

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДА ИЗ ОБЕТОНИРОВАННЫХ ТРУБ С КОЛЬЦЕВЫМИ ПРОРЕЗЯМИ

УДК 621.644.07

В.Я. Великоднев, д. т. н., ООО «Трубные инновационные технологии» (Москва, РФ), info@pipeintech.com

Г.В. Котишевский, АО «Газпром СтройТЭК Салават» (Москва, РФ), info@gazpromss.ru

А.О. Подвойский, к. т. н., АО «Газпром СтройТЭК Салават», podvoisky.a@gazpromss.ru

При сооружении подводных переходов наиболее надежным и эффективным способом балластировки является способ, предполагающий использование труб со сплошным бетонным покрытием. В статье рассматриваются два способа уменьшения эффекта локального возмущения полей напряжений в необетонированной зоне трубопровода. Первый заключается в увеличении радиуса упругого изгиба обетонированного трубопровода до значений, соответствующих допустимым упругим напряжениям в стенке трубопровода без бетонного покрытия. Второй способ состоит в том, чтобы разбить обетонированный слой на участки, деформирующиеся независимо, с помощью регулярных кольцевых прорезей в обетонированном слое, и таким образом резко уменьшить степень локальности деформирования стальной трубы. Для анализа степени локализации напряженно-деформированного состояния стальной трубы разработана методика расчета радиуса упругого изгиба, основанная на результатах численного эксперимента и основных концепциях теории анализа размерностей. Предлагается простое аналитическое решение задачи о допустимом радиусе упругого изгиба обетонированного трубопровода, которое может быть положено в основу нормативных документов, регламентирующих порядок проектирования, сооружения и эксплуатации магистральных трубопроводов с бетонным покрытием. В основе второго способа лежит идея уменьшить допустимый радиус изгиба обетонированного трубопровода путем устройства в бетонном покрытии кольцевых прорезей с регулярностью, позволяющей снизить негативный эффект локальных всплесков напряжений и уменьшить изгибную жесткость трубопровода, принимая во внимание деформацию слоя антикоррозионного покрытия. Такое решение учитывает результаты численного моделирования плети, составленной из двух обетонированных труб, нагруженной собственным весом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ОБЕТОНИРОВАННАЯ ТРУБА, РАДИУС УПРУГОГО ИЗГИБА, КОЛЬЦЕВЫЕ ПРОРЕЗИ, ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД, ИЗГИБНАЯ ЖЕСТКОСТЬ.

Как показывает практика строительства подводных переходов, наиболее надежным и эффективным способом балластировки является способ с использованием труб со сплошным бетонным армированным покрытием (ОТ).

К основным преимуществам ОТ следует отнести: защиту изоляционного покрытия и металла трубопровода от механических повреждений при строительстве и эксплуатации; исключение необходимости применения защитной деревянной футеров-

ки; уменьшение тягового усилия на береговых участках за счет использования инвентарных спусковых устройств, а на подводных участках – за счет особенностей конструкции покрытия, в результате чего исключается сопротивление, возникающее при заглублении кромок одиночных утяжелителей в грунт; исключение возможности смещения бетонного покрытия (БП) относительно тела трубы при сооружении подводного перехода методом протаскивания.

При этом к недостаткам труб со сплошным БП относят увеличение изгибной жесткости поперечного сечения трубопровода.

Опасность заключается в том, что при изгибе трубопровода с монолитным сплошным БП в силу различий изгибной жесткости сечения стального трубопровода в необетонированной зоне и изгибной жесткости сечения в зоне, защищенной БП, напряжения (например, продольные) локализируются в окрестности кольцевого сварного шва, достигая макси-

Velikodnev V.Ya., Doctor of Sciences (Engineering), Pipe Innovation Technologies LLC (Moscow, Russian Federation), info@pipeintech.com

Kotishvsky G.V., Gazprom StroyTEK Salavat JSC (Moscow, Russian Federation), info@gazpromss.ru

Podvoisky A.O., Candidate of Sciences (Engineering), Gazprom StroyTEK Salavat JSC, podvoisky.a@gazpromss.ru

Analysis of the stressedly-deformed state of the pipeline from the concrete weight coated pipes with ring slots

The most reliable and effective method of ballasting of the underwater crossings is the use of pipes with a concrete coating. High bending stiffness of pipes with concrete weight coating is a main drawback. The danger is that the stresses are localized in an unprotected pipeline zone. Two ways of reducing the effect of stress fields local disturbance in the unprotected pipeline zone are considered in this article. The first method consists in increasing the elastic bending radius of the monolithic pipeline. The developed method of calculating elastic bending radius is based on the results of a numerical experiment and the basic concepts of the theory of dimensional analysis. A simple analytical solution of the elastic bending radius problem of pipeline with concrete coating is proposed. This decision can be taken as the basis for regulatory documents regulating the design, construction and operation of main pipelines with concrete covering. Reliability and security of the underwater passage can be increased if the proposed solution is implemented in the normative documentation. The second method is based on the idea of reducing the allowable bend radius of a pipeline with a concrete covering by creating in the concrete coating ring slots. This solution takes into account the results of numerical simulation of the pipeline with concrete coating loaded with its own weight. Recommendations on ring slots can improve the reliability of underwater transitions.

KEYWORDS: PIPE WITH CONCRETE WEIGHT COATING, BEND RADIUS, RING SLOTS, NUMERICAL METHODS, BENDING STIFFNESS.

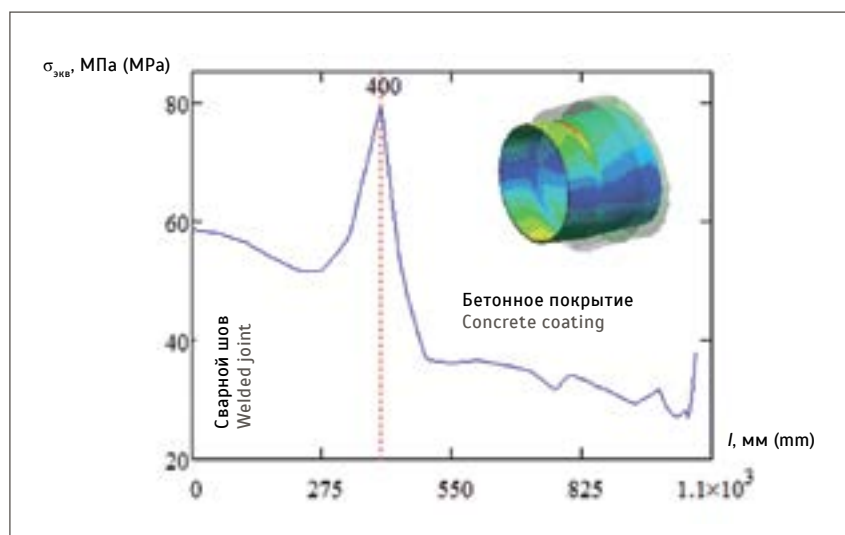


Рис. 1. Эпюра распределения эквивалентных по Мизесу напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ в незащищенной бетонным покрытием зоне трубопровода (вдоль образующей трубы l , наиболее удаленной от нейтральной линии)

Fig. 1. Distribution epure of the von Mises equivalent stresses $\sigma_{\text{экв}}$ in a section of a pipeline which is not protected by a concrete coating (across the constituent pipe l which is the most distant from the neutral line)

мальных значений по мере приближения к БП (рис. 1).

Радиус упругого изгиба (РУИ) трубопровода из ОТ рекомендуется вычислять в соответствии со сводами правил [1, 2], согласно которым РУИ трубопровода без БП не отличается от РУИ трубопровода с БП. Однако в действительности суммарные продольные

напряжения могут значительно превысить продольные напряжения, отвечающие упруго искривленному трубопроводу без БП, подтверждение чему содержится в работе [3].

Эффект локального возмущения полей напряжений в необетонированной зоне трубопровода можно снизить, увеличив РУИ тру-

бопровода из ОТ так, чтобы максимальное значение продольных напряжений в трубопроводе с БП оказалось равным соответствующему напряжению в трубопроводе без БП. Важно отметить, что на сегодняшний день не существует нормативных документов или каких-либо других материалов, регламентирующих порядок расчета РУИ трубопровода с БП и предлагающих удобный надежный аналитический инструмент для вычислений. Единственным документом, в котором косвенно учитывается влияние особенностей распределения напряжений на РУИ, является ВСН 005-88 [4]. В работе [5] предлагается методика вычисления РУИ обетонированного трубопровода на основе критического значения ширины раскрытия нормальной поперечной трещины в растянутой зоне БП. Впрочем, концепция эта – сложная, соотношениями пользоваться неудобно, а на последнем этапе требуется корректировка оценок РУИ численными методами.

Ниже приводятся основные положения предлагаемого подхода к вычислению РУИ трубопровода из ОТ с учетом местных возмущений поля напряжений.

Соотношение для коэффициента концентрации напряжений в незащищенной БП зоне трубопровода можно записать в следующем виде:

$$\alpha_p = \frac{(\sigma_{np}^p)_{FEM}^\beta}{M} \cdot \frac{2J_{тр}}{D_{тр}}, \quad (1)$$

где $(\sigma_{np}^p)_{FEM}^\beta$ – максимальное продольное напряжение в неопетонированной зоне трубопровода, полученное из численного эксперимента; M – изгибающий момент; $J_{тр}$ – момент инерции сечения трубы; $D_{тр}$ – наружный диаметр трубы.

Далее, исходя из теории анализа размерностей, можно предположить следующую зависимость:

$$\frac{(\sigma_{np}^p)_{FEM}^\beta}{M} = \Phi \left[\frac{D_{6n}}{2J_{6n}} \right], \quad (2)$$

где $\Phi[\cdot]$ – искомая функция; D_{6n} – наружный диаметр БП; J_{6n} – момент инерции сечения БП.

Варьируя параметры соотношения (2), а затем обработав результаты численного эксперимента, можно прийти к выводу, что зависимость (2) линейна и представляется в виде:

$$\frac{(\sigma_{np}^p)_{FEM}^\beta}{M} = k \cdot \left(c - \frac{D_{6n}}{2J_{6n}} \right), \quad (3)$$

где k – коэффициент пропорциональности (допустимо принять равным 1); c – смещение.

Для идентификации параметра c , учитывая результаты численного эксперимента, на основе теории анализа размерностей можно предложить следующую зависимость:

$$c = \frac{1}{2} W_{тр}^{-1} \cdot \exp \left[\frac{\mu_{6n}}{\mu_{тр}} \ln \left(\frac{E_{тр}}{E_{6n}} \right) \right], \quad (4)$$

где $W_{тр}$ – момент сопротивления сечения трубы; μ_{6n} , $\mu_{тр}$ – коэффициенты поперечной деформации материала БП и материала стальной трубы, соответственно; E_{6n} , $E_{тр}$ – модули упругости материала БП и материала стальной трубы, соответственно.

Тогда соотношение (1) запишется в виде:

$$\alpha_p = \left\{ W_{тр}^{-1} \cdot \exp \left[\frac{\mu_{6n}}{\mu_{тр}} \ln \left(\frac{E_{тр}}{E_{6n}} \right) \right] - \frac{D_{6n}}{J_{6n}} \right\} \cdot \frac{J_{тр}}{D_{тр}}. \quad (5)$$

Наконец, РУИ трубопровода из ОТ ρ_{6n} можно вычислить по формуле:

$$\rho_{6n} = \alpha_p \cdot \rho_0, \quad (6)$$

где ρ_0 – РУИ трубопровода, вычисленный по [9].

В основе предлагаемых соотношений (5) и (6) лежат линейные модели материала.

Так, например, снижение изгибной жесткости БП за счет образования трещин во внимание не принималось, однако этот эффект может быть учтен в рамках теории Вильяма – Варнке или какой-либо другой альтернативной теории (Друкера – Прагера и т. п.).

Можно утверждать, что учет деградационных механизмов, сопровождающих деформационные процессы в БП, приведет к менее консервативным оценкам РУИ ρ_{6n} , но, принимая во внимание всю сложность системы «обетонированный трубопровод – упруго-вязкопластичный грунт», есть основания считать, что консервативность модели (5) будет уместной.

Увеличение РУИ обетонированного трубопровода приведет и к увеличению стоимости земляных и строительных работ, поэтому в технически и экономически обоснованных случаях интерес представляет другой подход к снижению местных возмущений поля напряжений в незащищенной зоне трубопровода из ОТ и, как следствие, к снижению изгибной жесткости обетонированного трубопровода в целом.

Добиться такого снижения можно путем устройства специальных кольцевых прорезей (КП) в БП. Например, в п. 4.2.7 ВСН 010–88 [6] отмечается, что для уменьшения изгибной жесткости ОТ БП может

иметь КП. Необходимость такого конструктивного решения определяет проектная организация с учетом напряжений в стенках стальной трубы в неопетонированных зонах.

Пункт 7.10 СП 108–34–97 [7] утверждает, что БП на ОТ может иметь КП для уменьшения жесткости труб при изгибах. Необходимость устройства прорезей определяется проектом.

В п. 2.10 Р 589–86 [8] для снижения изгибной жесткости трубопровода аналогично предлагается устраивать в БП КП. Есть и другие документы, которые так или иначе касаются этого вопроса.

Таким образом, в нормативной документации нашла свое отражение проблема необходимости учета особенности распределения напряжений в незащищенной зоне трубопровода, БП которого имеет КП.

Устройство КП в БП направлено прежде всего на решение задачи применения ОТ на участках перехода с РУИ порядка 1000 наружных диаметров трубопровода. На сегодняшний день эта задача недостаточно проработана, а в литературе, включая нормативные документы, отсутствуют научно обоснованные практические рекомендации относительно геометрии КП, их глубины, шага размещения и пр., что и обуславливает актуальность настоящей работы.

Еще один важный аспект применения трубопроводов из ОТ с КП связан с тем, что, как отмечается в работе [9], переформирование берегов и дна реки часто сопровождается размывом грунта, что приводит к появлению открытых участков на переходе. Образующиеся свободные пролеты газопровода испытывают не только воздействие эксплуатационных нагрузок, но и сложное гидродинамическое воздействие потока воды, повышающее риск возникновения аварийных ситуаций, в особенности с учетом всплесков напряжений в незащищенной зоне трубопровода.

Применение же труб с «разрезным» бетоном может снизить потенциальную опасность перенапряжения наиболее уязвимых участков подводного перехода.

В масштабах Единой сети газоснабжения на переходах газопроводов через водные препятствия с 1981 по 2000 г. было зафиксировано 46 аварий [3], большая часть которых была связана с размывом, провисом, всплытием и разрывом трубопровода, браком строительно-монтажных работ и повреждениями, нанесенными речными судами. Важно заметить, что участки трубопроводов размываются в первую очередь из-за процесса переформирования русла реки, характер развития которого зависит от множества случайных факторов, и потому прогнозирование его затруднено [9].

Проанализируем результаты численного моделирования трубопровода диаметром 1420 мм с толщиной стенки 32 мм и толщиной БП 150 мм с устроенными в нем КП.

Модели материалов были приняты линейно-упругими, что не уменьшает общности и не отражается на выводах работы, так как в данном случае интерес представляет относительная качественная оценка. Армирование учитывалось как мембранное «размазанное» с помощью специального конечного элемента REINF.

Традиционно для моделирования бетона в ANSYS используется следующая связка: специальный конечный элемент SOLID65; модель TB,CONCR (может учитывать растрескивание и разрушение); модель мультилинейного изотропного упрочнения TB,MISO для представления нелинейной связи между напряжениями и деформациями бетона. Арматура моделируется стержневыми (LINK180) или балочными (BEAM188) конечными элементами, как правило, с билинейной аппроксимацией кривой дефор-

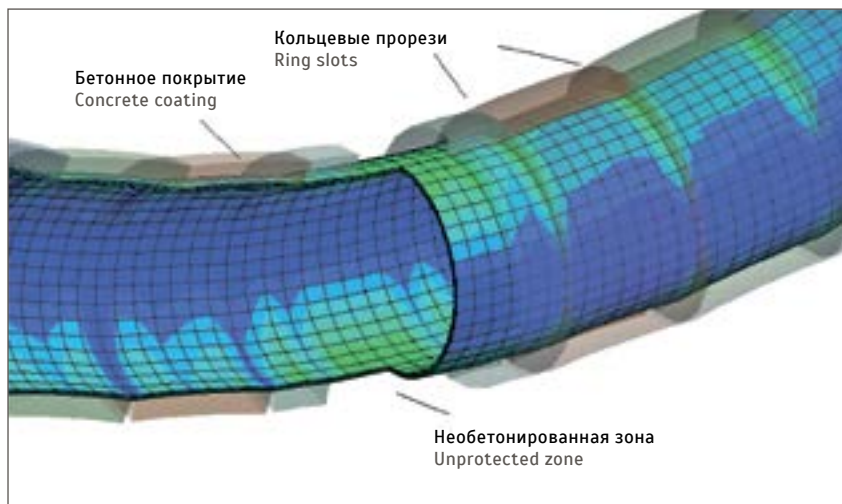


Рис. 2. Поле распределения эквивалентных по Мизесу напряжений в трубопроводе с бетонным армированным покрытием

Fig. 2. Distribution field of the von Mises equivalent stresses in the pipeline with a concrete reinforced coating

мирования (TB,BISO), а для материала трубы используется та же модель TB,MISO.

Дополнительно требуется учесть геометрическую нелинейность конструкции (NLGEOM,ON), т. е. нелинейную связь между усилиями и перемещениями, что проявляется в пересчете матрицы жесткости системы на каждой равновесной итерации.

Результаты такого подхода к моделированию, безусловно, ближе к результатам моделирования методами экспериментальной механики, однако вычислительная сложность и время расчета могут быть значительными. Кроме того, высока вероятность проблем

с обеспечением сходимости решения.

Как уже говорилось, для авторов статьи интерес представляла относительная оценка, так сказать, качественная картина эффекта, и потому допустимо было ограничиться линейным приближением. Граничные условия трубопровода задавались в соответствии со схемой шарнирно-опертой балки (рис. 2), нагруженной собственным весом. Из соображений редуцирования размерности задачи рассматривалась только четверть модели.

Численный анализ НДС обетонированного трубопровода проводился в два этапа на основании



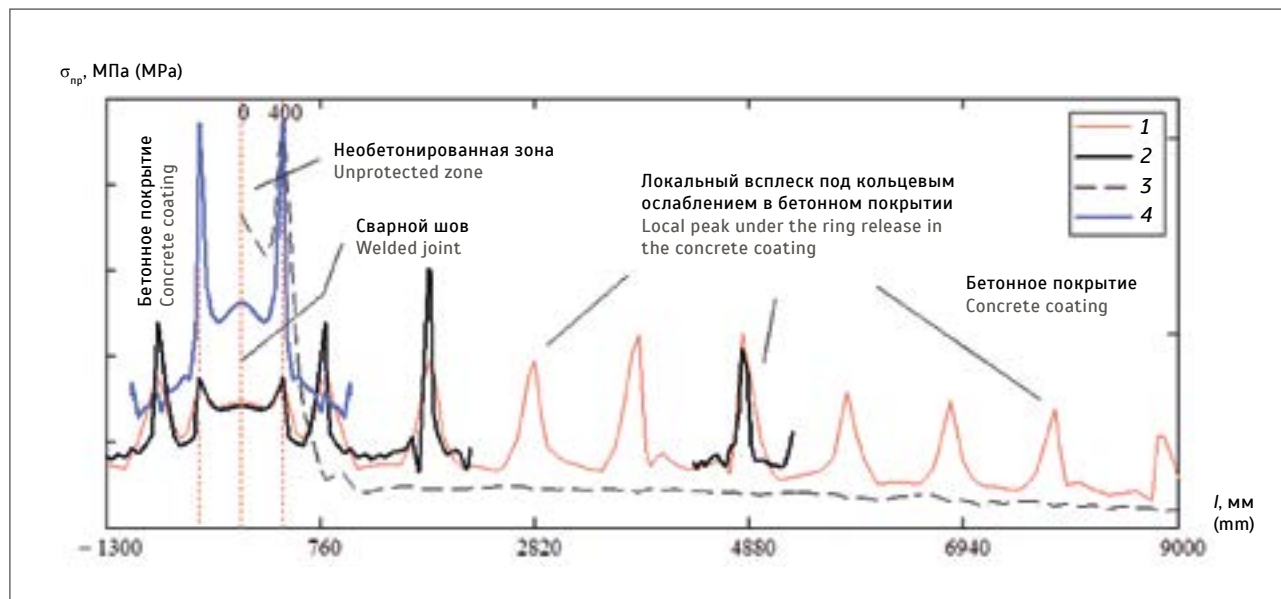


Рис. 3. Эпюры распределения продольных напряжений $\sigma_{пр}$ вдоль образующей трубы в растянутой зоне: 1 – на «грубой» модели трубопровода с кольцевыми прорезями; 2 – на «уточненной» модели трубопровода с кольцевыми прорезями; 3 – на «грубой» модели трубопровода со сплошным бетонным покрытием; 4 – на «уточненной» модели трубопровода со сплошным бетонным покрытием

Fig. 3. Epures of longitudinal stresses $\sigma_{пр}$ across the constituent pipe in the tensile region: 1 – on a “crude” model of a pipeline with ring slots; 2 – on a “refined” model of a pipeline with ring slots; 3 – on a “crude” model of a pipeline with a uniform concrete coating; 4 – on a “refined” model of a pipeline with a uniform concrete coating

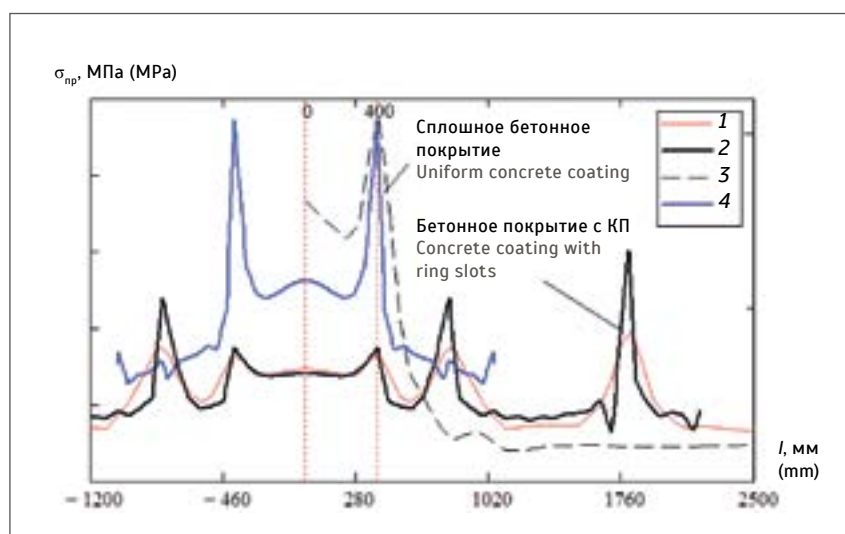


Рис. 4. Фрагмент эпюры распределения продольных напряжений $\sigma_{пр}$ вдоль образующей трубы в растянутой зоне (1–4 – см. рис. 3)
Fig. 4. Fragment of the distribution epure of longitudinal stresses $\sigma_{пр}$ across the constituent pipe in the tensile region (1–4 – see fig. 3)

концепции субмоделирования, когда узловые перемещения «грубой» модели переносятся на границы модели «уточненной».

Поперечное сечение КП было принято в форме трапеции с бóльшим основанием, расположенным дальше от осевой линии

трубопровода. Влияние формы поперечного сечения прорези и ее размеров на НДС трубопровода представляет отдельную тему для исследования.

В научно-техническом обзоре [10] приводится пример конструкции БП с КП при строитель-

стве подводного перехода через р. Волгу в районе г. Рыбинска и пример конструкции БП морского трубопровода, спроектированного для укладки в Северном море (месторождение Фортис).

Так вот, для подводного перехода через реку КП БП имеют большой угол раскрытия (ширина прорези по большому основанию трапеции – примерно 160 мм), чем для морского перехода (ширина – около 5 мм по большому основанию трапеции).

Очевидно, что такое решение было вызвано тем обстоятельством, что подводный переход через реку должен быть более податливым (морские трубопроводы, как правило, укладываются на относительно «спокойное» дно).

На рис. 3, 4 представлены эпюры распределения продольных напряжений в трубопроводе с БП, имеющим КП.

Как показывает анализ результатов эпюр, представленных на рис. 3 и 4, КП приводят к уменьшению максимальных значений продольных напряжений в наибо-

лее уязвимых зонах подводного перехода, что повышает несущую способность этого участка.

Обобщая результаты численно-го моделирования, можно предложить следующие соотношения по геометрии и размещению КП.

Предлагается глубину прорези $\delta_{кп}$ принимать независимо от наружного диаметра трубопровода и вычислять как $\delta_{кп} = (0,75...0,80) \cdot \delta_{гн}$, а шаг между КП принимать как линейно зависимый от наружного диаметра трубопровода $D_{тр}$.

КП предлагается выполнять несквозными, чтобы исключить вероятность повреждения изоляционного покрытия при нанесении прорези. В любом случае при изгибе плети на поверхности прорези зародится трещина, которая в ходе деформирования трубопровода будет развиваться и в итоге перережет перемычку БП.

Расстояние от торца БП до первой КП можно взять $<0,56 \cdot D_{тр}$, а расстояние между следующими КП $- <(0,70...0,80) \cdot D_{тр}$.

ВЫВОДЫ

1. Модель (5) отличается гибкостью, простотой использования и позволяет проводить сравнительный анализ различных технических решений по основным параметрам материала и геометрии обетонированного трубопровода. Предлагаемое решение рекомендуется к практическому использованию проектными организациями на этапе разработки соответствующей документации для получения экспресс-оценок РУИ.

2. Учитывая особенности распределения полей напряжений в зонах магистрального трубопровода, не защищенных БП, такие участки должны быть включены в перечень потенциально опасных, на которых следует проводить дополнительные расчетно-аналитические работы.

3. На основании результатов численного моделирования трубопровода с БП, имеющим КП, были предложены рекоменда-

ции по геометрии, глубине и шагу нанесения КП для уменьшения максимальных значений продольных напряжений в области локального возмущения напряжений, нацеленные на повышение несущей способности и безопасности эксплуатации подводных переходов. Выявленные соотношения для КП предлагается внедрить в практику использования проектными организациями.

4. Использование аналитической модели (5), (6) и рекомендаций по КП позволит повысить надежность и безопасность эксплуатации подводных переходов, построенных с использованием ОТ, включая участки с РУИ порядка 1000 диаметров трубопровода. В результате будут снижены или сведены к минимуму затраты на ремонт и реконструкцию подводных переходов, восстановление нормальной работы которых, как известно, сопряжено с серьезными трудностями. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85. М.: Росстандарт, 2012. 119 с.
2. СП 86.13330.2014. Магистральные трубопроводы. М.: Минстрой России, 2014. 225 с.
3. Филатов А.А., Поляков В.А., Велиулин И.И. К определению расчетных нагрузок укладки участков газопроводов из обетонированных труб // Газовая промышленность. 2016. № 7-8. С. 48-55.
4. ВСН 005-88. Строительство промысловых стальных трубопроводов. Технология и организация. М.: ВНИИСТ, 1989. 83 с.
5. Подвойский А.О., Крылов П.В., Шарохин В.Ю., Решетников А.Д. Концепция расчета на прочность магистральных трубопроводов из обетонированных труб для подводных переходов // Вестник машиностроения. 2015. № 7. С. 11-16.
6. ВСН 010-88. Строительство магистральных трубопроводов. Подводные переходы. М.: ВНИИСТ, 1988. 115 с.
7. СП 108-34-97. Свод правил по сооружению магистральных газопроводов. Сооружение подводных переходов. М.: ИРЦ Газпром, 1998. 44 с.
8. Р 589-86. Рекомендации по балластировке трубопроводов на подводных переходах. М.: ВНИИСТ, 1986. 50 с.
9. Исламгалева Л.Ф. Напряженно-деформированное состояние подводных переходов магистральных газопроводов с учетом изменения степени водонасыщенности грунта на прилегающих подземных участках: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Уфимский гос. нефтяной техн. ун-т, 2013. 179 с.
10. Крупкин Б.Н., Левин С.И. Подводные трубопроводы с утяжеляющими покрытиями: Науч.-техн. обзор. М.: НИПИЭСУнефтегазстрой, 1976. 44 с.

REFERENCES

1. Set of Rules SP 36.13330.2012. Trunk Pipelines. Revised Edition of the Construction Rules and Regulations SNiP 2.05.06-85. Moscow, Rosstandart, 2012, 119 p. (In Russian)
2. Set of Rules SP 86.13330.2014. Trunk Pipelines. Moscow, Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation, 2014, 225 p. (In Russian)
3. Filatov A.A., Polyakov V.A., Veliulin I.I. Towards the Determination of the Calculated Laying Loads for the Pipeline Divisions Made of Concrete Coated Pipes. *Gazovaya Promyshlennost' = Gas Industry*, 2016, No. 7-8, P. 48-55. (In Russian)
4. Industrial Construction Standards VSN 005-88. Construction of Field Steel Pipelines. Technology and Organization. Moscow, All-Union Research Institute for Construction and Operation of Pipelines, 1989, 83 p. (In Russian)
5. Podvoyskiy A.O., Krylov P.V., Sharokhin V.Yu., Reshetnikov A.D. Principles of Strength Analysis of Trunk Pipelines from Concrete Weight Coated Pipes for Water Barriers. *Vestnik Mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*, 2015, No. 7, P. 11-16. (In Russian)
6. Industrial Construction Standards VSN 010-88. Construction of Trunk Pipelines. Underwater Transitions. Moscow, All-Union Research Institute for Construction and Operation of Pipelines, 1988, 115 p. (In Russian)
7. Set of Rules SP 108-34-97. Set of Rules for the Construction of Trunk Gas Pipelines. The Construction of Underwater Transitions. Moscow, Information and Advertising Center Gazprom, 1998, 44 p. (In Russian)
8. R 589-86. Recommendations for Ballasting Pipelines on Underwater Crossings. Moscow, All-Union Research Institute for Construction and Operation of Pipelines, 1986, 50 p. (In Russian)
9. Islamgaleeva L.F. Stressedly-Deformed State of Underwater Transitions of Trunk Gas Pipelines Taking into Account Changes in the Degree of Water Saturation of the Soil in Adjacent Underground Areas. PhD Thesis (Engineering). Ufa, Ufa State Petroleum Technological University, 2013, 179 p. (In Russian)
10. Krupkin B.N., Levin S.I. Underwater Pipelines with Weighting Coatings. Overview. Moscow, Research and Design-Experimental Institute of Economics and Automated Control Systems in the Construction of Enterprises of the Oil and Gas Industry, 1976, 44 p. (In Russian)