

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №5, Том 12 / 2020, No 5, Vol 12 <https://esj.today/issue-5-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/64SAVN520.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Муравьева Л.В., Овчинников И.Г. Безопасность морских трубопроводов при повреждении // Вестник Евразийской науки, 2020 №5, <https://esj.today/PDF/64SAVN520.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Muravieva L.V., Ovchinnikov I.G. (2020). Safety of offshore pipelines in case of damage. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 5(12). Available at: <https://esj.today/PDF/64SAVN520.pdf> (in Russian)

**УДК 64.066.88:629.438.2:589.319**

**Муравьева Людмила Викторовна**

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия

Доцент

Доктор технических наук, доцент

E-mail: E-mail [rfludmia@yandex.ru](mailto:rfludmia@yandex.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=212548](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=212548)

**Овчинников Игорь Георгиевич**

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия

Профессор

Доктор технических наук

E-mail: [bridgesar@mail.ru](mailto:bridgesar@mail.ru)

## **Безопасность морских трубопроводов при повреждении**

**Аннотация.** Разработка новых технологий призывает к осторожности при использовании как старых, так и новых идей.

Трубопроводы – один из самых безопасных способов транспортировки нефти и газа. Однако в трубопроводах наблюдаются дефекты, трещины. Поэтому оценка этих дефектов очень важна для дальнейшей безопасной эксплуатации морского трубопровода. Безопасность морских подводных трубопроводов из высокопрочной стали с продольно ориентированным дефектом в виде продольной полуэллиптической несквозной трещины при нагружении рабочим давлением является актуальной проблемой и представляет теоретический и практический интерес.

Авторами представлены современные методы оценки трещиностойкости высокопрочных сталей. Рассмотрен инженерный подход к оценке дефектов труб из высокопрочной стали. Строительство нового высокопрочного трубопровода связано с оценками материала на прочность, трещиностойкость, целостность, оценкой сопротивления внешним природным воздействиям в том числе и сейсмическим.

Строительство нового высокопрочного трубопровода связано с оценками материала на прочность, трещиностойкость, целостность, оценкой сопротивления внешним природным воздействиям в том числе и сейсмическим.

В статье рассматриваются высокопрочные трубопроводы из новой стали, используемые на шельфе, её механические свойства, пригодность для безопасного использования с точки зрения разрушения и статической прочности. Рассмотрены современные методы оценки

дефектов (повреждений) трубопроводов из высокопрочного материала. Целью данного исследования является оценка влияния дефектов на эксплуатацию газопровода с учетом рабочего давления газа.

**Ключевые слова:** морские трубопроводы; высокопрочные стали; трещиностойкость; безопасность; эксплуатация; дефекты; трещины

## Введение

Морские трубопроводы изготавливаются из высокопрочных углеродистых сталей нескольких марок в зависимости от размеров, внутреннего рабочего давления, изгибных и продольных напряжений, ожидаемых при строительстве, а также ожидаемых условий окружающей среды. Транспортировка природного газа по трубопроводам удобна и экономически привлекательна на суше. Для морской транспортировки природного газа применение трубопроводов становится сложной задачей, поскольку изменяются и глубина воды, и расстояние транспортировки.

Многие мелкие продольные трещины появляются на поверхности трубы при ее изготовлении на сталелитейном заводе. Однако до того, как кислота вытравит с поверхности ржавчину этот дефект трудно обнаружить. Трещины возникают на внешней поверхности трубопровода и могут расти как по глубине, так и по поверхности. Трещины располагаются либо на внутренней, либо на внешней поверхности трубы и подвергаются двум различным видам нагружения – внутреннему давлению и растяжению, применяемым отдельно. Для газопровода из высокопрочного материала пластические деформации становятся обширными еще до того, как трещина достигает нестабильности.

Трубопроводы в процессе длительной эксплуатации изнашиваются, стареют, их надежность, и безопасность неуклонно снижаются.

Существует несколько распространенных методов оценки трещиностойкости трубопроводов. Эти методы используют линейную упругую механику разрушения (ЛУМР).

## Материалы и методы

Реализация мегапроектов основана на новых требованиях, технологиях. Разработка новых технологий призывает к осторожности, анализу старых идей. Строительство нового трубопровода из высокопрочной стали связано с оценками материала на прочность, трещиностойкость, целостность, и оценкой сопротивления внешним природным воздействиям, в частности, сейсмическим. На рисунке 1 представлен вариант схемы проекта «Газпрома».

Высокопрочные стали (с пределом текучести  $> 500$  МПа обычно  $700$  МПа) все чаще используются в морских конструкциях. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными сталями, особенно там, где важен вес.

В настоящей статье рассматриваются трубопроводы из высокопрочной стали, используемые на шельфе, для высокопрочных сталей (предел текучести  $> 500$  МПа) существует очень ограниченный объем данных. Основные особенности высокопрочных сталей: «Прочность сталей заключается в том, что предел текучести увеличивается на  $50\%$ , что приводит к увеличению проектной мощности лишь на  $10\%$ . Увеличение мощности на  $10\%$ , как правило, не компенсирует больших затрат, интуитивное ожидание инженеров заключается в том, что мощность увеличится также на  $50\%$ , что обосновано в обширной работе, выполненной в рамках совместного отраслевого проекта Крэнфилдского университета по высокопрочным сталям для шельфа [1].



Источник: <https://snob.ru/selected/entry/20066>

**Рисунок 1.** Вариант схемы газопроводов проекта – «Юго-западный коридор» из Алжира, Ливии газа в страны ЕС; трубопроводы: «Зеленый поток Mediterranean», «Магриб-Европа», «Medgaz», а также т «Транс-Сахарский» и «GALSI» (источник <https://snob.ru/selected/entry/20066>)

Трубы большого диаметра из стали марки X100 или выше в настоящее время являются промышленно производимыми, их использование экономически целесообразно для строительства магистральных газопроводов [1; 2]. При применении этих труб возникает ограничения, связанные с конструктивной надежностью, не ясен один из существенных моментов, связанных с поведением при разрушении этих новых материалов, переходом к пластичному или к хрупкому разрушению и способность к остановке разрушения. Поведение этих новых материалов в указанной области, к сожалению, лежит за пределами области, охватываемой экспериментальными данными, экстраполяция которых возможна, но не надежна; это приводит к необходимости расширения области применения эмпирических моделей.

Многие научно-исследовательские центры разработали специальные полномасштабные и лабораторные программы испытаний при поддержке отраслей промышленности и комитетов органов власти, таких как ECSC (европейское сообщество угля и стали) и EPRG (European Pipeline Research Groups) Европейская Исследовательская Группа Трубопроводов.

Проектирование трубопроводов из новых материалов вызвало большой интерес к стандартизации не только в нефтегазовой отрасли промышленности, но и на нефтеперерабатывающих заводах, химических заводах, электростанциях, то есть там, где используются напорные трубопроводы для технологических процессов. Эти отрасли промышленности признали четкую связь между адекватной (надежной) конструкцией трубопроводов и безопасностью.

Исследование поведения труб из сверхвысокопрочных сталей при наличии осевых напряжений, поверхностных дефектов стратегически важно для проверки применимости существующих критериев разрушения материалов.

В последние годы по этой теме проведены специальные исследования, и результаты испытаний стали X100 [14] демонстрируют, что обычные формулы также могут использоваться для безопасного прогноза отказа труб X100, как и для низких марок сталей, найденных для труб с более высоким отношением  $Y/T$  (yield-to-tensile strength).

В общем случае способность уравнения Баттелла правильно предсказывать отказ трубы из стали X100 также хороша, как и для низкосортных сталей.

Несмотря на малое количество испытаний ожидаемый вредный эффект обусловленный, упрочняющей способностью материалов линейных труб X100 не влияет на надежность, и исследователи отмечают толерантность требований к дефектам.

Критерии оценки устойчивости стальных трубопроводов из труб X100 к инициированию разрушения от осевых дефектов установлены на основе исторических работ Баттелла.

Производители труб и операторы установок хотят предотвратить травмы, гибель людей и материальный ущерб, который возникает в результате выхода из строя герметичной трубопроводной системы.

Ряд вопросов, связанных со строительством, проектированием, спецификацией проведения сварочных работ, деформируемостью труб открыт и является одной из основных проблем применительно к трубопроводам из высокопрочных материалов.

Контроль распространения трещин является чрезвычайно важным аспектом конструкций для транспортировки газа.

Для правильного учета перелома металла принята методология (СТОА Crack Tip Opening Angle) в качестве параметра ударной вязкости. Этот подход основан на балансе между возможностями стали противостоять распространению трещин (критическим значением СТОА<sup>1</sup> стали) измеренное в лаборатории с помощью процедуры испытаний и приложенной движущей силы, от внешних нагрузок, рассчитанных с помощью конечно-элементной программы.

Для стальной линейной трубы X100 фактические результаты распространения трещин показывают, что такой класс стали лежит на границе остановки/распространения трещин, фактические результаты сильно зависят от условий эксплуатации (коэффициент использования, тип газа, режим работы, температура); в наиболее тяжелых случаях необходимым внешние механические устройства, т. е. трещиноуловители.

В последние годы часто проводятся полномасштабные испытания на разрыв с использованием сверхвысокопрочных стальных труб x100 или x120 для проверки их трещиностойкости зависимость только от трещиноуловимости любой сверхвысокопрочной стальной трубы недостаточна.

---

<sup>1</sup> Разработка методики проведения испытаний для определения угла раскрытия вершины трещины СТОА металла труб после полигонных пневмоиспытаний. Величина угла раскрытия вершины трещины (СТОА – Crack Tip Opening Angle) как характеристика сопротивления материалов распространению вязкой трещины широко используется для тонколистовых материалов, применяемых в авиастроении, а с 90-х годов прошлого века ведутся работы по применению этой характеристики для материалов трубопроводов.

В работе [8] проведены полномасштабные испытания на разрыв X100 с использованием динамического пластического разрушения<sup>2</sup>. Разработанная новая методика позволила провести детальный анализ распределения напряжений и пластических деформаций<sup>3</sup> [8].

Существует несколько методов оценки трещиноподобных дефектов трубопроводов; API 579, BS7910 (British Standards Institute<sup>4,5</sup>, BSI-10 2000), NG18<sup>6</sup>. Все они успешно использовались для оценки трещинных дефектов, но степень консерватизм и чувствительность к различным входным параметрам неизвестны.

При исследовании разрыва X100 впервые в мире была отмечена четкая остановка трещин на небольшом расстоянии с обеих сторон. Демонстрация испытаний трещиностойкости линейной трубы X100 была успешной. Для поведения распространяющегося разрушения сдвига была разработана технология оценки трехмерного процесса разрушения<sup>7</sup>.

С начала 70-х годов проводились исследовательские работы по теме развития разрушения сдвига. Разработана конечно-элементная модель (PICPRO®), способная к имитации динамического развития пластического разрушения и модель ограничителя трещин, которая успешно использовалась при проектировании ограничителей трещин на линии X100 компании BP.

Кривая декомпрессии газа определяется вычислениями изменения давления внутри трубы, имеющей полубесконечную длину, из-за адиабатического расширения, когда конец трубы делается открытым. Для оценки кривой скорости трещины доступны две формулы: формулу Баттелла<sup>8</sup>, предложенную мемориальным Институтом Баттелла США, и Формула HLP, предложенная Комитетом HLP Института железа и стали Японии.

Обе формулы являются полуэмпирическими. Они позволяют проводить точные оценки, основанных на исходных экспериментальных данных, используемых в процессе их разработки, но сфера их применения ограничена.

Оценка кривой декомпрессии газа, вычислить характеристики материала и скорость развития трещины (4), здесь P, A, ρ, u и w обозначают уровень давления декомпрессионного

---

<sup>2</sup> Eiber, R.J. et al.: Отчет по технологиям контроля трещиноватости трубопроводов природного газа. Columbus, Battelle, 1993.

Ротвелл, А.Б.: 3-я Международная конференция по технологиям для трубопроводов. Том I, Бельгия, 2000, стр. 387.

<sup>3</sup> Трехмерного интерактивного моделирования динамического пластического разрушения.

<sup>4</sup> BS7910 (British Standards Institute, BS 7910. "Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures").

<sup>5</sup> Руководство по методам оценки приемлемости дефектов в металлических конструкциях.

<sup>6</sup> B31G вычисляет оставшуюся силу (несущую способность) на основе параболической области (0,85 L\*d) корродированная область.

<sup>7</sup> Система PICPRO® – Код включает в себя упругопластические элементы оболочки большого смещения и явно интегрирует их во времени через центральную разностную схему. PICPRO® предлагает специальные функции, посвященные заглубленные газопроводы при распространении пластического разрушения возникают. Более подробно СТОА рассматривается как доминирующий параметр распространения трещины и его значение используются для проверки устойчивости распространения трещин.

<sup>8</sup> В 2000 году на основе исследований, проведенных в Институте Баттелла, предложена методология определения напряжения в стенках трубопровода с дефектами, для сталей трубы с высокой энергией упругой

деформации, для дефектных участков 
$$\sigma_h = \sigma_f \left( 1 - \frac{d}{wt} M \right).$$

газа, скорость звука, плотность жидкости, скорость потока и скорость движения декомпрессионной волны соответственно.

В областях высокого давления, где используется сверхпрочная стальная труба, точность оценок скорости трещины с использованием формулы Баттелла или формулы HLP, зависит от размера стальной трубы.

Исходя из данных:

- геометрические параметры:

$$D_0 = 1219.2(mm), t_0 = 18.3(mm); \quad \alpha = 0.670 \times \left(\frac{D}{D_0}\right)^{1/4};$$

$$\beta = 0.393 \times \left(\frac{D}{D_0}\right)^{5/2} \times \left(\frac{t}{t_0}\right)^{-1/2}; \quad \gamma = \frac{3.42}{3.22 + 0.20 \times \left(\frac{t/D}{t_0/D_0}\right)^3}; \quad (1)$$

- параметры нагрузки;

$$\sigma_{flow} = (\sigma_y + \sigma_T) / 2; \quad (2)$$

- сопротивление материала:

$$R = D_p(est) = 3.29 \times t^{1.5} \times C_v^{0.544}; \quad (3)$$

- скорость трещины:

$$V_c = \alpha \times \frac{\sigma_{flow}}{\sqrt{R}} \times \left(\frac{P_d}{P_a} - 1\right)^\beta; \quad (4)$$

- давление остановки трещины:

$$P_a = \gamma \times 0.380 \times \frac{t}{D} \times \sigma_{flow} \times \cos^{-1} \exp\left(\frac{-4.57 \times 10^7 \times R}{\sqrt{Dt} \times \sigma_{flow}^2}\right); \quad (5)$$

Здесь  $V_c$  – скорость трещины (м/с);  $\sigma_{flow}$  – напряжение потока (МПа);  $R$  – сопротивление материала (джоули/мм<sup>2</sup>);  $P_d$  – давление на вершине трещины (МПа);  $P_a$  – давление остановки трещины (МПа);  $t$  – толщина стенки трубы (мм);  $D$  – диаметр трубы (мм);  $\sigma_y$  – предел текучести (МПа);  $\sigma_T$  – предел прочности при растяжении (МПа);  $D_p(est)$  – расчетное значение энергии пре-трещины DWTT (джоули);  $A_p$  – площадь связи энергии пре-трещины DWTT (мм<sup>2</sup>);  $C_v$ , полноразмерная энергия Шарпи (джоули).

Разработанная формула скорости трещины характерна тем, что три константы, построенные в обычных формулах (Battelle/HLP) по ограниченным экспериментальным данным, заменяются переменными ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), заданные как функции размера стальной трубы (диаметра и толщины стенки). Кривые скорости трещины, постепенно приближаются к кривым, оцениваемым обычными формулами.

Динамическое пластическое разрушение в трубопроводе природного газа, определяется взаимной интерференцией между скоростью декомпрессии газа  $V_m$  в процессе разрушения и скоростью развития трещины  $V_c$ . Если  $V_m$  и  $V_c$  заданы как функции давления  $P$ , выраженные уравнениями (4 и 5), справедливы при следующих допущениях:

1. давление на вершине трещины задается как уровень давления волны сжатия, которая начинает распространяться одновременно с разрушением;
2. скорость трещины определяется давлением на вершине трещины.

$$V_m = \frac{L}{T} = \frac{1}{T} \int V_c dT \quad (6)$$

$$\frac{dV_c}{dT} = \frac{dV_c}{dP} \times \frac{dP}{dV_m} \times \frac{dV_m}{dT} = \frac{dV_c / dP}{dV_m / dP} \times \frac{1}{T} \times (V_c - V_m) \quad (7)$$

Уравнение (6) показывает, что изменение скорости трещины можно рассчитать по  $V_m$  и  $V_c$ . Длину трещины можно рассчитать по следующему уравнению (7).

Впервые в мире на обоих концах трубы отчетливо наблюдалась короткая остановка трещины, что подтверждает, что стальная труба X100 обладает достаточной трещиностойкостью. Результаты испытаний способствуют использованию сверхвысокопрочных стальных труб для магистральных трубопроводов с ограничителями трещин.

С точки зрения предотвращения полного разрушения важно знать, к какому виду равновесия относится предельное состояние: устойчивое или неустойчиво, в первом случае существует опасность немедленного полного разрушения, такую трещину допускать нельзя. Необходимо выполнить анализ основной характеристики трещины. Коэффициент  $K_I$ , увеличивается с ростом и нагрузки.

В неустойчивом состоянии равновесия трещина начинает двигаться по достижении нагрузки критического значения, определяемого из критерия разрушения. Область неустойчивых состояний равновесия характеризуется неравенствами [4]:

$$\frac{d\sigma}{dl} < 0; \quad \frac{dK_I}{dl} > 0 \quad (8)$$

Трубопроводы природного газа подвержены динамическим пластическим трещинам, трещина может распространяться на большое расстояние со скоростью от 100 до 400 м/с.

Поверхностная трещина обычно располагается в области одной из составляющих растягивающего напряжения мембраны, или в области изгибающего напряжения, или в комбинации того и другого. Протяженность пластической зоны на вершине трещины невелика по сравнению с размерами трещины и трубопровода<sup>9</sup>.

Первые решения для полуэллиптических поверхностных трещин в пластине, подвергнутой одноосному растяжению или устойчивому изгибу, были получены из решений для эллиптической плоской трещины в бесконечном трехмерном теле. Полуэллиптические поверхностные трещины популярные формы дефектов в трубах и полых цилиндрах.

При моделировании трещин применяются методы конечных элементов. Конечно-элементные модели используют сингулярные элементы вдоль фронта трещины. Модели могут иметь около 6500 степеней свободы.

Коэффициенты полуэллиптической поверхностной трещины в цилиндрических сосудах высокого давления определяются с помощью трехмерных конечных элементов.

---

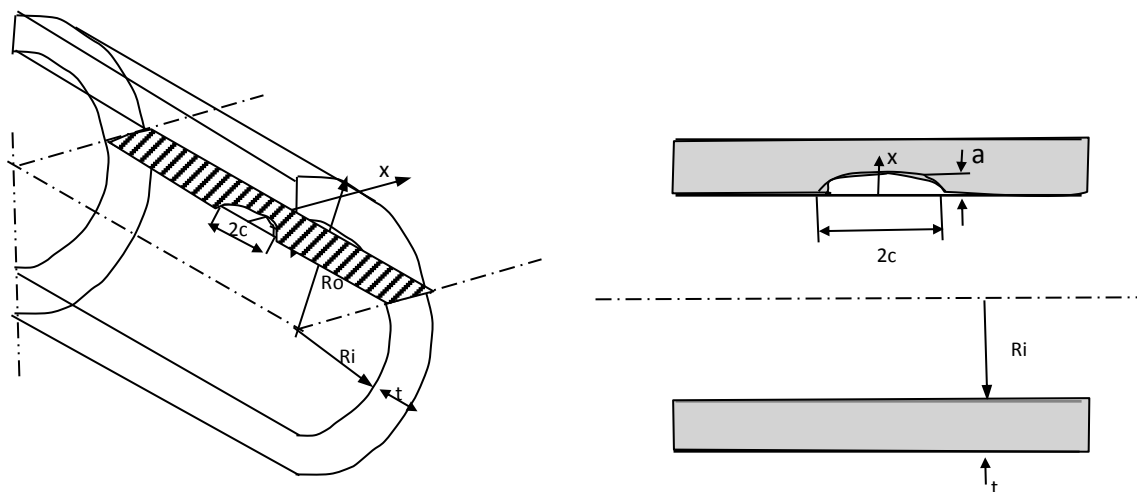
<sup>9</sup> ASTM, E1681-03, 2013, "Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials", ASTM International, West Conshohocken, PA. (<http://dx.doi.org.proxy2.library.illinois.edu/10.1520/E1681>).

Продольные полуэллиптические поверхностные трещины на поверхности внутреннего диаметра линейной трубы часто встречается в инженерных трубопроводах. Геометрия такой трещины показана на рис. 2, где  $p$  – внутреннее давление цилиндра,  $R_i$  – внутренний радиус цилиндра,  $D_0$  – наружный радиус цилиндра,  $t$  – толщина стенки,  $a$  – глубина поверхностной трещины,  $c$  – полудлина поверхностной трещины.

Коэффициент интенсивности напряжений для продольных полуэллиптических поверхностных трещин на Поверхность была исследована различными исследователями [10; 11; 17; 19].

Рассмотрим метод расчета коэффициента интенсивности напряжений полуэллиптической трещины на поверхности внутреннего диаметра цилиндра под давлением, описанный в документе API 579 Fitness-For-Service<sup>10</sup>. Коэффициент интенсивности напряжений в самой глубокой точке продольной полуэллиптической трещины на внутренней поверхности линейной трубы под внутренним давлением согласно Раджу и Ньюману [17].

Шен и Глинка [11] нашли весовую функцию для расчета коэффициента интенсивности напряжений в самой глубокой точке полуэллиптической трещины на внутренней поверхности цилиндра, как показано на рис. 1. Решение для продольной внутренней полуэллиптической трещины при нагружении внутренним давлением выполнялось интерполяции результатов по методу конечных элементов или аналитического решения.



**Рисунок 2.** Продольная полуэллиптическая трещина (рисунок разработан автором)

Метод API 579 использует пять коэффициентов  $G_i$ , первые два из которых,  $G_0$  и  $G_1$ , вычисляются из сопоставления с результатами по методу конечных элементов или таблиц [14],  $G_2$ ,  $G_3$  и  $G_4$ , вычисляются по условиям для первых двух коэффициентов на основе рассмотрения свойств весовой функции для трещины:

$$h(x, a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(a-x)}} \left( 1 + M_1 \left( 1 - \frac{x}{a} \right)^{0.5} + M_2 \left( 1 - \frac{x}{a} \right) + M_3 \left( 1 - \frac{x}{a} \right)^{1.5} \right) \quad (9)$$

где  $a$  – глубина трещины, а  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  – параметры, зависящие от геометрической формы цилиндра. Отметим, что  $h(x, a)$  в уравнении (9), обозначает  $y$  – компоненту весовой функции. Коэффициент интенсивности напряжений при заданном распределении напряжений,

<sup>10</sup> API 579-2/ASME FFS-2 2009 Fitness-For-Service Example. Problem Manual, 374 p. API 579-1/ASME FFS-1, 2007, API Product No: C57921, Washington, DC 20005-4070.



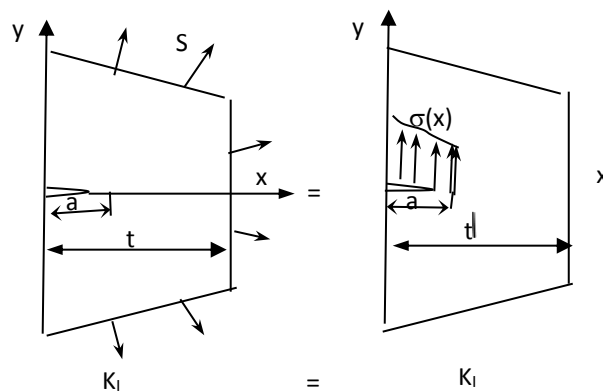
приложенных на поверхностях трещин,  $\sigma(x)$ , (при  $x$  измеряемой от внутренней поверхности цилиндра) равен:

$$K_I = 2 \int_0^{\infty} \sigma(x) h(x, a) dx \quad (10)$$

Закон распределения напряжений представлен на рис 2:

$$\sigma_n(x) = \sigma_i \left( \frac{x}{a} \right)^n \quad (11)$$

Основываясь на принципе линейной суперпозиции, коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  трещины в твердом теле, нагруженном нагрузкой  $S$ , равен коэффициенту интенсивности напряжений  $K_I$  той же трещины в таком же твердом теле с поверхностными трещинами подвергаемому распределению напряжений  $\sigma(x)$ , которое развивается при нагружении  $S$  при отсутствии трещины, как показано на рисунке 3. Для расчета коэффициент  $K_I$  интенсивности напряжений трещиноватого твердого тела, показанного на рис. 3, необходимо рассчитать коэффициент интенсивность напряжений, обусловленный распределением внутренних напряжений  $\sigma(x)$  на поверхности трещины при нагружении  $S$ .



**Рисунок 3.** Линейный принцип суперпозиции для расчета трещиноватого твердого тела при нагружении  $S$  (рисунок разработан автором)

Основываясь на принципе линейной суперпозиции,  $K_I$  вычисляется путем сложения вкладов каждого отдельного члена уравнений (12.1–12.5) которые составляют:

1<sup>st</sup> term (uniform applied stress)

$$\sigma_0 = 2p \frac{R_o^2}{R_o^2 - R_i^2}; \quad K_{I0} = 2p \frac{R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} G_0 \quad (12.1)$$

2-е условие (линейное приложенное напряжение)

$$\sigma_1 = -2p \frac{R_o^2 a}{R_o^2 - R_i^2 R_i}; \quad K_{I1} = -2p \frac{R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \frac{a}{R_i} \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} G_1 \quad (12.2)$$

3-е условие (квадратичное приложенное напряжение)

$$\sigma_2 = 3p \frac{R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left( \frac{a}{R_i} \right)^2; \quad K_{I2} = 3p \frac{R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left( \frac{a}{R_i} \right)^2 \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} G_3; \quad (12.3)$$

4-е условие (кубическое приложенное напряжение)

$$\sigma_3 = -4p \frac{R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left( \frac{a}{R_i} \right)^2; \quad K_{I3} = -4p \frac{R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left( \frac{a}{R_i} \right)^2 \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} G_3 \quad (12.4)$$

5-е условие (применяются биквадратная напряжения)

$$\sigma_4 = 5p \frac{R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left( \frac{a}{R_i} \right)^4; \quad K_{I4} = 5p \frac{R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left( \frac{a}{R_i} \right)^4 \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} G_3 \quad (12.5)$$

Таким образом, сложение вышеперечисленных 5 слагаемых образуют соотношение для определения коэффициента интенсивности напряжений:

$$K_I = p \frac{R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \left[ 2G_0 - 2 \frac{a}{R_i} G_1 + 3 \left( \frac{a}{R_i} \right)^2 G_2 - 4 \left( \frac{a}{R_i} \right)^3 G_3 + 5 \left( \frac{a}{R_i} \right)^4 G_4 \right] \quad (13)$$

Четыре условия ( $G_j$  ( $j = 0,1,2,3$ )) в правой части уравнения (13) представляют собой коэффициент интенсивности напряжений, обусловленный нагружением поверхностей трещин постоянными, линейными, параболическими и кубическими распределениями напряжений, влияние давления в трубе внутреннего трубопровода аппроксимируются суммой этих слагаемых.

где  $p$  – внутреннее давление,  $R$  – средний радиус цилиндра,  $(R_i + R_o) / 2$ ,  $t$  – толщина стенки цилиндра,  $a$  – глубина трещины,  $s$  – половина длины трещины,  $R_i$  и  $R_o$  соответственно на внутреннем и внешнем радиусах цилиндра, а  $Q$  – коэффициент формы.

Результаты получены сочетанием расчетного и эмпирического подходов по методике для оценки Продольной несквозной полуэллиптической трещины в конструкции морского трубопровода.

## Результаты

Проведен анализ влияния повреждения на поведение трубопровода из высокопрочной стали X100, приводится пример расчета целостности мегатрубопровода.

По результатам анализа трубопровода с дефектом вычислены коэффициенты интенсивности динамических напряжений для продольной полуэллиптической трещины в толстостенном трубопроводе.

Достоверность научных положений обеспечивается: корректной математической постановкой задач при использовании соотношений механики деформируемого твердого тела, методов механики сплошных сред, механики разрушения; исследованиями других авторов [1], использованием нормативных методик в статье представлен инженерный подход к оценке дефектов (полуэллиптических несквозной поверхностной трещины на основе методики.

Необходимо учитывать внутреннее давление, создающее дополнительные напряжения в стенке сосуда.

В практике по оценке дефектов магистрального газопровода используют методики Газпрома [12]: методика оценки технического состояния и целостности газопроводов, по оценке дефектов используют заключения экспертов на основе конечно-элементного расчета, что эффективно, но затратно.

Достоинства методики – быстрота оценки.

### Пример

Трещиноподобный дефект обнаружен в окружном шве на внешней поверхности трубы во время запланированного оборота. Данные по трубе и осмотру приведены ниже.

Диаметр трубопровода – 402 мм, толщина стенки  $t = 19,2$  мм, материал стенки трубы – сталь X100. Давление в трубопроводе: рабочее – 10 МПа, гидростатическое при остановке перекачки – 0,1 МПа, установлен внутритрубной диагностикой дефект.

Цель работы определить является ли труба приемлемой для дальнейшей эксплуатации.

Данные трубы: представлены на рис. 1.

Дефект расположен в окружном сварном шве на наружной поверхности трубы в ее нижней части.

Шов представляет собой один V-образный шов. Дефект расположен параллельно сварному шву. Глубина дефекта была установлена по обследованию; были отмечены последовательные показания, и конечное значение глубины дефекта на уровне 4,0 мм. длина дефекта составляет 15,0 мм.

Провести оценку уровня дефекта.

Поскольку трещина лежит на внешней поверхности, давление на поверхность трещины равно нулю ( $p = 0$ ).

Коэффициент интенсивности напряжений самой глубокой точке продольной полуэллиптической трещины на внутренней поверхности линейной трубы под внутренним давлением задается:

$P_1 = 10$  МПа

Кольцевое напряжение в трубопроводе:

$$\sigma_h = \frac{PD_{BH}}{t} = 189.375 \text{ МПа.}$$

Коэффициент формы определяется по формуле:

$$Q = 1 + 1464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1.65}$$

при  $a = 0.5$  мм и  $c = 0.5$  мм ( $a$  – глубина дефекта и  $c$  – полуширина дефекта)

$$Q = 1465 \times 10^3.$$

Коэффициент интенсивности напряжений:

$$K_I = \left( \frac{R_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \right) \left[ 2G_0 - 2 \frac{a}{R_i} G_1 + 3 \left( \frac{a}{R_i} \right)^2 G_2 - 4 \left( \frac{a}{R_i} \right)^3 G_3 + 5 \left( \frac{a}{R_i} \right)^4 G_4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

В самой глубокой точке дефекта: согласно  $\sigma_0^P = PR_i^2 / (R_o^2 - R_i^2)$  API 579-2/ASME FFS-2 2009 Fitness-For-Service определяем: коэффициенты  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$  – параметры в весовой функции: Коэффициенты,  $G_2$ ,  $G_3$  и  $G_4$ , вычисляются через коэффициенты  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$  – параметры в весовой функции для самой глубокой точки трещина [16]:

Параметры весовой функции обозначим  $h11$ :  $h11 = 2.144 \times 10^{-3}$

Коэффициенты формулы интенсивности напряжений:

$$M_1 = (h11) \cdot (3G_1 - G_0) - 4.8$$

$$M_2 = 3$$

$$M_3 = 3(h11) \cdot (G_1 - 2G_0) + 1.6$$

Коэффициенты  $G_0$  и  $G_1$ , определяются по таблице 3 API 579-2/ASME FFS-2 2009 при заданных параметрах дефекта ( $a$  и  $c$ ):

$$G_0 = 1.301318 \text{ и } G_1 = 0.74179.$$

Тогда

$$M_1 = -31.998 \text{ и } M_3 = 1.604.$$

Определяем дополнительно  $\sigma_5$  и  $G_5$ , из соотношения согласно табл. API 579-2/ASME FFS-2 2009 Fitness-For-Service, соответственно:

$$G_5 = 1.073$$

$$\sigma_5^P = 4M_x R_o / (R_o^4 - R_i^4), \sigma_0^P = PR_i^2 / (R_o^2 - R_i^2),$$

где  $R_i$  и  $R_o$  соответственно внутренний и внешний радиусах трубопровода.

Тогда  $\sigma_5 = 4.741 \times 10^{-6}$  Мпа

Коэффициенты интенсивности напряжений при  $\varphi = 0$ :

Определите коэффициент ударной вязкости или ординату точки оценки FAD (Failure Assessment Diagram) Схема Оценки Повреждений

В основании дефекта  $\varphi = 90^\circ$ :

$$K_r = \frac{K_I^P + \Phi K_I^{SR}}{K_{mat}} = \frac{(6.735 + 1.1448) \cdot 7.359}{189} = 0.083$$

Коэффициенты интенсивности напряжений при  $\varphi = 0^\circ$ :

$$K_r = \frac{K_I^P + \Phi K_I^{SR}}{K_{mat}} = \frac{(1.735 + 1.1448) \cdot 7.359}{189} = 0.054$$

Определим пороговое значение для  $R_r$ .

$L$  – ось – начиная с характеристик упрочнения из материала, который не известен, можно использовать следующее значение ( $L_r^P$  – ось графика  $L_r^P(\max) = 1.0$ ).

Значения точек оценки приведено в таблице 1.

Таблица 1

Таблица значения точек оценки

точки оценки	В основании дефекта $\varphi = 90^\circ$	$(L_r^P, K_r)$	(0.134, 0.083)
1			
2	На краю дефекта $\varphi = 0^\circ$	$(L_r^P, K_r)$	(0.067, 0.054)

Построен график по точкам оценки на рис. 4:

1. В основании дефекта  $\varphi = 90^\circ (L_r^P, K_r) = (0.134, 0.083)$ .
2. На краю дефекта  $\varphi = 0^\circ (L_r^P, K_r) = (0.067, 0.054)$ .

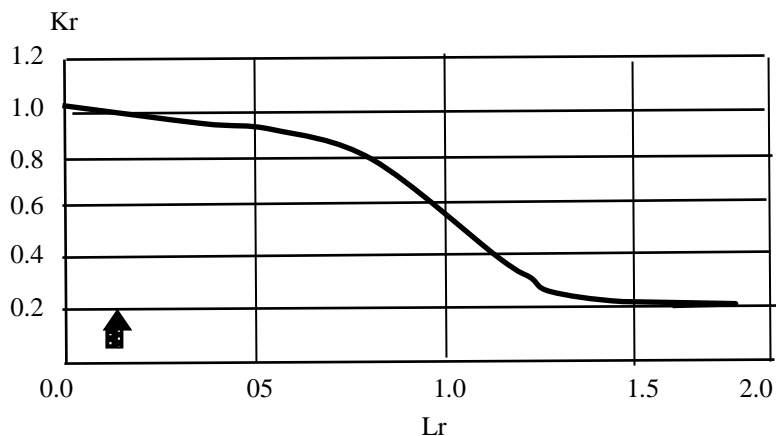
Коэффициенты надежности  $\psi$  и  $\varphi$  рассчитываются по таблицам 9.3 и 9.5 [14] соответственно:

$$\begin{Bmatrix} L_r^P & 0.194 \\ L_r^{SR} & 0.067 \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} \psi & 0.09086 \\ \varphi & 0.6273 \end{Bmatrix}.$$

Постройте график для точек 1 и 2.

Вычислим коэффициент взаимодействия пластичности  $L_r^{sr}$ :

$$L_r^{sr} = \frac{\sigma_{ref}^{sr}}{\sigma_{ys}}, L_r^{sr} = 1,783.$$



————— оценочная кривая    ■ основание дефекта    ▲ край дефекта

**Рисунок 4.** Схема оценки разрушений по оценочным точкам (рисунок разработан автором)

Вторичные напряжения вычислим на основе мембранных и изгибных составляющих остаточного напряжения:

$$\sigma_{ref}^{SR} = \frac{Q_b + \left\{ (Q_b)^2 + 9 \left[ ZQ_m (1 - \alpha)^2 \right]^2 \right\}^{0.5}}{3(1 - \alpha)^2} = 67,75 \text{ МПа},$$

где по табл. ЕЗ.10-1  $Q_b = 0$ ,  $Q_m$  – остаточные напряжения в сварных швах равны 67 МПа,  $Q_m$  – кольцевое напряжение от внутреннего давления 153 МПа,  $M_x = 10$  МПа, коэффициент  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\frac{a}{t}}{1 + \frac{t}{c}}$$

вычисляется из соотношения в примере равное 0.1231.

Определим максимально допустимое значение  $K_r$  для  $L_r^P = 0,62739$ :

$$K_{r,max} = \left[ 1 - 0.14 \left( L_r^P \right)^2 \right] \left\{ 0.3 + 0.7 \left( L_r^P \right)^6 \right\} = 0.9612$$

## Вывод

Критерии выполнены, труба приемлема для дальнейшей эксплуатации по оценке допустимых параметров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. RESEARCH Review of the performance of high strength steels used offshore. Prepared by Cranfield University for the Health and Safety Executive 2003 130 p. [hse.gov.uk/research/rrpdf/rr105.pdf](http://hse.gov.uk/research/rrpdf/rr105.pdf).
2. Oil Pipeline Characteristics and Risk Factors: Illustrations from the Decade of Construction, A Report Cheryl J. Trench, President Allegro Energy Group John F. Kiefner, 2001 59 стр. [api.org/~media...oil-and...other...decadefinal.pdf?la...](http://api.org/~media...oil-and...other...decadefinal.pdf?la...)
3. Прочность конструкций при малоцикловом нагружении. Махутов Н.А., Воробьев А., Гаденин М.М., Дульнев Р.А., Зацаринный В.В., Злочевский А.Б., Каган В.А., Казанцев А.Г., Кондратьев А.Д., Ларионов В.В., Левин О.А., Москвитин Г.В., Петушков В.А., Романов А.Н., Свирский Ю.А., Сенин В.С., Филатов В.М., Хуршудов Г.Х., Шувалов А.Н. М.: Наука, 1983. Табл. 18, ил. 124.
4. Механика разрушения и прочность материалов: Справ, пособие: В 4 т. / Под общей ред. Панасюка В.В. – Киев: Наук, думка, 1988 Т. 1. Основы механики разрушения / Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Партон В. 3. – 1988. – 488 с.
5. X. Wang, “Wiener processes with random effects for degradation data”, Journal of Multivariate Analysis, vol. 01, no. 2, pp. 340–351, IAENG International Journal of Applied Mathematics, 46:2, IJAM, (Advance online publication: 14 May 2016)46\_2\_1262016).
6. Wu et al. J. Schijve, Fatigue of Structures and Materials, Springer Science & Business Media, 2001.
7. Богданов Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений М.: Мир, 1989. – 344 с.
8. Hiroyuki NAGAYAMA, Jun NAKAMURA, Masahiko HAMADA, Kunio KONDO Hiroyuki HIRATA, Development of X90-X100 Seamless Line Pipes and Their Application, TECHNICAL REPORT No. 107, NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL, 2015, 7 p.
9. S.M. Nabavi1, A.R. Shahani, Dynamic stress intensity factors for a longitudinal semi-elliptical crack in a thick-walled cylinder, International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 6, No. 5, 2014, pp. 57–77, DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijest.v6i5.6>.
10. A. Kiciak, G. Glinka, D.J. Burns, Calculation of Stress Intensity Factors and Crack Opening Displacements for Cracks Subjected to Complex Stress Fields, Transactions of the ASME, pp. 260–266 Vol. 125, 2003, DOI: 10.1115/1.1593080.
11. Стандарт организации Газпром 2-2.3-253-2009. Методика оценки технического состояния и целостности газопроводов. ИРЦ «Газпром». М.: 2009. с. 78.
12. P. Darcis, J.M. Treinen, and J.D. McColskey, Fatigue Crack Growth Rates in Pipeline Steels, Using Curved M\_T\_ Specimens, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 37, No. 6, Paper ID JTE101574, Available online at: [www.astm.org](http://www.astm.org), 9 p.

13. José A.F.O. Correia, Abílio M.P. De Jesus, PedroM. G.P. Moreira, Paulo J.S. Tavares, Cack Closure Effects on Fatigue Crack Propagation Rates: Application of a Proposed Theoretical Model, Hindawi Publishing Corporation, Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2016, Article ID 3026745, 11 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3026745>.
14. Yong-Yi Wang, Honggang Zhou, and Ming Liu, Summary Report 277-S-01, Weld Design, Testing, and Assessment Procedures for High Strength Pipelines, 2011, 98 p.
15. API 579-2/ASME FFS-2 2009 Fitness-For-Service Example. Problem Manual, 374 p.
16. Raju, I.S. Newman, J.C., 1982, “Stress-intensity factors for internal and external surface cracks in cylindrical vessels”, J. Pressure Vessel Technol., 104(4), pp. 293–298.
17. Yuji ARAI, Development of X90-X100 Seamless Line Pipes and Their Application, TECHNICAL REPORT No. 107, 2015, NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL, 7 p.
18. Muhammad Rizwan Akram, Abdullah Can ZÜLFİKAR, Identification of Factors Influencing Sustainability of Buried Continuous Pipelines, MPDI, 2020, 12(3), 960, 20 p.
19. Suzuki N, IGI S, Masamura K, Seismic integrity of high-strength pipelines, seismic integrity of high-strength pipelines, JFE technical report, 2008, No. 12, 7 p.
20. Espiner, R. “Update from BP’s pipeline cost reduction technology project”, Proc. Of Onshore Pipelines Conf., 2002, p. 28.
21. G. Knauf, R. Howard, The european pipeline research group:Recent research activities directed towards improved pipeline Safety and reliability, Pip.

**Muravieva Liudmila Victorovna**

Yuri Gagarin state technical university, Saratov, Russia  
E-mail: E-mail [rfludmia@yandex.ru](mailto:rfludmia@yandex.ru)  
РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=212548](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=212548)

**Ovchinnikov Igor Georgievich**

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia  
Yuri Gagarin state technical university, Saratov, Russia  
Perm national research polytechnic university, Perm, Russia  
E-mail: [bridgesar@mail.ru](mailto:bridgesar@mail.ru)

## Safety of offshore pipelines in case of damage

**Abstract.** The development of new technologies calls for caution when using both old and new ideas.

Pipelines are one of the safest ways to transport oil and gas. However, there are defects and cracks in the pipelines. Therefore, the assessment of these defects is very important for the further safe operation of the offshore pipeline. Safety of marine underwater pipelines made of high-strength steel with a longitudinally oriented defect in the form of a longitudinal semi-elliptical non-through crack when loaded with working pressure is an urgent problem and is of theoretical and practical interest.

The author presents modern methods for assessing the crack resistance of high-strength steels. The article presents an engineering approach to the evaluation of defects in pipes made of high-strength steel. The development of new technologies calls for caution when using both old and new ideas. The construction of a new high-strength pipeline involves evaluating the material for strength, crack resistance, integrity, and resistance to external natural influences, including seismic ones.

The construction of a new high-strength pipeline involves evaluating the material for strength, crack resistance, integrity, and resistance to external natural influences, including seismic ones.

The article discusses high-strength pipelines made of new steel used on the shelf, its mechanical properties, suitability for safe use in terms of destruction and static strength. Modern methods for evaluating defects (damages) of pipelines made of high-strength material are considered. The purpose of this study is to assess the impact of defects on the operation of the gas pipeline, taking into account the operating pressure of the gas.

**Keywords:** marine pipelines; high-strength steels; crack resistance; safety; operation; defects; cracks