

УДК 624.154.1: 624.131.22

**А.С. Желтышева, Б.С. Юшков**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **К ВОПРОСУ УСТОЙЧИВОСТИ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ**

Водопропускная труба является важным элементом автомобильной дороги, поэтому решение проблем, связанных с устойчивостью и работоспособностью данной конструкции, актуально. Работоспособность водопропускной трубы в составе автомобильной дороги зависит от условий возникновения нагрузок и наличия дефектов в оболочке трубы при ее эксплуатации.

Однако в научной литературе недостаточно освещен вопрос, связанный с обеспечением устойчивости и бесперебойной работы инженерного сооружения, подтверждающих эффективность использования водопропускных труб, не требующих применения дорогостоящих мероприятий при ее устройстве.

Рассмотрены основные проблемы, связанные с обеспечением общей устойчивости водопропускных труб, такие как воздействия от сил морозного пучения, влияния засыпки грунта и прочих дефектов в районах страны с продолжительным зимним периодом и значительной глубиной промерзания. Определено влияние грунта и глубины промерзания на изгибающие моменты, поперечные и нормальные силы, возникающие в конструкции водопропускной трубы. Отражено значение упругого прогиба грунта. Представлено некоторое решение применительно к расчету водопропускной трубы на автомобильной дороге. Выделяются и описываются характерные особенности возникновения усилий и дополнительных изгибных напряжений в теле водопропускной трубы. Изложены результаты экспериментальных исследований относительно изгибной жесткости целой водопропускной трубы и трубы в зоне стыка. Установлен коэффициент относительной изгибной жесткости водопропускной трубы в зоне стыка по отношению к целой водопропускной трубе с учетом влияния расстояния между опорами и величины стыкового зазора. Приведены результаты экспериментов и выполнен их анализ.

**Ключевые слова:** водопропускная труба, морозное пучение, грунт, критическое давление, изгибающий момент, текучесть материала, предел текучести.

**A.S. Zheltysheva, B.S. Iushkov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **TO THE QUESTION OF STABILITY OF WATER THROUGHPUT PIPES ON HIGHWAYS**

The water throughput pipe is an important element of the highway therefore, the solution of the problems connected with stability and a rabetosposposobnost of this design is actual. Operability of a water throughput pipe as a part of the highway depends on conditions of emergence of loadings and existence of defects in a pipe cover at its operation.

However in scientific literature the question connected with ensuring stability and the trouble-free operation of an engineering construction confirming efficiency of use of the water throughput pipes which aren't demanding application of expensive actions at its device is taken not rather up.

The main problems influencing the general stability of water throughput pipes such as influences from forces of a frosty pucheniye, influence of a zasypka of soil and other defects in regions of the country with the long winter period and considerable depth of frost penetration are considered. Influ-

ence of soil and depth of frost penetration on the bending moments, cross and normal forces arising in a design of a water throughput pipe is defined. Value of an elastic deflection of soil is reflected. Some decision in relation to calculation of a water throughput pipe on the highway is submitted. Characteristics of emergence of efforts and additional flexural tension in a body of a water throughput pipe are allocated and described. Results of pilot studies of rather flexural rigidity of the whole water throughput pipe and pipe in a joint zone are stated. The coefficient of relative flexural rigidity of a water throughput pipe in a joint zone in relation to the whole water throughput pipe taking into account influence of distance between support and size of a butt gap is established. Results of experiments are given and their analysis is made.

**Keywords:** a water throughput pipe, a frosty pucheniye, the soil, critical pressure bending the moment, material fluidity, a fluidity limit.

При расчете водопропускных труб на автомобильных дорогах Уральского региона специалисты сталкиваются в первую очередь с такими проблемами, как определение силовых воздействий от сил морозного пучения глинистого грунта [1], влияния засыпки грунта и различных нагрузок на общую устойчивость сооружения.

Рассмотрим некоторые решения применительно к расчету водопропускной трубы на автомобильной дороге Пермь – Кунгур.

Возьмем упругое кольцо под действием равномерного внешнего давления. При недостаточной жесткости изгиба потеря устойчивости кольца может произойти при напряжениях, существенно меньших предела текучести материала. Давление, при котором круговая форма становится неустойчивой и происходит сплющивание, принято называть критическим –  $P_{кр}$  [2].

Для кольца, нагруженного давлением, следящим за нормалью к поверхности, в общем случае имеем [3, 4]:

$$P_{кр} = (n^2 - 1)EI / R^3, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус кольца;  $EI$  – жесткость стенки;  $n$  – число полуволн.

В условиях, когда давление  $P$  следит за центром кольца, имеется следующее решение [3]:

$$P_{кр} = (n^2 - 1)^2 EI / (n^2 - 2)R^3. \quad (2)$$

При укладке труб в грунтовой среде, как показывают опыты, число полуволн не превышает двух. Поэтому формулы (1) и (2) могут быть записаны соответственно [3]:

$$P_{кр} = 3EI / R^3, \quad (3)$$

$$P_{кр} = 9EI / R^3. \quad (4)$$

Из сравнения (3) и (4) видно, что во втором случае критическое давление (нагрузка) в 1,5 раза выше, чем при гидростатическом нагружении.

Устойчивость труб под действием равномерного внешнего давления в значительной степени зависит от различных дефектов в стенке [5, 6]. Кроме того, гибкие трубы ( $D/\delta \geq 100$ ) даже под действием только собственного веса имеют начальную эллиптичность [7].

Если к такой некруглой трубе приложить внешнее давление, то произойдет ее дальнейшее сплющивание. Расчетная схема представлена на рисунке.

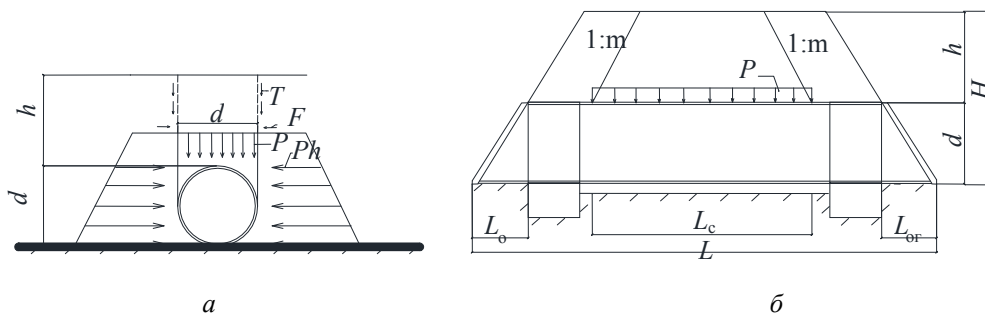


Рис. Расчетная схема: *a* – давление собственного веса грунта; *б* – давление временной подвижной нагрузки

Наибольший изгибающий момент из-за отклонения от круговой формы [8]

$$M_{\max} = PK \left( U_0 + \frac{U_0 P}{P_{\text{кр}}} - P \right) = \frac{PU_0 R}{1} - P/P_{\text{кр}}. \quad (5)$$

Наибольшее сжимающее напряжение получается путем добавления наибольшего сжимающего напряжения от  $M_{\max}$  к напряжению, возникающему от сжимающего усилия  $PR$ . Тогда [8]

$$\sigma_{\max} = PK/\delta + 6PRU_0/\delta^2 1/1 - P/P_{\text{кр}}. \quad (6)$$

Предельное значение давления  $P$  есть то значение, при котором начинается текучесть материала и предел текучести  $\sigma = \sigma_{\max}$ . Приняв во внимание вышеизложенные соображения, формулу (6) запишем [8] в виде

$$\sigma_T = P_T R / \delta + \sigma P_T R U_0 / \delta^2 1 / 1 - P / P_{кр}. \quad (7)$$

Из (7) можно определить предельное давление  $P_T$ , если известны  $\sigma_T$  и начальное отклонение  $U_0$ . Введя обозначения  $R/\delta = m$ ,  $n = U_0/R$ , формулу (7) приводим к виду [8]

$$P_T^2 - \left[ \frac{\sigma_T}{m} + (1 + 6mn)P_{кр} \right] P_T + \sigma_T P_{кр} / m = 0. \quad (8)$$

При проектировании водопропускных труб необходимо обязательно учитывать начальное отклонение от круговой формы, которое, с одной стороны, приводит к снижению несущей способности (устойчивости) сооружения, а с другой – с учетом упругого отпора грунта засыпки, к повышению жесткости и устойчивости трубопровода. Многочисленные опыты показывают, что грунт является не только нагрузкой, но и средой, существенно повышающей устойчивость сооружения, особенно при  $D/\delta \geq 100$  [9].

Рассматривая стальную трубу единичной длины ( $b = 1$  см), имеем  $U_0 = 150$  мм; модуль упругости стали  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $\sigma_T = 210$  МПа;  $m = 90$ ;  $n = 0,165$ ; находим по (1) критическое давление  $P_{кр} = 7,2$  кПа, т.е. при таком внешнем равномерном давлении круговая форма неустойчива. Напряжение от сжимающего усилия равно 0,45 МПа; наибольшее напряжение от изгибающего момента (вследствие искривления начальной формы) – 103,7 МПа.

Известно, что эксплуатационная надежность функционирования линейной части во многом зависит от устойчивости протяженного тела трубы [10, 11]. Наиболее напряженным элементом водопропускной трубы является зона стыка кольцевой части трубы, соединяющего два звена. Это объясняется тем, что на стыке в теле трубы возникают краевые силы и моменты, которые вызывают дополнительные изгибные напряжения [12].

При прокладке трубопроводов на пучинистых грунтах возможно перемещение фундамента (основания) под действием сил пучения [13, 14]. В статически определимых (однопролетных) системах вертикальные перемещения фундамента (основания) не вызывают дополнительных напряжений. В многопролетных системах при перемещении одной из частей конструкции возникают дополнительные изгибные напряжения [15, 16].

Таким образом, целью экспериментальных исследований явилось получение объективной информации об изгибной жесткости трубы в зоне стыков и установление эмпирических зависимостей с учетом их технических характеристик и состояний.

Была проведена серия испытаний. В первой серии испытывалась водопропускная труба длиной 1 м под статической нагрузкой, нагрузка менялась от 0 до 200 кН, добавлением по 25 кН, также менялось расстояние между опорами (0,45; 0,5; 0,55 м).

Во второй серии испытывался стык водопропускной трубы, при этом менялось расстояние между опорами (0,45; 0,5; 0,55 м) и каждое нагружение осуществлялось не менее 3 раз.

В результате эксперимента были получены значения изгибной жесткости водопропускной трубы при вертикальной нагрузке и зависимость этого параметра от расстояния между опорами. Данные эксперимента были обработаны общепринятыми статистическими методами и искомая зависимость была определена в виде

$$D_z = 5,20 \cdot 10^{-6} \cdot l^{1,2117}. \quad (9)$$

На основании обработки приведенных выше результатов экспериментальных работ была получена эмпирическая зависимость изгибной жесткости водопропускной трубы в зоне стыка от расстояния между опорами:

$$D_{\text{зст}}(l, \Delta) = (6,47 \cdot 10^{-6} \cdot l^{1,3416}), \quad (10)$$

$$1,523 (1 + 40,403 \cdot \Delta), \quad (11)$$

где  $l$  – расстояние между опорами, м;  $\Delta$  – величина стыкового зазора, м.

Коэффициент относительной жесткости водопропускной трубы в зоне стыка и вне зоны стыка можно определить по выражению

$$k = D_{\text{зст}} / D_z. \quad (12)$$

Тогда искомая эмпирическая зависимость коэффициента относительной изгибной жесткости будет иметь вид

$$k = 1,244 \cdot l^{0,1299} \cdot 1,523 \cdot (1 + 40,403 \Delta); \quad (13)$$

здесь все обозначения прежние.

Данные расчеты могут быть применены при устройстве водопропускных труб из других материалов (бетонные, железобетонные, гофрированные и т.д.). В этом случае изгибная жесткость водопропускной трубы будет зависеть не только от расстояния между опорами, но и от прочностных характеристик материала.

Таким образом, на основании проведенных экспериментальных работ и их последовательной обработки удалось установить коэффициент относительной изгибной жесткости водопропускной трубы в зоне стыка по отношению к целой водопропускной трубе с учетом влияния расстояния между опорами.

Сравнив суммарные напряжения в стенке трубы с пределом текучести стали, заключаем, что прочность (устойчивость) трубы обеспечена. Надежная работа водопропускной трубы в течение более 3 лет подтверждает правильность экспертного заключения авторов об обеспеченности устойчивости сооружения без использования дорогостоящих мероприятий.

### Список литературы

1. Абжамилев Р.Ш. Лабораторные исследования морозного пучения // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1995. – № 5. – С. 20–22.
2. Березанцев В.Г. Расчет основания сооружений. – Л.: Стройиздат, 1970. – 207 с.
3. Клейн Г.К. Расчет подземных трубопроводов. – М.: 1966. – 240 с.
4. Оспанов С.О. Энергетическое строительство. – М.; Л., 1966. – 73 с.
5. Маслов Н.Н. Физико-техническая теория ползучести глинистых грунтов в практике строительства. – М.: Энергия, 1968. – 176 с.
6. Юшков Б.С., Репецкий Д.С., Добрынин А.О. Рекомендации по применению двуконусных свай на пучинистых грунтах транспортных сооружений. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 37 с.
7. Бартоломей А.А., Кузнецов Г.Б. Прикладная теория ползучести и длительности прочности грунтов / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1996. – 108 с.
8. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. – М., 1971. – 708 с.

9. Юшков Б.С. Экспериментально-теоретические основы расчета фундаментов из двуконусных свай, устраиваемых в сезоннопромерзающих грунтах. – Пермь: «ОТ и ДО», 2014. – 310 с.

10. Бугров А.К. К вопросу учета пластических деформаций оснований при проектировании фундаментов // Труды ЛПИ. – Л.: 1978. – № 361. – С. 24–27.

11. Далматов Б.И. Воздействие морозного пучения грунтов на фундамент сооружений. – Л.: Госстройиздат, 1957. – 60 с.

12. Яковлев Ю.М., Горячев М.Г. Строительство водопропускных труб на автомобильных дорогах. – М., 2011. – 126 с.

13. Юшков Б.С., Ротт И.В. Влияние морозного пучения на подпорные стенки и разработка метода борьбы с пучинистостью // Сб. науч. тр. XII науч.-техн. конф. молодых ученых. – Пермь, 1986. – С. 198–205.

14. Юшков Б.С., Дуракова Л.В., Ширинкин И.В. Определение несущей способности свай во времени // Современные проблемы свайного фундамента в СССР: материалы всесоюз. сов.-семинара. – Пермь, 1988. – С. 84–89.

15. Беккер А.Т. Исследование устойчивости сооружений в горизонтальном направлении на действие сил морозного пучения грунтов: дис. ... канд. техн. наук. – Владивосток, 1975. – 198 с.

16. Энциклопедия современной техники. – М.: Советская энциклопедия, 1964. – 528 с.

### References

1. Abzhamilov R.Sh. Laboratornye issledovaniia moroznogo pucheniia [Laboratory study of frost heaving]. *Osnovaniia, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1995, no. 5, pp. 20-22.

2. Berezantsev V.G. Raschet osnovaniia sooruzhenii [Calculation of Foundation structures]. Leningrad: Stroiizdat, 1975. 207 p.

3. Klein G.K. Raschet podzemnykh truboprovodov [Calculation of underground pipelines]. Moscow, 1966. 240 p.

4. Ospanov S.O. Energeticheskoe stroitel'stvo [Energy building]. Moscow; Leningrad, 1966. 73 p.

5. Maslov N.N. Fiziko-tekhnicheskaiia teoriia polzuchesti glinistykh gruntov v praktike stroitel'stva [Physico-technical theory of creep of clay soils in construction]. Moscow: Energiia, 1968. 176 p.

6. Iushkov B.S., Repetskii D.S., Dobrynin A.O. Rekomendatsii po primeneniuiu dvukonusnykh svai na puchinistykh gruntakh transportnykh

sooruzhenii [Recommendations for use dvuhkonusnyh piles on heaving soils and transport facilities]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii universitet, 2013. 37 p.

7. Bartolomei A.A., Kuznetsov G.B. Prikladnaia teoriia polzuchesti i dlitel'nosti prochnosti gruntov [Applied theory of creep and duration of strength of soils]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2014. 108 p.

8. Timoshenko S.P. Ustoichivost' sterzhnei, plastin i obolochek [Stability of rods, plates and shells]. Moscow, 1971. 708 p.

9. Iushkov B.S. Eksperimental'no-teoreticheskie osnovy rascheta fundamentov iz dvukonusnykh svai, ustraivaemykh v sezonopromerzaiushchikh gruntakh [Experimental and theoretical foundations of computing foundations of dvuhkonusnyh piles, arranged in casinopokernews soils]. Perm': "OT i DO", 1988. 310 p.

10. Bugrov A.K. K voprosu ucheta plasticheskikh deformatsii osnovanii pri proektirovanii fundamentov [To the question of taking into account the plastic deformations of the bases when designing foundations]. *Trudy LPI*, 1978, no. 361. pp. 24-27.

11. Dalmatov B.I. Vozdeistvie moroznogo pucheniia gruntov na fundament sooruzhenii [Impact of frost heaving of soils for foundations of structures]. Leningrad: Gosstroizdat, 1957. 60 p.

12. Iakovlev Iu.M., Goriachev M.G. Stroitel'stvo vodopropusknykh trub na avtomobil'nykh dorogakh [Construction of culverts on the roads]. Moscow, 2011. 126 p.

13. Iushkov B.S., Rott I.V. Vliianie moroznogo pucheniia na podpornye stenki i razrabotka metoda bor'by s puchinistost'iu [The effect of frost heaving on a retaining wall and developing a method of combating heaving]. *Sbornik nauchnykh trudov XII NTK molodykh uchenykh*. Perm', 1995, no. 5, pp. 198-205.

14. Iushkov B.S., Durakova L.V., Shirinkin I.V. Opredelenie nesushchei sposobnosti svai vo vremeni [Determination of bearing capacity of piles with time]. *Materialy vsesoiuznogo soveshchaniia-seminara "Sovremennye problemy svainogo fundamenta v SSSR"*. Perm', 1986, pp. 84-89.

15. Bekker A.T. Issledovanie ustoichivosti sooruzhenii v gorizontальnom napravlenii na deistvie sil moroznogo pucheniia gruntov [Investigation of the stability of structures in the horizontal direction on the effect of frost heave of soils]. Thesis of the Ph. D's degree dissertation, Vladivostok, 1975. 198 p.



16. Entsiklopediia sovremennoi tekhniki [Encyclopedia of modern technology]. Moscow: Sovetskaia entsiklopediia, 1964. 528 p.

Получено 1.10.2015

### **Об авторах**

**Желтышева Анастасия Сергеевна** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Автомобильные дороги и мосты» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: anastasya.zheltisheva@yandex.ru).

**Юшков Борис Семенович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобильные дороги мосты» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: adf@pstu.ru).

### **About the authors**

**Anastasia S. Zheltysheva** (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Automobiles and Technological Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: anastasya.zheltisheva@yandex.ru).

**Boris S. Iushkov** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, Head of Department of Automobiles and Technological Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: adf@pstu.ru).