Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2018, №1, Том 5 / 2018, No 1, Vol 5 <https://t-s.today/issue-1-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/14SATS118.pdf>

DOI: 10.15862/14SATS118 (<http://dx.doi.org/10.15862/14SATS118>)

Статья поступила в редакцию 19.02.2018; опубликована 11.04.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Овчинников И.Г., Муравьева Л.В. Проблемы поведения железобетонного покрытия морских трубопроводов при сейсмическом воздействии // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №1, <https://t-s.today/PDF/14SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/14SATS118

For citation:

Ovchinnikov I.G., Muravieva L.V. (2018). Problems of the reinforced concrete coating of the offshore pipelines exposed to seismic impact. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/14SATS118.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/14SATS118

УДК 620;581.524.322

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Балаковский инженерно-технологический институт (филиал), Россия
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия
Доктор технических наук, профессор
E-mail: bridgesar@mail.ru

Муравьева Людмила Викторовна

АО «ЦКБ «Коралл», Севастополь, Россия
Ведущий конструктор по направлению «Линейные трубопроводы»
Доктор технических наук, доцент
E-mail: rfludmia@yandex.ru

Проблемы поведения железобетонного покрытия морских трубопроводов при сейсмическом воздействии

Аннотация. В России в настоящее время не разработаны методики расчета на изгиб труб с бетонным покрытием. Для труб с бетонным покрытием используются нормы DNV. Выполнен анализ фактор концентрации напряжения (SCF) для зоны FJ (начала бетонного покрытия). В статье анализируется распределение касательных напряжений около сварного шва и начала бетонного покрытия. В исследованиях рассматривалась модель трубы переменной жесткости. В статье рассматривается (изменчивость) касательных напряжений в зоне сварного соединения трубопроводов с бетонным покрытием при сейсмических воздействиях. Описана полуаналитическая модель и результаты численного моделирования НДС трубопровода с покрытием. Рассмотрены изменения касательных напряжений в поперечных сечениях покрытой бетоном трубе и зоне FJ (начала бетонного покрытия).

Ключевые слова: сейсмостойкость; подводный трубопровод; железобетонное покрытие; трещиностойкость

Освоение арктического и субарктического шельфов США и Канады осуществлялось с 1960 г. довольно высокими темпами.

В апреле 1978 г. было завершено строительство подледного первого морского трубопровода в арктическом районе Канады в районе газового месторождения Дрейк-Пойнт.

На трубопровод наложен ряд ограничений по нагрузке, как во время его установки и эксплуатации, следующего характера, сохранность положения, целостность. Они учитывают, соответствие кривизны стингера, батиметрии из-за грубого морского дна, а также заглубление трубопроводов. Трубопроводы подверженные движению морского дна, так как просадка из-за циклов замораживания-оттаивания, селей и сейсмической активности. Все это сценарии нагружения приводят к изгибу морского трубопровода.

Требование к устойчивости на дне для морских трубопроводов большого диаметра, решается обычно добавлением бетонного утяжеляющего покрытия над стальной трубой. Бетонное покрытие имеет разрывы в местах расположения полевых соединений (FJ) для облегчения сварки кольцевых швов труб длиной 12 м. Традиционно эмпирические критерии качества изготовления по критическому размеру дефекта распространены в морской отрасли. Большая стоимость морских трубопроводов всегда присутствует в морских углеводородах проектах, расходы на реализацию проекта не должны стать слабым звеном при реализации проекта.

Неотъемлемой частью любого подводного газопровода является балластная бетонная оболочка, основной задачей которой является предотвращение всплытия, вследствие низкой плотности транспортируемого продукта. Многие технические решения не имеют строгого научного обоснования и нуждаются в проведении специальных теоретических и экспериментальных исследований.

Видимый отказ – изгиб трубопровода, приводит к потенциальной трещине в покрытии трубопровода на растянутой стороне.

Появление трещины приводит конструкцию, к экономической и ответственности природоохранной.

Совместное действие изгиба и внутреннее давление на трубопровод оценивается, как отклонения от контролируемого состояния, на основе норм DNV¹ и API².

В работе [3] рассмотрены особенности зоны SCF в статической постановке. Для улучшения поведения толстого бетонного покрытия при изгибе предложено выполнять надрезы в бетоне.

Авторами [7-8] изучена траектория развития в трубопроводе пластического изгиба и внесены требования по ограничению ширины трещин в бетонном покрытии трубопроводов [11].

¹ DNV-OS-F101, 2000. Offshore standard – Submarine pipeline systems. Det Norske Veritas, Hovik, Norway.

² API-RP-1111, 1999. Design, construction, operation, and maintenance of offshore hydrocarbon pipelines (limit state design), third ed. American Petroleum Institute, Washington DC, USA.

Рисунок 1. Схема конфигураций трещин в бетонном покрытии морского трубопровода на основе ограничений начальной трещины [6]: SENT – трещина рассматривается двухосного напряженного состояния в трубопроводе; SENB – развитие глубоких трещин (составлено автором)

При изгибе, в обнаженной части стальной трубы, в зоне FJ, наблюдается концентрация напряжения, которая описана с нормам DNV. Два из наиболее заметных режимов отказа морских трубопроводов: при изгибе стенки трубы (потери местной устойчивости) на стороне сжатия, трещина на растянутой стороне трубопровода.

Коэффициент концентрации деформации, SCF: в трубопроводах с бетонным покрытием. в настоящее время применяются для определения герметичности поврежденного трубопровода.

Рассмотрение этого вопроса выполняется с использованием математического численного моделирования, специальных программных комплексов.

В настоящее время при проектировании МПТ [11], в расчет характеристик железобетонного покрытия, не включается, расчет на сейсмостойкость трубопровода.

При оценке разрушений подводных трубопроводов большое внимание уделяется дефектам сварки. Внутренние повреждения в стенке трубы уменьшает сопротивление труб изгибу. На основе лабораторных экспериментов, по определению ударной вязкости покрытия, ограничения развития трещины в покрытиях трубопроводов.

Жесткость покрытия трубопровода рядом с зоной FJ используется, как зона переноса сдвига через слой ACL. В результате ограничений по сопротивлению сдвигу относительно слоя «ACL» бетонное покрытие будет скользить по стали, вблизи и в небольшой области FJ. Длина области определяется необходимостью обеспечения сопротивления сдвигу в зоне «ACL» для передачи осевого усилия, развивающегося в бетоне, на стальную трубу.

Общее соотношение работы трубы с бетонным покрытием при изгибе [5];

$$M = M_s + M_c, \quad (1)$$

где M_s – изгибающий момент в металле относительно нейтральной оси;

M_c – изгибающий момент в бетоне относительно нейтральной оси.

Оценка общей жесткости EJ_0 подразумевает полное взаимодействие трубы и бетона. Усилия передаются только по стальной трубе в монтажных стыках и переносятся в бетон посредством сдвигающего усилия, возникающего между трубой и бетоном, а также в самом

бетоне между смежными волокнами. Это перераспределение нагрузок может произойти только на определенном расстоянии от начала бетонного покрытия. Поскольку бетон не участвует в работе на растяжение, состояние равновесия находится между N_c и сдвигающими усилиями, действующими на поверхности трубы в области, испытывающей сжатие.

Длина зоны передачи напряжений между трубой и бетоном, определяется по следующей формуле:

$$N_c = \int_0^{L_1} \int_{\varphi} R_p \cdot \tau(y, \phi) dy d\phi \quad (2)$$

Усилие сдвига принимается постоянным, в зоне сжатия.

L_1 – усилие сдвига: $L_1 = N_c / \left(2 \cdot \tau_{\max} \cdot R_p \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_u \right) \right)$, $L_1 = N_c / (2 \cdot \pi \cdot \tau_{\max} \cdot R_p)$ – нижняя граница.

Сдвигающие напряжения, составляет около 25~30 % [4].

В качестве объекта исследования в статье рассматриваются стальные электросварные прямошовные трубы с защитным антикоррозионным покрытием и железобетонным покрытием.

Рисунок 2. Поперечное сечение трубы с защитным антикоррозионным покрытием и железобетонным покрытием: здесь: r_1 – наружный радиус трубопровода с защитным антикоррозионным покрытием, теплоизоляцией и железобетонным покрытием; r_2 – внешний радиус трубопровода с защитным антикоррозионным покрытием и теплоизоляцией; r_3 – внешний радиус трубопровода с защитным антикоррозионным покрытием; r_4 – внутренний радиус трубы (составлено автором)

При интервале между трещинами (в среднем $\approx 10,5$ дюймов), возможно восприятие растягивающих усилий бетоном. Модуль упругости бетона при растяжении и сжатии определяется согласно [10, 11].

Основным вопросом в расчете прочности железобетонного покрытия труб является положение нейтральной оси. В общем случае если нейтральная ось проходит по средней линии поперечного сечения трубы (рис. 2) и уравнении (1) можно записать в виде

$$M = \frac{E_s I_s}{R} + \frac{E_c I_c}{R} = \frac{E_s I_s}{R} \left(1 + \frac{E_c I_c}{E_s I_s} \right), \quad (3)$$

где E_s , I_s и E_c , I_c – соответственно модули упругости и радиусы инерции арматуры и бетона.

Положение нейтральной оси определено в работе [6], приравняв усилие растяжения и сжатия в железобетонной конструкции. Расчет внецентренносжатых железобетонных элементов кольцевого сечения с арматурой производится согласно СП 35.13330.2011, с учетом значения ξ_{cr} .

Усилия и напряжения, в бетоне, рассматривают как средние значения.

При моделировании поведения бетона при сжатии, используется соотношение, предложенное в работе [7] Торенфильдом (1987) и Коллинсом, Поральсом (1989). Напряжение в бетоне рассматриваются по главным направлениям по соотношению $f_{c1} = E_c \cdot \varepsilon_1$, $\varepsilon_1 < \varepsilon_{cr}$, здесь ε_1 – среднее значение главных растягивающих напряжений.

При учете условий работы конструкции, ширина трещины вычисляется в соответствии с п. 8000 [10]. Минимальная толщина защитного слоя бетона, определяется по таблице О2⁵. Расчет ширины трещины в конструкции со стальной арматурой (согласно п.801) выполняется с учетом допущений, что бетон монолитный, главное напряжение σ_1 от растяжения не превышает соотношения f_{tm}/k_1 (здесь k_1 – постоянная, принимаемая по т. О4⁵, где f_{tm} – нормативная прочность бетона на растяжение [11]).

Для комбинированной нагрузки от осевой силы и изгибающего момента, применяется следующее условие:

$$(\sigma_N + \sigma_M) < \frac{k_w f_w}{k_1}, \quad (4)$$

σ_N – напряжение вызванное осевой силой (знак плюс при растяжении);

σ_M – напряжение вызванное изгибом (знак плюс при растяжении);

f_{tm} – нормативный предел прочности бетона на растяжение (т. С1 и С2^{3,4});

k_1 – постоянная в расчете ширины трещины (т. О4⁴);

k_w – коэффициент, зависящий от высоты поперечного сечения.

Максимальное растяжение в бетоне равно сопротивлению растяжению армированной конструкции.

При растяжении в бетоне, перед образованием трещин, для описания поведения материала используется следующие соотношения;

$$\text{где } \varepsilon_{cr} = \frac{f_{cr}}{E_c}, \quad f_{cr} = 0,33\sqrt{f'_c} \text{ (МПа)}, \quad E_c = \frac{2f'_c}{\varepsilon_0}, \quad f_{c1} = f_{cr} \left(\frac{2\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_1} \right)^{0.4}, \quad \varepsilon_1 < 2\varepsilon_{cr}$$

³ DNV-RP-F108, 2006. Recommended Practice – Fracture control for pipeline installation methods introducing cyclic plastic strain. Det Norske Veritas, Hovik, Norway.

⁴ Offshore Standard DNV-OS-C502, Offshore Concrete Structures. Det Norske Veritas As, 2012. 194 p.

Рисунок 3. Поведение бетона при растяжении железобетонной конструкции (составлено автором)

Расчет растягивающих напряжений основан на трещиностойкости бетона. В A200⁴ рассчитывается σ_{sr2} на основе соотношения между растягивающими напряжениями относительно нейтральной оси.

Максимальные глобальные напряжения изгиба, ε_g , рассмотренное в работе [15], составляют приблизительно 0.3 %.

$$\xi_{crit} = \frac{t}{2D}, \quad (5)$$

где t – толщина стенки трубы; D – наружный диаметр трубы. По данным работы данный уровень обычно не вызывает местной деформации стенки трубы при сжатии.

Расчет выполнен программным комплексом "ЛИРА-САПР". Расчетная схема трубопровода построена по следующим исходным данным: $E = 2 \times 10^6$ кгс/см² – модуль упругости материала металла трубы; $I = 1,821 \times 10^{-4}$ м⁴ – момент инерции поперечного сечения трубы (с учетом бетонирования); D – наружный диаметр трубопровода с покрытием.

Рисунок 4. Общая модель трубопровода (составлено автором)

В расчетную схему включены следующие типы элементов: универсальный пространственный шестиузловой изопараметрический КЭ (тип 34), универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ (тип 36), универсальный четырехугольный КЭ оболочки (тип 44).

Рисунок 5. Общий вид фрагмента конечно-элементная модель для исследования изменения касательных напряжений в железобетонном покрытии на границе зоны CF и зоне сварного соединения при сейсмическом воздействии (составлено автором)

Расчет выполнен на следующие загрузки:

Загрузка 1 – статическое нагружение собственным весом.

Загрузка 2 – статическое нагружение от рабочего давления и температурного воздействия.

Загрузка 3 – сейсмическое воздействие задано акселерограммой.

Выполнены исследования НДС в зоне стыка трубопровода с учетом бетонного покрытия и перечисленных нагрузок (внутреннего давления продукта, температуры транспортировки, сейсмического воздействия) приведены в табл. 1.

Исследование усилий Тху в сечении FJ

Таблица 1

Исследования касательных напряжений в стенке трубопровода с бетонным покрытием

№Эл	Тху, т/м² с сейсм. и дав. в зоне с бетоном	№Эл	Тху, т/м² с сейсм. и дав. в зоне	№Эл	Тху, т/м² с сейсм. и внут. дав. в зоне с бетоном
95	1) -62,2003	663	1) -898,551	333	1) -52,9756
	2) -18,7898				2) -171,993
	3) -133,819				3) 51,7897
85	1) 11,714	662	1) 548,867	323	1) 15,0293
	2) 169,647				2) -156,447
	3) -20,9104				3) -172,82
104	1) 15,3837	661	1) -891,064	342	1) 2,748
	2) 53,8495				2) -234,458
	3) -146,241				3) 159,98
103	1) -45,796	660	1) -2,094,67	341	1) 13,4606
	2) 39,7858				2) -171,2
	3) -30,532				3) 107,84
102	1) -85,1327	659	1) -1995,4	340	1) -14,0343
	2) -14,965				2) -10,14
	3) 19,415				3) 49,4297
101	1) 22,9735	658	1) -2461,31	328	1) -60,9744
	2) -40,4691				2) 55,926
	3) 55,716				3) -59,8782
Обозначено: 1) Тху; 2) Тхз; 3) Тyz.					

Расчеты показали возникновение знако-переменных напряжений усилий T_{xy} в стенках трубопровода при прямом динамическом расчете по акселерограмме землетрясения, которые приводят к образованию трещин в бетонном покрытии.

После образования трещины в бетоне необходимо учесть приближенно эффекты от трещин. Бетон с трещинами рассматривается как ортотропный нелинейный упругий материал. Эффективная зона бетона, в которой усилия, развиваются, находится в пределах 7.5 диаметров стержня, любого армированного элемента [8].

Допускаемые напряжения в трубопроводе $\sigma_{\text{эк}}$ определяют по рекомендациям разд. 3.18 [11].

Выводы:

- Необходимо провести исследования сейсмостойкости трубы с бетонным покрытием с учетом изменений касательных напряжений в зоне сварного соединения и зоны «FJ».
- Необходимо разработать методику по оценке трещиностойкости железобетонного покрытия труб морских трубопроводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Муравьева Л.В., «Влияние изменчивости касательных напряжений в теле трубы морского подводного трубопровода с бетонным покрытием при сейсмическом воздействии», Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2016 №4, Транспортные сооружения, 2016 №4, <https://t-s.today/PDF/04TS416.pdf>. Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/04TS416.
2. M.A. Polak, F.J. Vecchio, Nonlinear Analysis of Reinforced-Concrete Shells.
3. Nikzad Nourpanah Integrity and Fracture Response of Offshore Pipelines Subject to Large Plastic Strains. Nova Scotia. 2011, 321 p.
4. Ness, O.B., Verley, R., 1995. "Strain concentrations in pipelines with concrete coating an analytical model". In International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Vol. 5, pp. 507-512.
5. Dixon, D.A., D.R. Rutledge, Stiffened Catenary Calculations in Pipeline Laying Problem. Journal of Engineering for Industry, 1968, pp. 153-160.
6. Louis E. Livingston, Flexural rigidity of concrete-coated steel pipe, Rice University, 1965, 42 p.
7. Chiesa, M., Nyhus, B., Skallerud, B. and Thaulow, C., 2001. "Efficient fracture assessment of pipelines. A constraint-corrected SENT specimen approach". *Engng. Fract. Mech.*, 68(5), pp. 527-547.
8. Polak, M.A. and F.J. Vecchio, Nonlinear Analysis Of Reinforced-Concrete Shells, Journal of Structural Engineering. Vol. 119. No. 12, December, 1993. Paper No. 4997.
9. Pisarski, H.G., and Wignall, C.M., 2002. "Fracture toughness estimation for pipeline girth welds". In International Pipeline Conference (IPC), Calgary, Canada, pp. 1607-1611.
10. Филатов А.А., Топилин А.А., Велиюлин И.И., Решетников А.Д., Городниченко В.И. Методика расчета на прочность и устойчивость подводных переходов из бетонированных труб при их строительстве и ремонте / А.А. Филатов, А.А. Топилин, И.И. Велиюлин, А.Д. Решетников, В.И. Городниченко – Москва: Газовая промышленность, спецвыпуск, стр. 65-68 p.
11. Russian Maritime Register. Pravila klassifikatsii i postrojki morskikh podvodnykh truboprovodov [ND №2-020301-004. Rules for the classification and construction of subsea pipelines]. Saint-Petersburg. Russian maritime register, 2017. 164 p.

Ovchinnikov Igor Georgievich

National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)
Balakovo institute of engineering and technology (branch), Russia
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia
Perm national research polytechnic university, Perm, Russia
E-mail: bridgesar@mail.ru

Muravieva Liudmila Victorovna

JSC "CDB Corall", Sevastopol, Russia
E-mail: rfludmia@yandex.ru

Problems of the reinforced concrete coating of the offshore pipelines exposed to seismic impact

Abstract. Presently bending analysis methods for the concrete coated pipes have not been developed in Russia. DNV rules and standards are currently applicable for this purpose. Stress concentration factor (SCF) for FJ zone (start of the concrete coating) is analyzed in this article along with the distribution of the shear stresses in the vicinity of the weld and starting point of the concrete coating. Variable stiffness pipe model was used for analysis.

The article describes (variation) of the shear stresses in the weld zone of the concrete coated pipelines under seismic loads. Semi-analytical model and the computer simulation results of the stress and strain state of the coated pipeline are shown in this paper. Variations in the shear stresses of the concrete coated pipe cross sections and FJ zone (start of the concrete coating) have been addressed.

Keywords: seismic design; subsea pipelines, reinforced concrete coating; crack resistance

REFERENCES

1. Muraveva L.V. (2016). Influence of shear stress volatility in the body of a marine subsea piping pipe with a concrete covering under seismic action. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4. Available at: <https://t-s.today/PDF/04TS416.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/04TS416.
2. Polak M.A., Vecchio F.J. (n.d.). *Nonlinear Analysis of Reinforced-Concrete Shells*.
3. Nikzad Nourpanah. (2011). Integrity and Fracture Response of Offshore Pipelines Subject to Large Plastic Strains. *Nova Scotia*, p. 321.
4. Ness O.B., Verley R. (1995). Strain concentrations in pipelines with concrete coating an analytical model. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 5, pp. 507-512.
5. Dixon D.A., Rutledge D.R. (1968). Stiffened Catenary Calculations in Pipeline Laying Problem. *Journal of Engineering for Industry*, pp. 153-160.
6. Louis E. (1965). Livingston, Flexural rigidity of concrete-coated steel pipe. *Rice University*, p. 42.
7. Chiesa M., Nyhus B., Skallerud B., Thaulow, C. (2001). Efficient fracture assessment of pipelines. A constraint-corrected SENT specimen approach. *Engng. Fract. Mech.*, 68(5), pp. 527-547.
8. Polak M.A., Vecchio F.J. (1993). Nonlinear Analysis Of Reinforced-Concrete Shells. *Journal of Structural Engineering*, 12(119).
9. Pisarski H.G., Wignall C.M. (2002). Fracture toughness estimation for pipeline girth welds. In *International Pipeline Conference*, pp. 1607-1611.
10. Filatov A.A., Topilin A.A., Veliyulin I.I., Reshetnikov A.D., Gorodnichenko V.I. (n.d.). Method for calculating the strength and stability of underwater transitions from concrete pipes during their construction and repair. *Gas industry*, pp. 65-68.
11. (2017). *Pravila klassifikatsii i postrojki morskikh podvodnykh truboprovodov [ND №2-020301-004. Rules for the classification and construction of subsea pipelines]*. Saint-Petersburg: Russian maritime register, p. 164.