

УДК 622.691.4

Методика расчета на прочность и устойчивость подводных переходов из обетонированных труб при их строительстве и ремонте

А.А. Филатов (ОАО «Газпром», РФ, Санкт-Петербург), **А.В. Топилин, И.И. Велиюлин, А.Д. Решетников, В.И. Городниченко** (ОАО «Оргэнергогаз», РФ, Москва)
E-mail: v.gorodnichenko@oeg.gazprom.ru

На основе существующей нормативной базы по проектированию гражданских, промышленных и гидротехнических сооружений разработана методика расчета на прочность и устойчивость магистральных трубопроводов из обетонированных труб при строительстве и капитальном ремонте (КР) подводных переходов. Основные положения методики включают корректировку толщины балластного покрытия, определение силовых факторов, расчет раскрытия трещин, определение допустимого радиуса изгиба и проверку на прочность и устойчивость. Использование данного методического подхода при проектировании строительства и КР водных преград позволит повысить надежность эксплуатации подводных переходов.

- обоснование возможности применения основных положений теории расчета железобетонных элементов гражданских, промышленных и гидротехнических сооружений на задачи проектирования бетонных балластных покрытий с арматурой;
- вывод формулы для вычисления минимально допустимого радиуса упругого изгиба из условия ограничения ширины нормальной поперечной трещины в растянутой зоне балластного покрытия;
- вывод формулы для вычисления предельного значения раскрытия трещины;
- корректировка формул для расчета минимально допустимого радиуса упругого изгиба из условий прочности с учетом изгибной жесткости балластного покрытия.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, подводный переход, расчет на прочность и устойчивость, обетонированные трубы, раскрытие трещины, радиус изгиба.

На магистральных трубопроводах к наиболее ответственным инженерным сооружениям относятся подводные переходы, к надежности и эксплуатационной безопасности которых предъявляются высокие требования, так как даже незначительные повреждения перехода могут привести к серьезным экологическим последствиям.

Практика эксплуатации переходов через водные преграды показывает, что значительная часть нештатных ситуаций связана с потерей устойчивости против всплываия (нарушение проектного положения).

Задача обеспечения проектного положения трубопровода решается с применением различных средств балластировки

(одиночные кольцевые чугунные или железобетонные грузы и т.д.), но наиболее надежным и эффективным способом балластировки трубопровода является нанесение сплошного бетонного покрытия с арматурным каркасом (обетонированные трубы, представленные на рис. 1).

На сегодняшний день для проектирования подводных переходов из обетонированных труб методики расчета на прочность и устойчивость адаптированной к инженерной практике не существует, чем и обусловлена актуальность исследований данного направления.

При разработке методики расчета на прочность и устойчивость необходимо решить следующие задачи:

Предлагаемая методика расчета на прочность и устойчивость подводных переходов в части расчета бетонного балластного покрытия по критериям прочности и трещиностойкости основывается на нормативных документах, разработанных применительно к гражданским, промышленным и гидротехническим сооружениям: СП 63.13330.2012, СП 35.13330.2011, СП 52-101-2003, СП 52-102-2004, СТО Газпром 2-2.2-334-2009, СП 36.13330.2012^{*}.

В настоящей статье в качестве объекта исследования рассматриваются коаксиально расположенные стальные электросварные прямошовные трубы с защитным антикоррозионным покрытием и металлополимерной оболочкой, пространство

^{*} СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения; СП 35.13330.2011. Мосты и трубы; СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения; СП 52-102-2004. Предварительно напряженные железобетонные конструкции; СТО Газпром 2-2.2-334-2009. Ремонт и строительство магистральных газопроводов в обводненной и заболоченной местности, на подводных переходах с применением обетонированных труб; СП 36.13330.2012. Магистральные газопроводы.



Рис. 1. Применение обетонированных труб на подводном переходе через р. Вал

между которыми заполнено армированным бетоном. По СТО Газпром 2-2.2-334–2009 эти обетонированные трубы (рис. 2) классифицируются как II конструктивный тип.

Алгоритм расчета подводного перехода на прочность и устойчивость включает:

- корректировку толщины балластного покрытия;
- определение силовых факторов;
- расчет раскрытия трещин;
- определение допустимого радиуса изгиба;
- проверку прочности и устойчивости.

Так как нормативные документы по расчету бетонных и железобетонных конструкций ограничиваются значением плотности бетона $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$, а по ТУ 2248-041-04005951–2010 «Трубы полимерные с балластным покрытием в металлополимерной защитной оболочке» ОАО «МТЗК» минимальное значение плотности бетонного балластного покрытия составляет не менее $\rho = 3100 \text{ кг/м}^3$, то для того, чтобы можно было использовать существующие нормативные документы по проектированию, необходимо провести корректировку

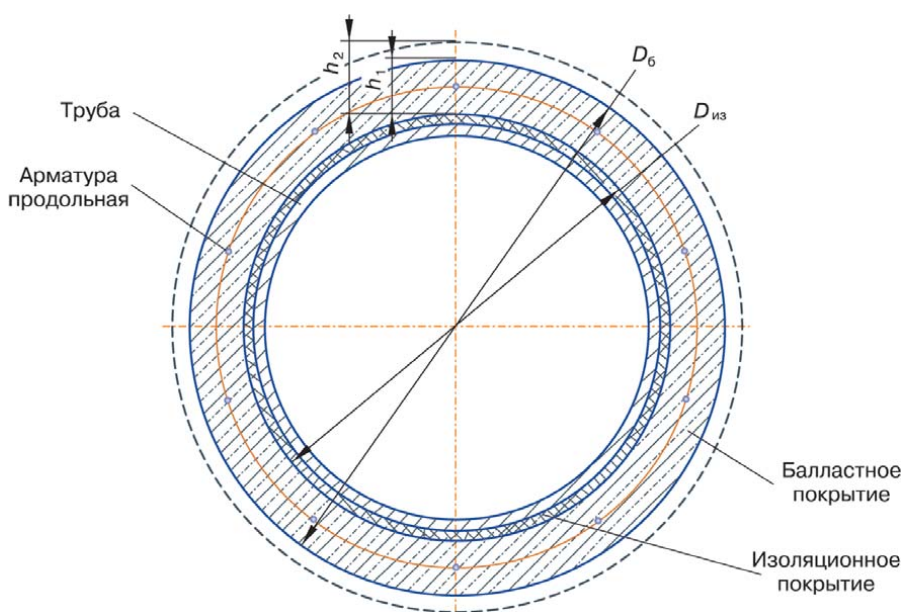


Рис. 2. Конструкция трубы с балластным покрытием:

$D_{из}$, $D_б$ – внутренний и наружный диаметры балластного покрытия; h_1 – толщина балластного покрытия; h_2 – скорректированная толщина балластного покрытия

исходных данных. Для этого в качестве управляющего параметра принимается масса покрытия m и из соотношения между плотностью, массой и объемом, при условии сохранения постоянной массы балласта, можно снизить его плотность до значения $\rho_2 = 2500 \text{ кг/м}^3$ и для этого значения вычислить скорректированную толщину покрытия h_2 по формуле (1):

$$\frac{h_2}{h_1} = \varphi_1(\rho, \eta) = \frac{\sqrt{\rho(\eta^2 - 1) + 1} - 1}{\eta - 1}, \quad (1)$$

где ρ – соотношение плотностей; η – соотношение диаметров покрытия.

Увеличение толщины балластного покрытия приведет к увеличению момента инерции сечения и, следовательно, к консервативной оценке радиуса упругого изгиба.

В соответствии с СП 35.13330.2011 расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов кольцевого сечения с арматурой производится в зависимости от относительной площади сжатой зоны бетона ξ_{cir} . Например, если относительная сжатая зона $\xi_{cir} \leq 0,6$, то изгибающий момент не должен превышать значения, определяемого по формуле (2):

$$M \leq \left(R_b A_b r_m + R_s A_{s,tot} r_s \right) \frac{\sin(\pi \xi_{cir})}{\pi} + R_s A_{s,tot} r_s (1 - 1,7 \xi_{cir}) (0,2 - 1,3 \xi_{cir}), \quad (2)$$

где M – изгибающий момент; R_b – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию; A_b – площадь бетона в кольцевом сечении; R_s – расчетное сопротивление растяжению арматуры; $A_{s,tot}$ – площадь сечений продольной арматуры; r_s – радиус окружности, проходящей через центры тяжести стержней арматуры; r_m – радиус, вычисляемый по формуле (3):

$$r_m = (D_б - D_{из})/4. \quad (3)$$

Максимальный изгибающий момент определяется по формуле (4):

$$M = \frac{q_0}{k^2} \left[1 - \text{ch}^{-1} \left(k \frac{L}{2} \right) \right], \quad (4)$$

где q_0 – распределенная нагрузка; L – длина участка; k – коэффициент, вычисляемый по формуле (5):

$$k = \sqrt{\frac{T_{np}}{E_0 J_\Sigma}}, \quad (5)$$

где $T_{пр}$ – усилие протаскивания; $E_0 J_{\Sigma}$ – приведенная жесткость сечения, вычисляемая по формуле $E_0 J_{\Sigma} = E_0 J_0 + E_b J_b$; J_b – момент инерции бетонного сечения относительно центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента; J_0 – момент инерции сечения трубопровода; E_0 – модуль упругости металла труб; E_b – модуль упругости бетона.

Относительная площадь сжатой зоны бетона ξ_{cir} в этом случае определяется по формуле (6):

$$\xi_{cir} = \frac{R_s A_{s,tot}}{R_b A_b + 2,7 R_s A_{s,tot}} \quad (6)$$

При $\xi_{cir} \leq 0,15$ изгибающий момент не должен превышать значения, определяемого по формуле (7):

$$M \leq (R_b A_b r_m + R_s A_{s,tot} r_s) \frac{\sin(\pi \xi_{cir1})}{\pi} + 0,295 R_s A_{s,tot} r_s \quad (7)$$

где ξ_{cir1} вычисляется по формуле (8):

$$\xi_{cir1} = \frac{N + 0,75 R_s A_{s,tot}}{R_b A_b + R_s A_{s,tot}} \quad (8)$$

где N – продольная сила.

При $\xi_{cir} \geq 0,6$ изгибающий момент не должен превышать значения, определяемого по формуле (9):

$$M \leq (R_b A_b r_m + R_s A_{s,tot} r_s) \frac{\sin(\pi \xi_{cir2})}{\pi} \quad (9)$$

где ξ_{cir2} вычисляется по формуле (10):

$$\xi_{cir2} = \frac{N}{R_b A_b + R_s A_{s,tot}} \quad (10)$$

В соответствии с СП 35.13330.2011 в балластном покрытии допускается образование трещин, если балластное покрытие рассматривать как трубу с категорией требований по трещиностойкости Зв. Расчет раскрытия нормальных трещин к продольной оси балластного покрытия проводится по формуле (11):

$$a_{cr} = \frac{\sigma}{E_s} \psi(R_r) \leq \Delta_{cr} \quad (11)$$

где σ – растягивающее напряжение, равное для ненапрягаемой арматуры напряжению в наиболее растянутых (крайних) стержнях σ_s ; E_s – модуль упругости арматуры, принимаемый по табл. 7.19 СП35.13330.2011; $\psi(R_r)$ – коэффициент раскрытия трещин, зависящий от радиуса армирования R_r (учитываются влияние бетона растянутой

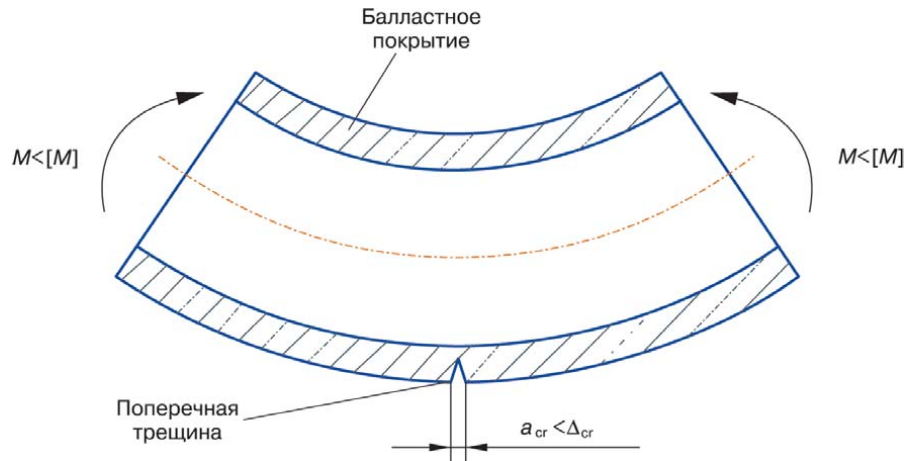


Рис. 3. Балластное покрытие с трещиной

зоны, деформации арматуры, ее профиль и условия работы элемента); Δ_{cr} – предельное значение расчетной ширины раскрытия трещины. Коэффициент раскрытия трещин $\psi(R_r)$ следует принимать в зависимости от радиуса армирования R_r равным:

- $0,35 R_r$ – для гладкой стержневой арматуры, арматурных пучков из гладкой проволоки и для стальных закрытых канатов;
- $1,5 \sqrt{R_r}$ – для стержневой арматуры периодического профиля, проволоки периодического профиля класса Вр, пучков из этой проволоки, канатов класса К-7 и пучков из них, стальных канатов со спиральной и двойной свивкой, а также для любой арматуры в стенках.

При расчете раскрытия нормальных трещин радиус армирования определяется в соответствии с СП 35.13330.2011 по формуле (12):

$$R_r = \frac{A_r}{\Sigma \beta n d} \quad (12)$$

где A_r – площадь зоны взаимодействия для нормального сечения, ограниченная наружным контуром сечения и радиусом взаимодействия; β – коэффициент, учитывающий степень сцепления арматурных элементов с бетоном, значение которого определяется из табл. 7.26 СП 35.13330.2011; n – число арматурных элементов с одинаковым номинальным диаметром; d – диаметр одного стержня (включая случаи расположения стержней в группах).

Растягивающее напряжение в симметрично расположенной арматуре определяется по вытекающей из п. 4.2.3.2 СП 52-102-2004 формуле (13):

$$\sigma_s = \left[\frac{M(h_0 - y_c)}{J_b + 2\alpha_{s1} J_s} \right] \alpha_{s1} \quad (13)$$

где h_0 – рабочая высота сечения; y_c – расстояние от наиболее сжатого волокна бетона до центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента; J_s – момент инерции площади сечения сжатой арматуры относительно центра тяжести приведенного поперечного сечения, вычисляемый по формуле (14):

$$J_s = A_s (h_0 - y_c)^2 \quad (14)$$

где A_s – площадь сечений сжатой арматуры; α_{s1} – коэффициент, вычисляемый по формуле (15):

$$\alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{b,red}} \quad (15)$$

где $E_{b,red}$ – приведенный модуль деформации сжатого бетона, учитывающий неупругие деформации сжатого бетона, вычисляемый по формуле (16):

$$E_{b,red} = \frac{R_{b,ser}}{\epsilon_{b1,red}} \quad (16)$$

где $R_{b,ser}$ – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию для предельных состояний второй группы; $\epsilon_{b1,red}$ – относительные деформации, определяемые по двухлинейной диаграмме состояния сжатого бетона.

Предельное значение раскрытия трещины вычисляется из условия прочности для предельного изгибающего момента (рис. 3):

$$\Delta_{cr} = \alpha_{s1} \left[\frac{[M](h_0 - y_c)}{J_b + 2\alpha_{s1} J_s} \right] \frac{\psi(R_r)}{E_s} \quad (17)$$

где $[M]$ – предельный изгибающий момент, определяемый по условиям прочности в соответствии с СП 36.13330.2012.

Минимально допустимый радиус упругого изгиба определяется по формуле Навье с учетом ограничения ширины раскрытия нормальной поперечной трещины (18):

$$[r]_1 \geq \begin{cases} \frac{0,8E_b J_b + E_0 J_0}{M}, a_{cr} < 15 \cdot 10^{-5}, \text{ м} \\ [E_{b,red} J_{red}(a_{cr}) + E_0 J_0] \frac{\alpha_{s1}(h_0 - y_c)}{a_{cr} E_s (J_b + 2\alpha_{s1} J_s)}, a_{cr} \geq 15 \cdot 10^{-5} \text{ м.} \end{cases} \quad (18)$$

Проверка прочности трубопровода производится в соответствии с СП 36.13330.2012.

Следует отметить, что при применении рассмотренной методики, например для обетонированных труб, выполненных набрызгиванием балластного покрытия, или при балластировке участков трубопроводов на заболоченных или обводненных участках, необходимо скорректировать расчетную

модель с учетом конструктивных особенностей и технологии строительства.

Таким образом, разработана методика расчета на прочность и устойчивость подводных переходов из обетонированных труб, которая может быть применена в целях повышения надежности как при

строительстве, так и при КР магистральных трубопроводов.

Для внедрения методики расчета на прочность и устойчивость подводных переходов из обетонированных труб целесообразно разработать нормативный документ ОАО «Газпром» по проектированию подводных переходов с применением обетонированных труб.

Pipeline construction projects and overhauls: Concrete-coated pipe water crossings – strength and stability estimates

Filatov A.A. (OAO Gazprom, RF, St. Petersburg),
Topilin A.V., Veliyulin I.I., Reshetnikov A.D.,
Gorodnichenko V.I. (OOO Orgenergogaz, RF,
Moscow)

E-mail: v.gorodnichenko@oeg.gazprom.ru

Building on existing normative base governing the civil, industry, and hydro engineering areas, a new methodology has been developed in Russia. It mainly focuses on strength and stability estimates for major concrete-coated pipes used in water crossing construction projects and major overhauls. Main methodology provisions include ballast coating thickness adjustments, defining key forces, crack opening, tolerable bending radius, along with strength and stability tests. This methodology approach is expected to help improve water crossing operating reliability when addressing both greenfield projects and major crossing overhauls.

Keywords: pipelines, water crossing, strength estimates, stability, concrete coating, crack opening, bending radius, construction, overhauls.



Новости отрасли

Опробована технология проведения ремонта нефтепровода Заполярье – Пурпе на участке надземной прокладки

Технология проведения ремонта (замены) трубопровода на участке надземной прокладки магистрального нефтепровода Заполярье – Пурпе опробована в АО «Транснефть – Сибирь».

Тестовые работы по вырезке «катушки» (участка трубы) проводились на строящемся участке надземной прокладки нефтепровода диаметром 820 мм с заводской теплоизоляцией из пенополиуретана толщиной 100 мм. Участок располагался между неподвижными опорами.

Работы проводились в течение пяти дней в несколько этапов. Подготовительный этап включал проверку разрешительной и исполнительной документации на тестовый участок нефтепровода, наличие оборудования, машин и механизмов. До начала работ были произведены монтаж специальной площадки для проведения сварочно-монтажных работ в соответствии с планом производства и Программой апробации технологии проведения ремонта, а также приварка «катушек» с заглушками к торцам тестового участка и подключение двух универсальных подогревателей УМП-400.

В ходе основных работ в месте вырезки «катушки» были демонтированы теплоизоляционное и изоляционное покрытия с применением шлифовальных машинок и скребков, произведена фиксация трубопровода на опорах с применением 4 фиксирующих приспособлений.

Вырезка «катушки» длиной 890 мм производилась с применением двух машинок для безогневой резки труб «Волжанка-2». После приведения торцов трубопровода в соосность с применением двух трубоукладчиков и фиксирующих приспособлений, разметки и монтажа «катушки» был произведен контроль качества сварных соединений (внешний осмотр, ультразвуковой и рентгенографический контроль), получены положительные результаты сварочных работ.

Далее на «катушку» и сварные соединения было заново нанесено изоляционное покрытие с применением термоусаживающихся манжет, проведен контроль качества нанесения изоляционных материалов (контроль диэлектрической сплошности и адгезии нанесения изоляционного покрытия). Произведены теплоизоляция участка и монтаж кожуха с проведением контроля качества.

По результатам проведенных тестовых ремонтных работ комиссией, в состав которой вошли представители АО «Транснефть – Сибирь», ООО «НИИ Транснефть» и СМУ-7 ООО «Ямалмеханизация», был сделан вывод, что разработанная технология проведения ремонта обеспечивает безопасное выполнение работ на участках надземной прокладки нефтепровода.

По информации АО «Транснефть – Сибирь»

