

## 05.23.07 Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

УДК 502/504: 627.83:626.01

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-29-37

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОТПОРА ГРУНТА И ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПРИ РАСЧЕТЕ ПОДЗЕМНЫХ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ВОДЫ

**КСЕНОФОНТОВА ТАТЬЯНА КИРИЛЛОВНА**, канд. техн. наук, доцент

tksenofontova@rgau-msha.ru, Ksentanya@yandex.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Б. Академическая 44, корпус 29. Россия

Одним из наиболее распространенных видов гидротехнических сооружений являются железобетонные трубопроводы, используемые в различных областях водохозяйственной деятельности. Их применяют в системах водоснабжения и водоотведения, как подводящие и отводящие трубопроводы ГЭС и насосных станций, в системе мелиорации. Ввиду распространенности этих сооружений и, учитывая их большую протяженность, вопросы проектирования играют важную роль. В настоящее время при расчете железобетонных трубопроводов монолитных и сборных, рассматривается кольцо трубы единичной ширины как линейно-упругое тело в условиях плоско-деформированного состояния. При этом считается, что железобетонные трубопроводы обладают достаточно большой жесткостью, поэтому влияние отпора грунта, обусловленное их деформацией, очень мало и его при проектировании не учитывают. Кроме того, в железобетоне, из которого сделаны трубы, уже при небольших нагрузках возникают нелинейные деформации, связанные с проявлением его ползучести. Нелинейная работа железобетона возникает также в случае образования трещин в оболочке трубопровода, а в наиболее напряженных ее зонах возможно образование трещин и появление напряжений текучести в арматуре. Указанные факторы приводят к изменению жесткости сечений оболочки трубопровода и перераспределению усилий. В статье рассматривается, как влияет наличие раструбных стыков на напряженное состояние оболочки подземного трубопровода, насколько оправдано предположение о малом влиянии отпора грунта на работу сборного водопроводящего трубопровода, а также исследуется влияние физической нелинейности железобетона на результаты его расчета в пространственной постановке.

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения, железобетонный трубопровод из раструбных труб, нагрузки от грунта и гидростатического давления воды, внутренние усилия, армирование, отпор грунта

**Формат цитирования:** Ксенофонтова Т.К. Оценка влияния отпора грунта и физической нелинейности железобетона при расчете подземных сборных железобетонных трубопроводов для воды // Природообустройство. – 2021. – № 1. – С. 29-37. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-29-37.

© Ксенофонтова Т.К., 2021

Original article

## ASSESSMENT OF THE IMPACT OF SOIL RESISTANCE AND PHYSICAL NON-LINEARITY OF REINFORCED CONCRETE IN THE CALCULATION OF UNDERGROUND PREFABRICATED REINFORCED CONCRETE WATER PIPELINES

*KSENOFONTOVA TATYANA KIRILLOVNA*, candidate of technical sciences, associate professor

tksenofontova@rgau-msha.ru, Ksentanya@yandex.ru

Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, B. Academicheskaya, 44, korpus 29, Russia

*One of the most common types of hydraulic structures is reinforced concrete pipelines used in various areas of water management. They are used in water supply and disposal systems as supply and discharge pipelines of hydroelectric power plants and pumping stations, in the system of land reclamation. Due to the prevalence of these structures and their large lengths, design issues play an important role. Currently, when calculating reinforced concrete pipelines, both monolithic and prefabricated, the pipe ring of a single width is considered as a linear-elastic body under the conditions of a plane-deformed state. At the same time, it is considered that reinforced concrete pipelines have a sufficiently high rigidity, so the impact of soil resistance due to their deformation is very small and it is not taken into account when designing. In addition, in reinforced concrete, from which pipes are made, even at low loads, nonlinear deformations occur associated with the development of its creep. Non-linear operation of reinforced concrete also occurs in the case of cracks in the pipeline shell, and in its most stressed zones cracks may be formed and stresses may appear in the reinforcement. These factors lead to a change in the rigidity of the cross sections of the pipeline shell and redistribution. The article considers how the presence of expanded joints affects the stress state of the underground pipeline shell, how justified is the assumption that the ground resistance has a small effect on the operation of the prefabricated water supply pipeline, and also there is examines the influence of the physical nonlinearity of reinforced concrete on the results of its calculation in the spatial setting.*

**Keywords:** *hydraulic structures, reinforced concrete pipeline made of inserted-joint pipes, loads from the ground and hydrostatic water pressure, internal forces, reinforcement, soil resistance*

**Format of citation:** *Ksenofontova T.K. Assessment of the impact of soil resistance and physical non-linearity of reinforced concrete in the calculation of underground prefabricated reinforced concrete water pipelines // Prirodoobustrojstvo. – 2021. – № 1. – S. 29-37. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-29-37.*

**Введение.** Совершенствование методов расчета подземных трубопроводов, служащих для транспортировки воды, является актуальной задачей, цель которой – повышение надежности эксплуатации этих сооружений. В настоящее время железобетонные трубопроводы рассчитывают как плоские конструкции в виде кольца единичной ширины [1, 2]. Такой подход в какой-то мере может быть оправдан для монолитных трубопроводов, имеющих на больших участках длины неизменные параметры сечений, условия опоры и нагрузки, но при рассмотрении трубопроводов, состоящих из звеньев труб, имеющих раструбы [3], он приводит к искажению расчетного напряженного состояния сооружения [4] по сравнению с реальностью.

Влияние наличия раструбов на работу трубопроводов было установлено при натурных

обследованиях насосных станций Приволжской оросительной системы [5]. Как показали исследования [6], при расчете подземных трубопроводов из железобетонных раструбных труб их надо рассматривать как пространственные конструкции. Кроме того, материал железобетон, из которого выполнен трубопровод, уже при небольших нагрузках проявляет пластические свойства в бетоне, а с увеличением нагрузок в арматуре могут возникнуть напряжения текучести, которые приводят к возникновению местных пластических шарниров в оболочке и к перераспределению усилий в сооружении. Расчетные внутренние усилия в трубопроводе могут быть в какой-то степени компенсированы учетом влияния отпора грунта обратной засыпки, возникающего при деформации оболочки сооружения, за счет чего можно более объективно оценить возможность применения

сборного трубопровода при различных условиях его эксплуатации. Оценка влияния этих факторов при расчете подземных железобетонных трубопроводов в пространственной постановке в настоящее время в литературе практически отсутствует.

#### Материалы и методы исследований.

Для расчета трубопровода с учетом его пространственной работы была создана расчетная модель, состоящая из трех раструбных труб. Для разработки модели использовались типовые конструкции [7] при внутреннем диаметре 2000 мм, толщине стенки 180 мм и классе бетона В45. Трубы были армированы двумя кольцевыми каркасами с арматурой диаметром 8 мм класса А400 с шагом витков 60 мм. Расчетные сопротивления бетона и арматуры принимались по СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения [8].

Расчет производился с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР 2019» методом конечных элементов. Расчетная модель участка трубопровода была сформирована из четырехузловых конечных элементов оболочечного типа с размерами, примерно равными 0,1 × 0,1 м. Стыки звеньев трубопровода между

собой соответствовали случаю соединения труб с помощью уплотнительного резинового кольца, одеваемого на втулку одной из стыкуемых труб. Такие стыки относятся к категории гибких стыков, при которых возможны ограниченные линейные и угловые деформации частей сооружения. Для реализации стыков между звеньями в расчетной модели трубопровода задавалась совместность линейных перемещений узлов конечных элементов по торцу раструба одной трубы с узлами конечных элементов по торцу втулки другой трубы, в то время как угловые деформации в местах стыков оставались свободными. На рисунке 1 показана расчетная модель участка трубопровода.

Нагрузками на трубы являлись собственный вес, давление грунта обратной засыпки, безнапорное внутреннее гидростатическое давление воды. Работа трубопровода в грунте рассматривалась для условий его заложения в насыпи из песка обратной засыпки при глубине, равной 3 м над шельгой. Механические характеристики обратной засыпки соответствовали значениям: угол внутреннего трения  $\varphi = 30^\circ$ , объемный вес  $\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$ .

На рисунке 2 показана расчетная эпюра давления грунта на трубопровод.

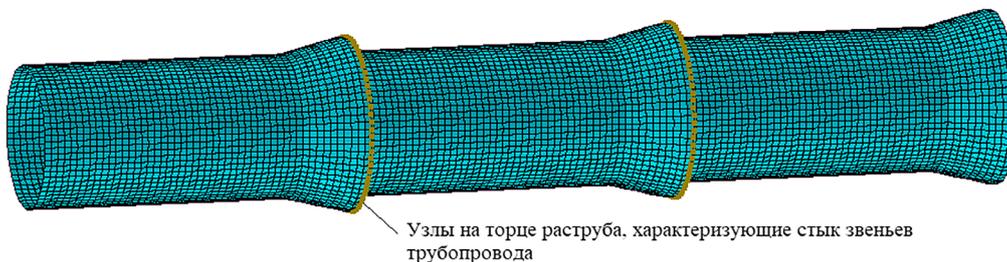


Рис. 1. Расчетная модель участка трубопровода

Fig. 1. Estimated model of the pipeline section

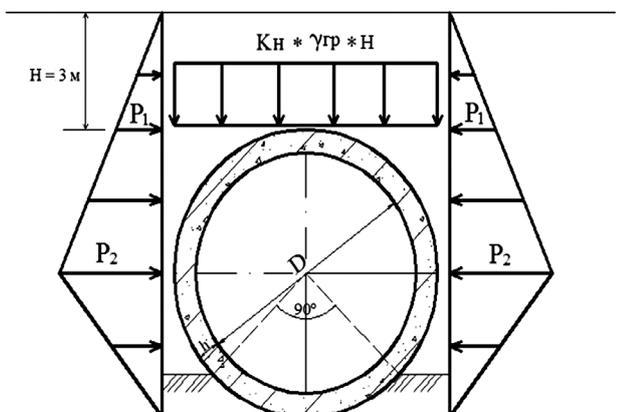


Рис. 2. Схема давления грунта на подземную трубу

Fig. 2. Scheme of soil pressure on the underground pipe

Давление грунта над шельгой трубы определялось с учетом коэффициента концентрации  $k_n = 1,5$ , который определялся по графику, приведенному в учебнике [1]. Исходя из этого, вертикальное давление грунта на верхнюю часть трубопровода составляло  $p = k_n \cdot \gamma_{\text{гр}} \cdot H = 81 \text{ кН/м}^2$ . Горизонтальное давление грунта определялось по зависимости  $p_h = \gamma_{\text{гр}} \cdot \lambda \cdot H$  с учетом коэффициента бокового давления, который для несвязного грунта обратной засыпки по Ш.О. Кулону может быть вычислен по формуле:

$$\lambda = \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2).$$

Тогда значения горизонтального давления грунта будут равны: на уровне

шелыги трубы  $p_1 = 18 \text{ кН/м}^2$ ; на уровне горизонтального диаметра  $p_2 = 24 \text{ кН/м}^2$ .

Трубы опирались на спирофилированное грунтовое основание с углом охвата  $90^\circ$  [9]. Для грунтового основания был принят суглинок с показателем текучести  $0,25 < I_L \leq 0,5$ , для которого модуль деформации грунта равен  $E = 19 \text{ МПа}$  [10]. В качестве модели грунтового основания использовалась реализованная в ПК «ЛИРА-САПР 2019» модель П.Л. Пастернака с двумя коэффициентами постели. Значения коэффициентов постели в ложе трубопровода вычислялись с помощью ПК «ЛИРА-САПР 2019» в зависимости от величины внешней нагрузки и вида грунта основания. Были получены значения:  $c_1 = 1,573 \cdot 10^4 \text{ кН/м}^3$ ;  $c_2 = 3,753 \cdot 10^3 \text{ кН/м}$ .

Отпор грунта обратной засышки на трубопровод учитывался при задании в зоне обратной засышки коэффициентов постели  $c_1$  и  $c_2$ . В работе [11] приведены рекомендации по определению величины коэффициентов

постели по контуру оболочки для жестких и полужестких труб. Если  $c_1$  – коэффициент постели в сечении лотка труб, то для шелыги рекомендуется коэффициент постели  $c_{1,0} = \frac{1}{4} c_1$ ; для бокового сечения –  $c_{1,\pi/2} = \frac{1}{3} c_1$ . Тогда в зоне контакта трубопровода с обратной засышкой имеем  $c_{1,0} = 3842,5 \text{ кН/м}^3$  и  $c_{1,\pi/2} = 5243,3 \text{ кН/м}^3$ . Аналогично для второго коэффициента постели:  $c_{2,0} = 938,25 \text{ кН/м}$  и  $c_{2,\pi/2} = 1251 \text{ кН/м}$ . Учитывая, что цель расчета – оценка влияния отпора грунта обратной засышки на работу подземного трубопровода, для зоны контакта трубопровода с обратной засышкой приближенно принимались средние значения коэффициентов:  $c_{1,0} = c_{1,\pi/2} = 4542,9 \text{ кН/м}^3$ ;  $c_{2,0} = c_{2,\pi/2} = 1094,6 \text{ кН/м}$ .

При учете физической нелинейности работы железобетона [12] принимались законы нелинейного деформирования бетона и арматуры, реализованные в «ЛИРА-САПР 2019» (рис. 3).

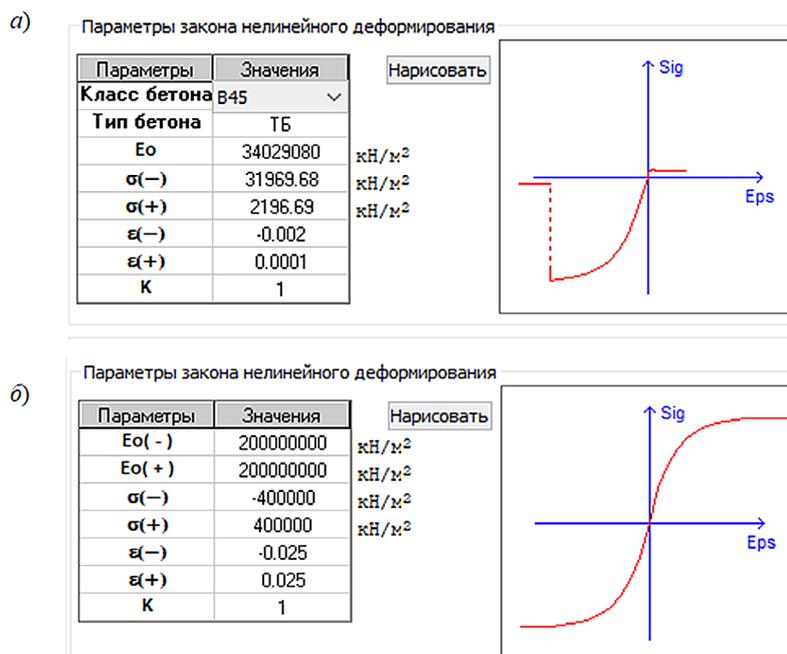


Рис. 3. Законы нелинейного деформирования для бетона (а) и арматуры (б)

Fig. 3. Laws of non-linear deformation for concrete (a) and armature (b)

При учете физической нелинейности работы железобетона на результаты расчета оказывает влияние последовательность приложения на трубопровод действующих нагрузок. В расчетах было учтено, что вначале в процессе монтажа участка трубопровода он испытывал нагрузку от собственного веса, затем к трубопроводу прикладывалось давление грунта обратной засышки в соответствии с эпюрой, приведенной на рисунке 2,

далее задавалась нагрузка от внутреннего гидростатического давления воды.

**Результаты исследований и их об- суждение.** На первом этапе исследований производился расчет трубопровода при его линейно-упругой работе без учета отпора обратной засышки. Как показали расчеты, наличие раструба у труб при действии расчетных нагрузок вызывает продольные смещения трубопровода в сторону раструбов

примерно на 60...70 мм. Глубина осадки составила около 18 мм.

Наиболее опасными изгибающими моментами в оболочке труб являются кольцевые изгибающие моменты  $M_x$  (рис. 4а). Изгибающие моменты, действующие вдоль трубы  $M_y$ , имеют наибольшие значения в зонах цилиндрической части, близко расположенных к раструбе (рис. 4б). Однако даже в этих зонах значения максимальных

моментов  $M_y$  более чем в 2,5 раза меньше значений кольцевых моментов  $M_x$ .

В кольцевом направлении максимальные изгибающие моменты, вызывающие растяжение внутренней поверхности трубы, возникают в зоне лотка,  $M_x = 43,2...43,4$  кНм/м, а наибольшие моменты, вызывающие растяжение наружной поверхности трубы, имеют место в боковых зонах (рис. 5),  $M_x = 39,2...39,3$  кНм/м.

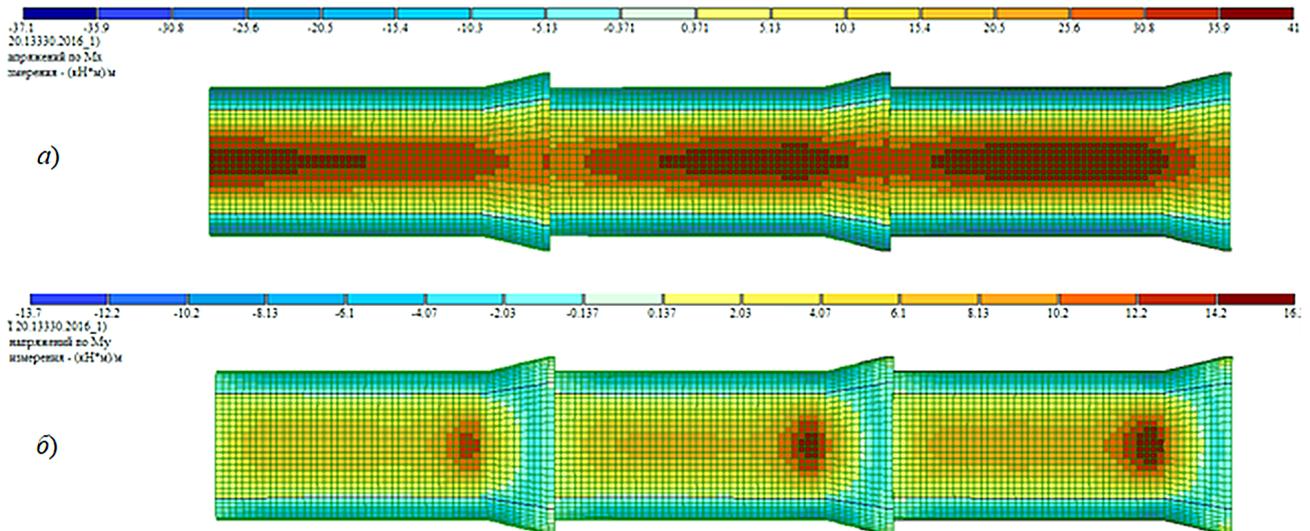


Рис. 4. Распределение изгибающих моментов в лотке трубопровода при его линейно-упругой работе:

- а – распределение кольцевых изгибающих моментов  $M_x$ ;  
б – распределение продольных изгибающих моментов  $M_y$

Fig. 4. Distribution of bending moments in the pipeline tray during its linear-elastic operation: а – distribution of ring-bending moments of  $M_x$ ; б – distribution of longitudinal bending moments of  $M_y$

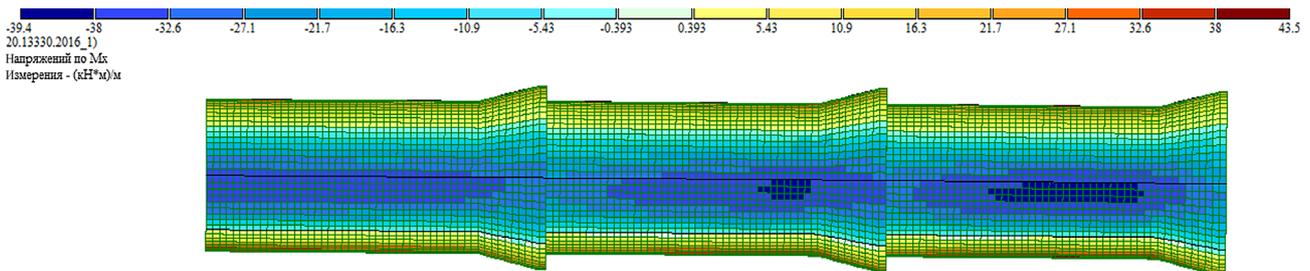


Рис. 5. Распределение изгибающих моментов в боковых сечениях трубопровода при его линейно-упругой работе

Fig. 5. Distribution of bending moments in the lateral sections of the pipeline during its linear-elastic operation

Как следует из рисунков 4а и 5, кольцевые изгибающие моменты неравномерно распределены по длине цилиндрической части труб. Наибольшие значения имеются в зонах, близко расположенных к центру тяжести труб и к раструбам, и только у первой трубы слева наибольшие усилия возникают у втулки цилиндрической части.

Распределение требуемой по прочности и трещиностойкости площади кольцевой арматуры соответствует распределению изгибающих моментов в оболочке трубопровода. Как показали расчеты, в трубах имеются значительные зоны как в лотке и шельге, так и в боковых зонах, где расчетная площадь арматуры превышает площадь

установленной кольцевой арматуры (рис. 6), что говорит о нарушении эксплуатационной

пригодности трубопровода и возможном его разрушении.

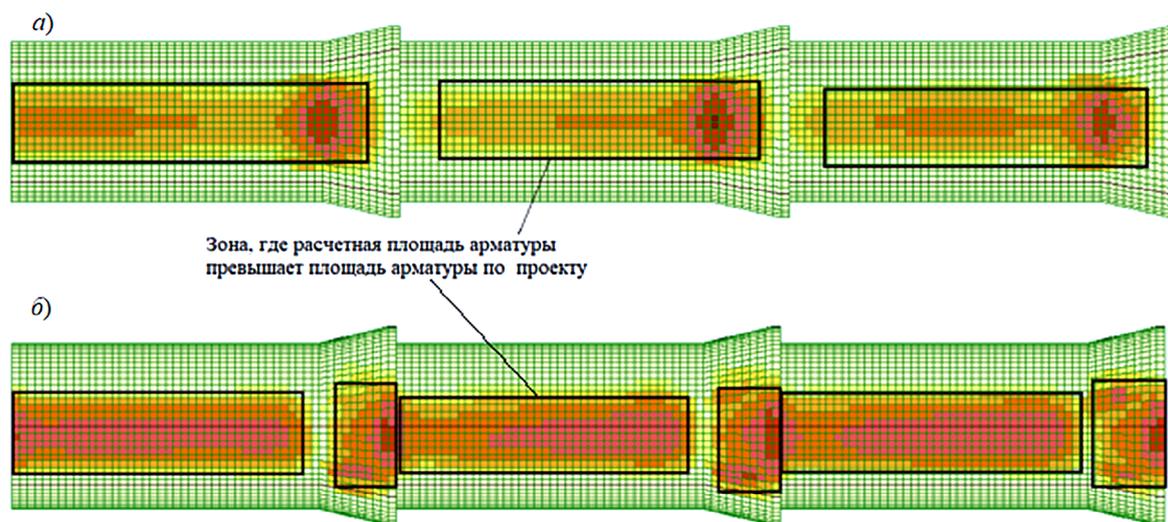


Рис. 6. Распределение расчетной площади арматуры в лотке, шельге (а) и в боковом сечении (б) трубопровода без учета отпора грунта обратной засыпки  
Fig. 6. Distribution of the estimated area of armature in the tray, crown (a) and in the lateral section (b) of the pipeline without taking into account the soil resistance of the backfilling

Однако, как показывает практика, железобетонные трубы даже при значительной глубине заложения успешно эксплуатируются как сооружения для транспортировки воды. По-видимому, это связано с тем, что нормальной эксплуатации труб помогает отпор грунта, возникающий при деформации их оболочки, ввиду чего в дальнейших исследованиях учитывалось влияние отпора обратной засыпки.

На втором этапе расчеты показали, что при учете отпора грунта обратной засыпки продольные перемещения участка трубопровода в сторону раструба стали значительно меньше и составили примерно 10...14 мм, что более реально отражает работу подземного трубопровода. При этом осадка трубопровода изменилась мало, составив около 12 мм.

Значительно уменьшились как кольцевые изгибающие моменты в оболочке трубопровода, так и изгибающие моменты в продольном направлении. Для кольцевых изгибающих моментов наибольшая величина в зоне лотка стала равной  $M_x = 24$  кНм/м, а для бокового сечения –  $M_x = 22,4$  кНм/м. В соответствии с уменьшением изгибающих моментов практически исчезли зоны, где расчетная площадь кольцевой арматуры превышала площадь арматуры, поставленной по проекту. Эти зоны занимают небольшие участки оболочки труб в местах сопряжения

цилиндрической части с раструбом только в лотке и шельге (рис. 7). В зонах боковых сечений расчетная площадь арматуры оказалась меньше, чем поставленная по проекту.

Как следует из полученных результатов, учет отпора грунта обратной засыпки при расчете подземных железобетонных трубопроводов более реалистично отражает их работу при эксплуатации, чем расчет трубопроводов в линейно-упругой постановке без учета этого фактора.

Третий этап исследований был посвящен рассмотрению результатов расчета трубопровода с учетом физической нелинейности железобетона и отпора грунта обратной засыпки. В результате расчетов было получено, что в местах максимальных значений кольцевых изгибающих моментов у раструбов труб в лотке и шельге имеются зоны разрушения – в лотковой части трубопровода эти зоны значительны (рис. 8а), в шельге зоны разрушения намного меньше (рис. 8б). В боковых зонах труб разрушенных областей нет.

Во всем трубопроводе в основном образуются продольные трещины с шириной раскрытия, не превышающей 0,1 мм, благодаря чему обеспечивается водонепроницаемость трубопровода, за исключением зон разрушения оболочки труб в лотке и шельге у раструбов (рис. 8). В зонах разрушения возникают как продольные,

так и кольцевые трещины (рис. 9), поэтому в данных зонах в период эксплуатации

возможна фильтрация воды сквозь оболочку трубопровода.

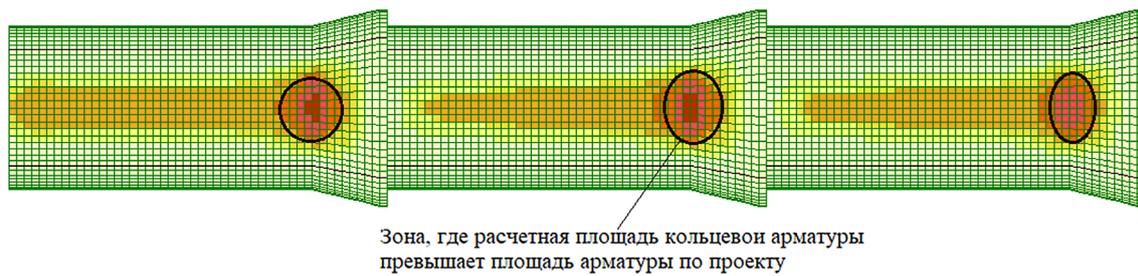


Рис. 7. Распределение расчетной площади арматуры в лотке и шельге трубопровода при учете отпора грунта обратной засышки  
Fig. 7. Distribution of the estimated area of armature in the tray and crown of the pipeline when taking into account the soil resistance of backfilling

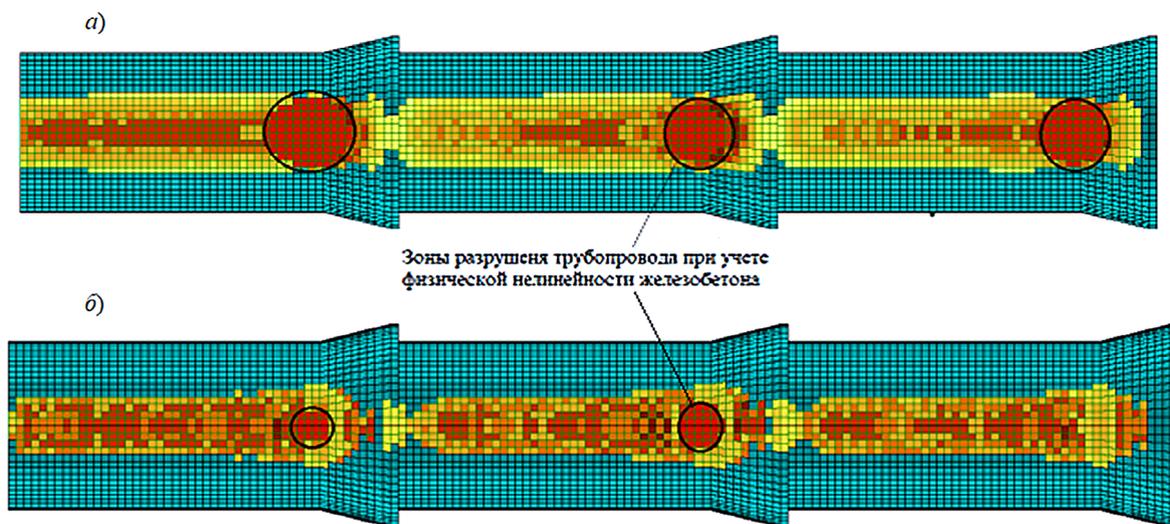


Рис. 8. Зоны разрушения в оболочке трубопровода: в лотке (а) и шельге (б)  
Fig. 8. Destruction zones in the pipeline shell: in the tray (a) and crown (b)

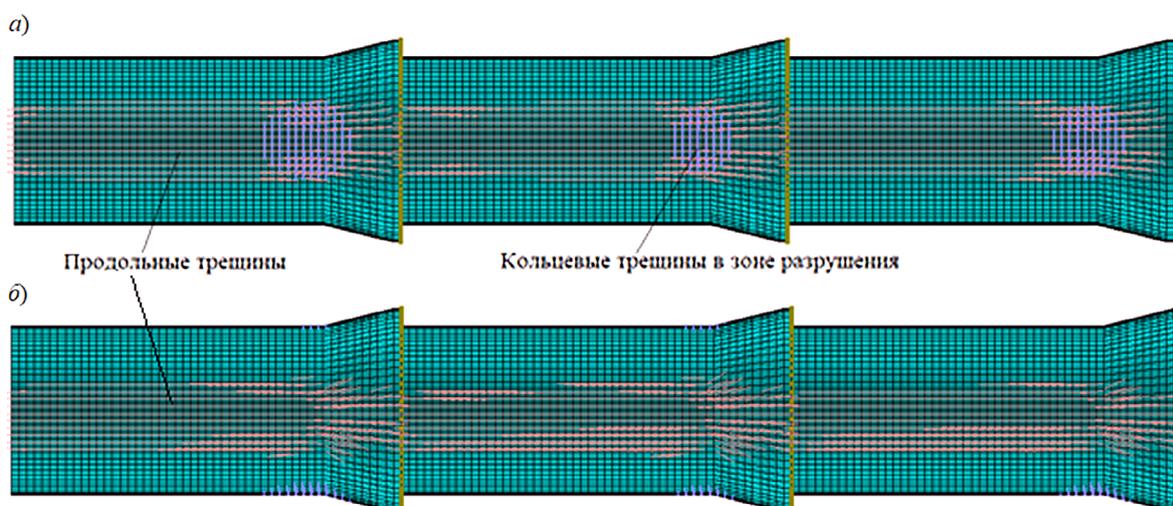


Рис. 9. Трещины в оболочке трубопровода:  
а – в лотке на внутренней поверхности трубопровода;  
б – в боковых зонах на наружной поверхности трубопровода

Fig. 9. Cracks in the pipeline shell:

a – in the tray on the inside of the pipeline; b – in the lateral zones on the outer surface of the pipeline

### Выводы

1. Как показали расчеты, самыми опасными зонами в сборных подземных трубопроводах являются зоны, близко расположенные к раструбам. Наибольшие изгибающие моменты возникают в кольцевом направлении, и они соответствуют лотку трубопровода. В продольном направлении изгибающие моменты гораздо меньше, но также возникает их концентрация у раструбов.

2. Из полученных результатов следует, что учет отпора грунта обратной

засыпки при расчете подземных железобетонных трубопроводов более реально отражает их работу при эксплуатации, чем расчет трубопроводов без учета этого фактора.

3. Учет физической нелинейности железобетона позволяет уже на стадии проектирования выявить зоны возможного разрушения трубопроводов в период эксплуатации, за счет наличия которых возможны потери воды при ее фильтрации через оболочку трубопровода.

### Библиографический список

1. **Берген Р.И.** Проектирование лотковых и трубчатых конструкций мелиоративных сооружений: учебник. – М.: Колос, 1995. – 206 с.

2. СП 13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84, с изм. № 1. – М.: ОАО «ЦНИИС», 2017. – 344 с.

3. **Тевелев Ю.А., Дмитриев А.Н.** Железобетонные конструкции в водохозяйственном строительстве. Проектирование и изготовление. – Ч. 2. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2006. – 260 с.

4. **Ксенофонтова Т.К.** Моделирование натуральных испытаний железобетонных раструбных труб водохозяйственного назначения на внешнюю нагрузку // Природообустройство. – 2020. – № 2 – С. 49-55.

5. **Абдразаков Ф.К., Логашов Д.В., Рукавишников А.А.** Реконструкция всасывающего трубопровода с изменением раструба электрифицированных насосных станций Приволжской оросительной системы // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 12 – С. 81-84.

6. **Ксенофонтова Т.К.** Расчет подземных железобетонных трубопроводов для воды с учетом их пространственной работы // Современные проблемы развития мелиорации и пути их решения: Мат-лы Международной научно-практической конф. Костяковские чтения. Т. II. – М.: ВНИИГиМ, 2020. – С. 304-307.

7. ГОСТ 6482-2011. Трубы железобетонные безнапорные. Технические условия, с попр., изм. № 1). – М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с.

8. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Введен 20 июня 2019 г. – М.: 2019. – 144 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/554403082>.

### References

1. **Bergen R.I.** Proektirovanie lotkovykh i trubchatykh konstruksij meliorativnykh sooruzhenij: uchebnik. – М.: «Kolos», 1995. – 206 s.

2. SP 13330.2011. Mosty i truby. Aktualizirovannay redaktsiya SNiP 2.05.03-84, s izmenenie 1. – М.: ОАО "TSNIIS", 2017. – 344 s.

3. **Tevelev Yu.A., Dmitriev A.N.** Zhelezobetonnye konstruksij v vodohozyajstvennom stroitelstve. Proektirovanie i izgotovlenie. Ch. 2. – М.: FGNU "Rosinformagroteh", 2006. – 260 s.

4. **Ksenofontova T.K.** Modelirovanie naturalnykh ispytaniy zhelezobetonnykh rastrubnykh trub vodohozyajstvennogo naznacheniya na vneshnyuyu nagruzku // Prirodoobustrojstvo. – 2020. – № 2 – S. 49-55.

5. **Abdrakov F.K., Logashov D.V., Ru-kavishnikov A.A.** Rekonstruktsiya vsasyvayushchego truboprovoda s izmeneniem rastrub-a elektrofitsirovannykh nasosnykh stantsij Privolzhskoj orositelnoj sistemy // Agrarny nauchny zhurnal. – 2020. – № 12 – S. 81-84.

6. **Ksenofontova T.K.** Raschet podzemnykh zhelezobetonnykh truboprovodov dlya vody s uchetom ih prostranstvennoj raboty / Sb.: Sovremennye problemy razvitiya meliortsii i puti ih resheniya (Kostyakovskie chteniya). Mat-ly mezhdun. nauchno-prakticheskoy konf. – М.: 2020. – t. II. – S. 304-307.

7. GOST 6482-2011. Truby helezobetonnye beznapornye. Tehnicheskie usloviya (s Popravkoj, Izmeneniem № 1). – М.: Standartinform, 2013. – 20 s.

8. SP 63.13330.2018. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksij. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP52-01-2003.Vveden20.06.2019.–М.:2019.–144 c. <http://docs.cntd.ru/document/554403082>

9. **Ksenofontova T.K., Tsuj Yui.** Vybor optimalnogo ugla ohvata podzemnoj zhelezobetonnoj trubuy pri ee opore na fundament // Prirodoobustrojstvo. – 2013. – № 1 –S. 47-50.

9. **Ксенофонтова Т.К., Цуй Юй.** Выбор оптимального угла охвата подземной железобетонной трубы при ее опоре на фундамент // Природообустройство. – 2013. – № 1 – С. 47-50.

10. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*. Введен 20 мая 2011 г. – М.: 2011. – 162 с.

11. **Ксенофонтов К.А., Ксенофонтова Т.К.** Определение коэффициентов реактивного сопротивления грунта для подземных труб по опытным данным // Расчет конструкций мелиоративных сооружений. – М.: 1990. – С. 77-84.

12. **Городецкий А.С., Барабаш М.С., Сидоров В.Н.** Компьютерное моделирование в задачах строительной механики: учебное пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 338 с.

10. SP 22.13330.2011. Osnovaniya zdaniy i sooruzhenij. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01-83\*. Vveden 20.05.2011. – M.: 2011. – 162 s.

11. **Ksenofontova K.A., Ksenofontova T.K.** Opredelenie koeffitsientov reaktivnogo soprotivleniya grunta dlya podzemnyh trub po opytным dannym // Sb.: Raschet konstruksij meliorativnyh sooruzhenij. – M.: 1990. – S. 77-84.

12. **Gorodetskij A.S., Barabash M.S., Sidorov V.N.** Kompyuternoe modelirovanie v zadachah stroitelnoj mehaniki: uchebnoe posobie. – M.: Izd-vo ASV, 2016. – 338 s.

#### Критерии авторства

Ксенофонтова Т.К. выполнила теоретические исследования, на основании которых провела обобщение и написала рукопись, имеет на статью авторское право и несёт ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию: 04.02.2021 г.

Одобрена после рецензирования

Принята к публикации

#### Criteria of authorship

Ksenofontova T.K. carried out theoretical studies, on the basis of which she generalized and wrote the article. Ksenofontova T.K. has a copyright on the article and is responsible for plagiarism.

The article was submitted to the editorial office: 04.02.2021

Approved after reviewing

Accepted for publication

Оригинальная статья

УДК 502/504:627.83:532.533.5

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-37-53

## УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА РОССИЙСКОМ АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ

**СОЛОМАТИН СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ** <sup>✉</sup>, инженер, аспирант  
solomatin.s.v@gmail.com

**КОЗЛОВ ДМИТРИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**, д-р техн. наук, профессор  
kozlovdv@mail.ru

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия

*Реализация экономических проектов в Арктической зоне требует рационального и эколого-сбалансированного подхода в рамках модели устойчивого природопользования. С целью минимизации негативных последствий для окружающей среды принято рассматривать варианты и сравнивать альтернативные конструктивные решения, определяющие впоследствии показатели воздействия и пути управления экологическими аспектами хозяйственной деятельности. На основании результатов натурных исследований, проведенных в заливе Шаранов Шар в Карском море, выявлены характерные особенности ледовой обстановки, учет которых не предусмотрен действующими нормативными документами, но необходим для разработки проектной*