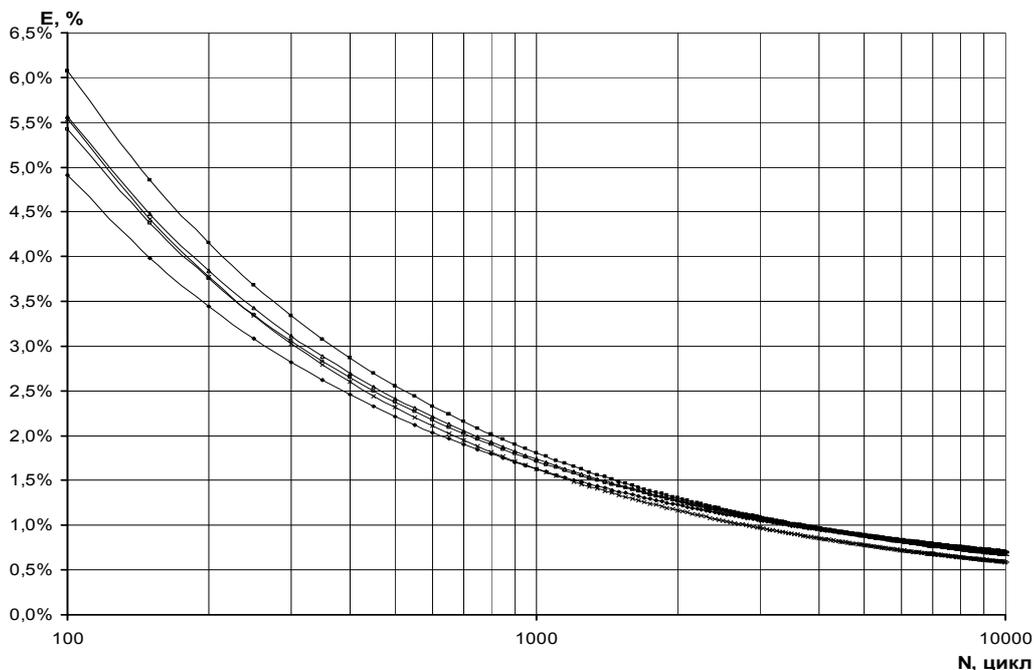


Рис. 5. Зависимость упругопластической деформации от числа циклов металла ЗТВ

Аналогичный качественный прогноз наступления критической ситуации (допустимой упругопластической деформации, равной $\varepsilon = 2,5\%$ в области концентрации напряжений) в металле ЗТВ корневых швов сварных соединений при достижении действующих напряжений σ_{nc} и среднем значении количества остановок и пусков примерно 100 (150) циклов в год и тех же уровнях роста давлений от 4,59 до 7,14 МПа произойдет в среднем примерно через 55,5 (54,0); 45,2 (43,7); 37,8 (36,0); 30,0 (28,5) лет соответственно.

Выводы

Обобщение этих данных показывает, что долговечность труб ППМН через р. Лена соответствует общепринятым проектным срокам эксплуатации подводных переходов нефтепроводов, равным 30 годам. Но в зависимости от воздействия нефункциональных нагрузок (заторных и паводковых явлений, наводнений, изменений профиля дна реки и дна траншеи, а также температуры среды, остаточных усилий от технологического процесса протаскивания дюкера, выталкивающих сил барража склоновых грунтовых вод и т.д.) сроки безопасной эксплуатации ППМН через р. Лена могут значительно сократиться.

Литература и источники

1. Гутман Э.М., Амосов Б.В., Худяков М.А. Влияние коррозионной усталости материала нефтепроводов на их надежность // Нефтяное хозяйство. 1977. № 8. С. 59–62.
2. Илюшин Н.В., Лейфрид А.В., Валеев А.С., Ривкин П.Р. Коррозия внутренней поверхности

нефтеборных промысловых нефтепроводов // Нефтяное хозяйство. 2002. № 3. С.85–86.

3. Гусенков А.П. Прочность при изотермическом и неизотермическом малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1979. 294 с.

4. Гуселков А.П., Аистов А.С. Исследование малоциклового прочностного поведения труб большого диаметра магистральных газо- и нефтепроводов // Машиностроение. 1975. № 3. С.61–71.

5. Навроцкий Д.И. Прочность сварных соединений. М.:Л.: Машгиз, 1961. 176 с.

6. Макаров И.И., Емельянова Т.М. Концентрация напряжений в сварных стыковых соединениях со смещением кромок // Труды МВТУ им. Баумана, № 133. М.: Машиностроение, 1969, С. 29–41.

7. Труфяков В.И., Осауленко Л.Л., Корягин Ю.А. Концентрация напряжений в сварных стыковых соединениях // Автоматическая сварка. 1966. № 10. С. 42–49.

8. СНиП-11-45-75. Строительные нормы и правила, нормы проектирования, магистральные трубопроводы. М., 1975. 62 с.

9. Фокин М.Ф., Гусенков А.П., Аистов А.С. Оценка циклической долговечности сварных труб магистральных нефте- и продуктопроводов // Машиноведение. 1984. № 6. С. 49–55.

10. Manson S.S. Fatigue A Complex-Some simple Approximations. Experimental Mech., 1965. V. 5, № 7.

11. Отчет по ГК №018-2009 «Экологическая безопасность перехода нефтепровода ВСТО через реку Лена с учетом оценки надежности сварных соединений подводного перехода магистрального нефтепровода». Якутск, 2009.

Поступила в редакцию 25.10.2016

УДК 622.685; 620.178.169

Исследование стойкости к гидроабразивному износу стеклопластиковых труб с полиуретановым покрытием

К.П. Антоев^{*,**}, С.Н. Попов^{*}

^{*} Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

^{**} Северо-Восточный федеральный университет им.М.К. Аммосова, г. Якутск

Приведены результаты исследования стойкости к гидроабразивному воздействию стеклопластиковых труб, в том числе с полиуретановым покрытием, которые используются при гидротранспорте

АНТОЕВ Карл Петрович – инженер, аспирант, antoevkr@gmail.com; ПОПОВ Савва Николаевич – д.т.н., проф., зам. директора.