

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2021, №4, Том 8 / 2021, N 4, Vol. 8 <https://t-s.today/issue-4-2021.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS421.pdf>

DOI: 10.15862/06SATS421 (<https://doi.org/10.15862/06SATS421>)

Исследование напряженно-деформированного состояния стальной трубы в теле насыпи с учетом ползучести грунта основания

Марасанов А.И., Шейкин А.А.

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Марасанов Александр Игоревич, e-mail: marasanovai@yandex.ru

Аннотация. Строительство новых железнодорожных линий в районах Крайнего Севера ставит перед учеными ряд задач, таких как исследование поведения во времени различных конструкций, входящих в инфраструктуру железных дорог, например мостов и водопропускных труб. Это связано с тем, что мерзлый грунт основания обладает вязкоупругими свойствами, что чревато развитием больших напряжений и деформаций в указанных конструкциях с течением времени.

В статье приводятся результаты исследования поведения стальных водопропускных труб, находящихся в теле насыпи, с учетом ползучести грунта основания. Грунт основания считается мерзлым. Рассмотрены водопропускные трубы разных диаметров на основе данных по железнодорожной линии Обская-Бованенково (полуостров Ямал).

Задача решалась на основе метода конечных элементов (МКЭ) на основе программного комплекса MSC Nastran.

Проведена оценка изменения напряженно-деформированного состояния указанных конструкций во времени на временном отрезке [0, 1000 суток] при действии постоянных нормативных нагрузок. Исследовано влияние ряда параметров, а именно диаметра трубы и температуры мерзлого грунта, на поведение стальных труб во времени. Показано, что даже незначительное повышение температуры мерзлого грунта (на один градус Цельсия) приводит заметному росту напряжений и деформаций в стальной трубе, обусловленному ползучестью грунта основания. Уменьшение диаметра трубы (с 3,4 м до 2,6 м) также приводит к росту напряжений и деформаций в теле трубы с течением времени, но в существенно меньшей степени по сравнению с повышением температуры грунта основания.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние стальной трубы; мерзлый грунт; температура мерзлого грунта; ползучесть мерзлого грунта; поведение стальной трубы во времени; метод конечных элементов

Study of the steel pipe stress-strain state in the embankment body, with the account of the base soil creep

Alexander I. Marasanov, Alexander A. Sheikin

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Corresponding author: Alexander I. Marasanov, e-mail: marasanovai@yandex.ru

Abstract. The construction of new railway lines in the Far North regions poses a number of challenges for scientists, such as overtime behavior study of the various structures included in the railway infrastructure like bridges and culverts. This is because the frozen base soil has viscoelastic properties, which are fraught with the high stresses and deformations development in these structures over time.

The article presents the study results of the steel culverts' behavior located in the embankment body, with the account of the base soil creep. The base soil is considered frozen. Culverts of different diameters are considered based on data from the Obskaya-Bovanenkovo railway line (Yamal Peninsula).

The problem was solved on the basis of the finite element method (FEM) based on the MSC Nastran software package.

An assessment was made of the change in the stress-strain state of these structures in time on the time segment [0, 1000 days] under the characteristic dead load. The influence of a number of parameters, namely the pipe diameter and the frozen soil temperature, on the steel pipe behavior over time has been studied. It is shown that even a slight increase in the frozen soil temperature (by one degree Celsius) leads to a noticeable increase in stresses and strains in the steel pipe, due to the base soil creep. Reducing the pipe diameter (from 3.4 m to 2.6 m) also leads to an increase in stresses and deformations in the pipe body over time, but to a much lesser extent compared to an increase in the base soil temperature.

Keywords: stress-strain state of a steel pipe; frozen soil; frozen soil temperature; frozen soil creep; behavior of a steel pipe in time; finite element method

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

В связи со строительством новых железнодорожных линий в районах Крайнего Севера возникает необходимость исследования поведения во времени различных конструкций, входящих в инфраструктуру железных дорог, например мостов и водопропускных труб. Это связано с тем, что мерзлый грунт основания обладает вязкоупругими свойствами, что чревато развитием больших напряжений и деформаций в указанных конструкциях с течением времени. Отметим, что проблеме ползучести мерзлых грунтов в последние десятилетия уделяется большое внимание. Так исследованию вязкоупругих свойств мерзлых грунтов различных типов посвящены работы [1–11]. В работе [1] анализируются результаты проведенных испытаний на ползучесть замороженных цилиндрических образцов глины при различных уровнях осевого сжимающего напряжения. В статье [2] также рассматриваются испытания на ползучесть образцов замороженной глины в температурном диапазоне $-12^{\circ}\text{C} \dots -18^{\circ}\text{C}$. Определен уровень сжимающих напряжений, разделяющий затухающую ползучесть от незатухающей. Для замороженной глины он составил $2/3$ от предела прочности при осевом сжатии. В работе [3] на основе макроаналитического взгляда на ползучесть мерзлых грунтов развивается теория ползучести мерзлых грунтов, ориентированная прежде всего на оценку несущей способности подземных элементов конструкций, а именно фундаментов и анкеров. В статье [4] рассматриваются вопросы прочности и ползучести мерзлых грунтов. В работе [5] представлены результаты экспериментов по трехосной ползучести искусственного мерзлого грунта, находящегося в глубоком аллювии. На основе их анализа предложена модель, описывающая характеристики ползучести мерзлого грунта при сложном напряженном состоянии. В работе [6] представлены результаты испытаний на ползучесть полых цилиндрических образцов мерзлой глины при температуре $T = -6^{\circ}\text{C}$ при сложных видах напряженного состояния. Экспериментальные результаты показали, что характеристики ползучести мерзлой глины в значительной степени зависят от промежуточного главного напряжения. Также отмечено, что обобщенные кривые сдвиговой ползучести, полученные для мерзлой глины при действии осевой нагрузки и кручения, иллюстрируют типичную незатухающую ползучесть. На основе представленных опытных данных была введена обобщенная нелинейная теория прочности, позволяющая описать эволюцию огибающей напряжений во времени. Также был предложен критерий длительной прочности для мерзлой глины в пространстве трех главных напряжений с учетом фактора времени.

В работе [7] раскрываются вопросы теории ползучести и длительной прочности мерзлых грунтов и применения этой теории к расчету ледогрунтовых ограждений. Излагаются основные положения реологии мерзлых грунтов, современные методы определения их физико-механических свойств и способы расчета на прочность и ползучесть ледогрунтовых ограждений, применяемых в качестве временных конструкций при проходке различного рода выработок методом искусственного замораживания. Приводятся практические способы расчета толщины стенок ледогрунтовых ограждений шахтных стволов, колодцев и т. п.

В монографии [8] рассмотрены теоретические вопросы расчета консолидации грунтов с учетом фильтрационных свойств грунтов и свойств ползучести. Исследовано влияние фактора ползучести на напряженно-деформированное состояние грунтов.

В работе [9] изучается линейная зависимость между логарифмом скорости ползучести и логарифмом времени, которое проходит до достижения минимума скорости ползучести в грунте, льде и мёрзлом грунте. В статье [10] исследуются повреждения, накапливаемые в мёрзлом грунте в процессе ползучести и выводится соотношение для оценки степени повреждённости грунта в зависимости от различного содержания в нём льда. В работе [11] предлагается реологическая модель мёрзлого грунта, которая объединяет в себе модели Бингама, Максвелла и Кельвина.

Исследование напряженно-деформированного состояния мерзлых грунтов, а также различных конструкций, входящих во взаимодействие с указанными грунтами, проведено в работах [12–17]. В статье [12] представлен подход, базирующийся на методе конечных элементов, позволяющий рассматривать процессы замерзания и оттаивания в водонасыщенных грунтах. В рамках представленного подхода рассматриваются тепловые, гидро- и механические процессы в грунтах как по отдельности, так и в их различных взаимодействиях. При этом используется сочетание давления воды, давления льда, а также общего напряженного состояния в грунте. В работе [13] представлена методика расчета осадок фундаментов сооружений на основании из мёрзлого торфа на базе модели вязко-пластичного тела. Приведены результаты расчетов осадки фундамента в произвольный момент времени. В статье [14] представлена методика прогнозирования напряженно-деформированного состояния длиномерного участка трубопровода с учетом реологических процессов мерзлых грунтов. Дан прогноз по оценке прочности указанной конструкции. В работе [15] приведены результаты экспериментальных исследований, дающие возможность проанализировать процессы взаимодействия конструкции трубопровода с грунтом при продольных перемещениях.

Представленные опытные данные предлагается использовать при расчете трубопроводов, проложенных в песчаных грунтах. В статье [16] выполнена оценка напряженно-деформированного состояния мерзлого грунта, находящегося в окрестности подземного резервуара. Дана оценка устойчивости резервуара при повышении температуры мерзлого грунта, а также представлены рекомендации по оптимальной конфигурации подземных резервуаров, находящихся в мерзлом грунте.

В работе [17] проведено численное (на основе метода конечных элементов) и экспериментальное исследование процесса искусственного замораживания водонасыщенного песка.

В представленной работе рассмотрено решение задачи исследования поведения во времени стальной трубы, расположенной в теле насыпи, под которой находится мерзлый грунт, обладающий свойством ползучести. Задача решалась на основе метода конечных элементов (МКЭ) на основе программного комплекса MSC Nastran, лицензионная версия которого имеется в ИПСС РУТ (МИИТ).

Постановка задачи и результаты

Research objective and results

Для исследования изменения напряженно-деформированного состояния во времени водопропускных стальных труб при их взаимодействии с массивом грунта насыпи и основания с учетом ползучести грунта основания используем данные рабочей документации. Проведем расчет водопропускной трубы на км 271 железнодорожной линии Обская — Бованенково (водопропускная труба диаметром 2,6 м, $t = 18$ мм — толщина стенки, $L_{\text{расч}} = 49,81$ м — расчетная длина трубы, $h_0 = 9,32$ м — высота насыпи).

Будем считать, что насыпь состоит из влажного крупно-обломочного скального грунта с песком, имеющего следующие характеристики: $E = 20$ МПа — модуль деформации; $\mu = 0,25$ — коэффициент Пуассона; $\rho = 2,35$ т/м³ — плотность.

Грунт основания будем считать мерзлым. Весом грунта основания пренебрегаем. При имитировании работы основания используем модель сжимаемого слоя, ниже которого основание принимается несжимаемым. В соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [18], для достоверной оценки осадок толщину сжимаемого слоя следует принимать равной 12–15 метров.

Назначим толщину сжимаемого слоя 12 м. Ниже лотка трубы на глубину 2 метра принимаем грунт абсолютно упругим с модулем деформации $E = 50$ МПа и коэффициентом Пуассона $\mu = 0,3$ (I-й слой грунтового основания). Будем считать, что при отрицательных температурах слоя I основания его механические характеристики от температуры не зависят. Далее ниже I-ого слоя на глубину 10 метров распространяется слой II, состоящий из пылеватого мерзлого грунта, обладающего свойством ползучести.

Упругие характеристики грунта определим на основании соотношения, представленного в работе [19]:

$$E = \gamma + \beta \times |\theta|^n. \quad (1)$$

Как видим, соотношение (1) представляет собой степенную функцию. В работе [19] отмечается, что при температуре θ мерзлых грунтов не очень низкой (до -5 °С... -7 °С для глин и пылеватых грунтов, и до -10 °С и несколько ниже для песков) показатель степени n может быть принят равным единице ($n \approx 1$), т. е. в указанных пределах можно принимать модуль деформации линейно зависящим от отрицательной температуры. Тогда соотношение (1) принимает следующий вид:

$$E = \gamma + \beta \times |\theta|. \quad (2)$$

Параметры γ и β равны: $\gamma = 392,4$ МПа; $\beta = 1373,4$ МПа (при величине сжимающего напряжения $\approx 0,2$ МПа). Отметим, что при увеличении сжимающего напряжения параметр β убывает. θ — температура мерзлого грунта. Тогда при $\theta = -1$ °С $E = 1765,8$ МПа; при $\theta = -2$ °С $E = 3139,2$ МПа. Примем коэффициент Пуассона равным $\mu = 0,3$.

Для учета процессов ползучести, протекающих в мерзлых пылеватых глинистых грунтах, используем соотношение, связывающее осевую относительную деформацию ε и нормальное напряжение σ , приведенное в работе [7]:

$$\varepsilon(t) = [(\sigma \times t^\lambda) / \xi]^m, \quad (3)$$

где $\xi = \omega \times (|\theta| + 1)^k$. Здесь t — время; $\lambda = 0,1$; $m = 3,704$; $\omega = 9$; $k = 0,89$. Тогда при $\theta = -1$ °С имеем $\xi = 16,679$ (кг/см²) \times час^{0,1} = $1,1907$ МПа \times сутки^{0,1}; при $\theta = -2$ °С имеем $\xi = 23,927$ (кг/см²) \times час^{0,1} = $1,7082$ МПа \times сутки^{0,1}.

Расчет проведем на основе плоской модели для полосы шириной, равной диаметру трубы 2,6 м, включающей насыпь, водопропускную трубу и грунтовое основание.

Будем учитывать действие только постоянных нагрузок, а именно постоянное нормативное вертикальное давление на трубу, создаваемое весом насыпи и собственным весом трубы.

При учете нагрузки от собственного веса насыпи в рамках принятой модели исходим из того, что основное вертикальное давление создает часть насыпи, находящаяся выше верха трубы. Вертикальную нагрузку на трубу, создаваемую грунтом насыпи, находящимся в окрестности трубы, примем в виде погонной нормативной нагрузки, интенсивность которой равна:

$$q_n = \rho \times g \times A = 2,35 \times 9,81 \times 1,4507 = 33,44 \text{ кН/м}, \quad (4)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения, $A = (1 - \pi/4) \times d^2 = (1 - \pi/4) \times 2,6^2 = 1,4507 \text{ м}^2$ — площадь грунта насыпи в окрестности поперечного сечения трубы. Данную погонную нагрузку будем прикладывать на участке между точками пересечения продольной оси трубы с контурами конусов насыпи. Длина указанного участка равна 39,717 м.

Ширину расчетной области грунта основания примем равной расчетной длине трубы с добавлением участков протяженностью 15 м слева и справа от концов трубы. Отметим, что указанные области слева и справа от концов трубы можно ограничить длиной 10 м. Данное ограничение не вносит сколько-нибудь значимое изменение в напряженно-деформированное состояние в материале трубы. По боковым границам расчетной области грунта принимаются граничные условия, запрещающие перемещения грунта по горизонтали. На нижней границе расчетной области запрещаются перемещения по вертикали и горизонтали.

Модель метода конечных элементов, имитирующая взаимодействие трубы с грунтом насыпи и основания, представлена на рисунке 1. Она состоит из 6643 конечных элементов и 6726 узлов. В данной модели на участках грунта, выходящих за внешний контур насыпи, опирание трубы на грунтовое основание моделировалось с соблюдением возможности отлипания трубы (были поставлены соответствующие односторонние связи). Труба моделировалась стержневыми конечными элементами, расположенными на ее продольной оси, имеющими геометрические характеристики кольцевого поперечного сечения с внешним диаметром $d = 2,6 \text{ м}$ и толщиной стенки $t = 0,018 \text{ м}$. При этом был учтен продольный уклон трубы 1:100. Грунт насыпи моделировался 3-х и 4-х угольными плоскими конечными элементами толщиной 2,6 м. Слои грунта основания I и II моделировались с помощью 4-х угольных плоских конечных элементов толщиной 2,6 м.

Расчет на ползучесть при действии нормативных постоянных нагрузок был проведен для значений температуры грунта основания $\theta = -1$ °С и $\theta = -2$ °С.

На рисунке 2 приведен деформированный вид трубы, полученный для начального момента времени $t = 0$ при температуре $\theta = -1$ °С. На рисунке 3 показан деформированный вид трубы, полученный для момента времени $t = 180$ суток ($\theta = -1$ °С).

На рисунке 4 представлен деформированный вид участка трубы в районе ее выхода из тела насыпи. Как видно из рисунка 4, имеет место отлипание трубы от тела грунтового основания. Вместе с тем, указанное отлипание является незначительным. В начальный момент времени оно составляет 0,7 мм. К моменту времени $t = 45$ суток оно составляет 2,3 мм (максимальное значение) и затем убывает во времени (рис. 5).

В таблице 1 приведены значения наибольших нормальных и касательных напряжений, возникающих в теле трубы в различные моменты времени после загрузки при температуре грунта основания $\theta = -1$ °С. Там же представлены значения прогибов в середине трубы и величин перемещений, характеризующих степень отлипания конца трубы от грунтового основания. В нижней строке таблицы показано, во сколько раз увеличились напряжения и прогиб в середине трубы за 1000 дней по сравнению с начальным моментом времени.

Из таблицы 1 следует, что через 1000 дней напряжения увеличиваются в 3,5...4,3 раза по сравнению с соответствующими значениями в начальный момент времени, а прогиб сечения в середине трубы — в 4,1 раза.

Далее рассмотрим результаты расчета на ползучесть, полученные при температуре грунта основания $\theta = -2$ °С.

В таблице 2 представлены значения характеристик напряженно-деформированного состояния трубы и величин перемещений, характеризующих степень отлипания конца трубы от грунтового основания, для различных моментов времени после загрузки при температуре грунта основания $\theta = -2$ °С.

В последней строке таблицы показано, во сколько раз увеличились расчетные характеристики за 1000 дней по сравнению с начальным моментом времени.

Из таблицы 2 следует, что через 1000 дней напряжения увеличиваются в 2,0...2,4 раза по сравнению с соответствующими значениями в начальный момент времени, а прогиб сечения в середине трубы — в 2 раза.

Таблица 1 / Table 1

Значения напряжений и перемещений для водопропускной трубы при температуре грунта основания $\theta = -1$ °C в различные моменты времени после загрузки

Stresses and displacements values for a culvert at a base soil temperature $\theta = -1$ °C at various times after loading

Время, сутки Time, days	Наибольшее растягивающее нормальное напряжение в теле трубы, МПа Maximum normal tensile stress in the pipe body, MPa	Наибольшее сжимающее нормальное напряжение в теле трубы, МПа Maximum compressive normal stress in the pipe body, MPa	Наибольшее касательное напряжение в теле трубы, МПа Maximum shearing stress in the pipe body, MPa	Прогиб сечения в середине трубы, см Section deflection in the middle of the pipe, cm	Величина отрыва левого конца трубы от тела грунтового основания, см The separation amount of the pipe's left end from the subgrade body, cm
0	28,72	-24,44	3,06	1,78	0,07
100	71,00	-72,64	7,92	4,51	0,22
250	82,17	-84,37	8,98	5,25	0,20
500	91,79	-94,20	9,77	6,21	0,15
750	98,59	-101,11	10,35	6,79	0,11
1000	103,16	-105,51	10,68	7,21	0,08
	3,6	4,3	3,5	4,1	

Составлено авторами / Made by the authors

Таблица 2 / Table 2

Значения напряжений и перемещений для водопропускной трубы при температуре грунта основания $\theta = -2$ °C в различные моменты времени после загрузки

Stresses and displacements values for a culvert at a base soil temperature $\theta = -2$ °C at various times after loading

Время, сутки Time, days	Наибольшее растягивающее нормальное напряжение в теле трубы, МПа Maximum normal tensile stress in the pipe body, MPa	Наибольшее сжимающее нормальное напряжение в теле трубы, МПа Maximum compressive normal stress in the pipe body, MPa	Наибольшее касательное напряжение в теле трубы, МПа Maximum shearing stress in the pipe body, MPa	Прогиб сечения в середине трубы, см Section deflection in the middle of the pipe, cm	Величина отрыва левого конца трубы от тела грунтового основания, см The separation amount of the pipe's left end from the subgrade body, cm
0	27,81	-23,47	3,07	1,73	0,02
100	42,93	-41,25	4,88	2,54	0,11
250	46,88	-45,83	5,45	2,84	0,13
500	51,51	-51,12	5,98	3,14	0,15
750	54,29	-54,20	6,28	3,33	0,15
1000	56,41	-56,53	6,51	3,48	0,15
	2,0	2,4	2,1	2,0	

Составлено авторами / Made by the authors

Как видно из данных, представленных в таблицах 1 и 2, незначительное понижение температуры грунта основания (на 1 °C) мало влияет на результаты решения упругой задачи, но существенно замедляет

рост напряжений и перемещений в трубе во времени, снижая эффекты, создаваемые ползучестью грунта.

Так, напряжения в стальной трубе, возникающие в момент времени $t = 1000$ дней при температуре $\theta = -2$ °С, меньше соответствующих значений, полученных для стальной трубы при температуре $\theta = -1$ °С, в 1,6...1,9 раза. Прогиб сечения в середине трубы при $t = 1000$ дней и $\theta = -2$ °С меньше прогиба в середине трубы $t = 1000$ дней и $\theta = -1$ °С в 2,1 раза.

Рассмотрим водопропускную трубу $\varnothing 3,4$ м с толщиной стенки $t = 20$ мм, высота насыпи $h_0 = 9,32$ м, $L_{\text{расч}} = 49,81$ м — расчетная длина трубы.

Расчет проведен на действие нормативного собственного веса насыпи и собственного веса трубы на основе расчетной модели (рис. 1) при температуре грунта основания $\theta = -1$ °С. Толщина плоских конечных элементов насыпи и основания была принята равной 340 см. Вертикальная нагрузка на трубу, создаваемая грунтом насыпи в окрестности трубы, была определена на основе соотношения (3).

Таблица 3 / Table 3

Значения напряжений и перемещений для водопропускной трубы $\varnothing 3,4$ м в различные моменты времени после загрузки ($\theta = -1$ °С)

Stresses and displacements values for a culvert $\varnothing 3.4$ m various times after loading ($\theta = -1$ °C)

Время, сутки Time, days	Наибольшее растягивающее нормальное напряжение в теле трубы, МПа Maximum normal tensile stress in the pipe body, MPa	Наибольшее сжимающее нормальное напряжение в теле трубы, МПа Maximum compressive normal stress in the pipe body, MPa	Наибольшее касательное напряжение в теле трубы, МПа Maximum shearing stress in the pipe body, MPa	Прогиб сечения в середине трубы, см Section deflection in the middle of the pipe, cm
0	17,57	-12,6	2,30	0,91
100	64,37	-64,75	8,99	3,61
250	73,26	-74,19	10,04	4,27
500	80,69	-81,91	10,86	4,88
750	85,31	-86,50	11,34	5,27
1000	88,52	-89,65	11,64	5,57
	0,86	0,85	1,09	0,77

Составлено авторами / Made by the authors

В таблице 3 проиллюстрировано изменение напряженно-деформированного состояния рассматриваемой трубы во времени. Отметим, что отрыва концов трубы от грунтового основания зафиксировано не было.

В последней строке показана степень изменения показателей напряженно-деформированного состояния трубы в момент времени $t = 1000$ суток, произошедшая в результате замены трубы $\varnothing 2,6$ м на трубу $\varnothing 3,4$ м при прочих равных условиях.

Как видно из таблицы, в результате такой замены наибольшие нормальные напряжения снизились на 15 %, наибольшее касательное напряжение увеличилось на 9 %, прогиб сечения в середине стальной трубы уменьшился на 23 %.

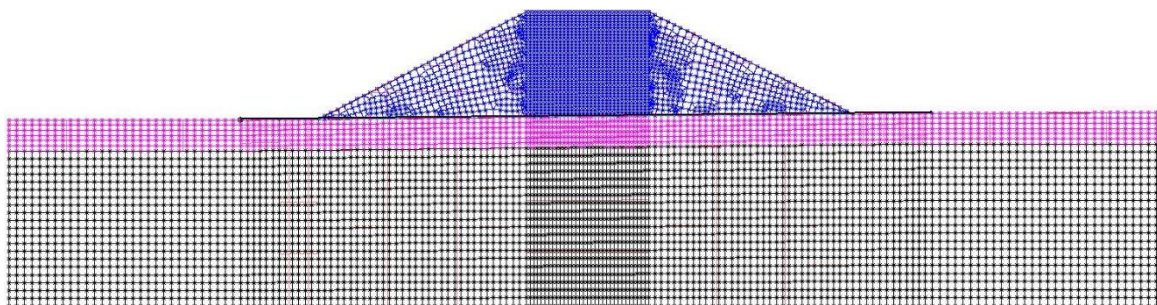


Рисунок 1. Модель взаимодействия водопропускной трубы $\varnothing 2,6$ м с грунтовыми массивами основания и насыпи, полученная на основе метода конечных элементов (составлено авторами)

Figure 1. $\varnothing 2.6$ m culvert interaction model with base and embankment soil mass, obtained based on the finite element method (made by the authors)

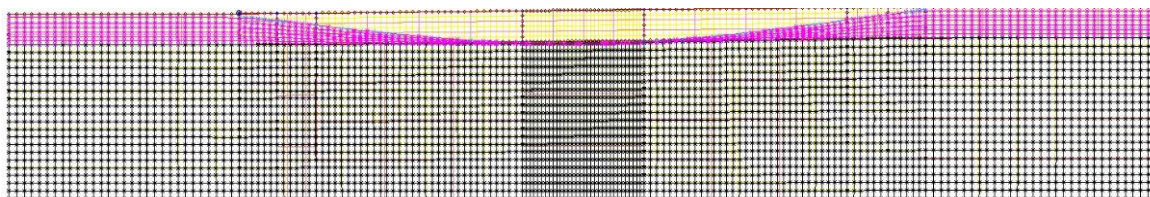


Рисунок 2. Деформированный вид водопропускной трубы $\varnothing 2,6$ м при температуре грунта основания $\theta = -1$ °С в начальный момент времени $t = 0$ суток (насыпь условно не показана) (составлено авторами)

Figure 2. Deformed view of the culvert $\varnothing 2.6$ m at the base soil temperature $\theta = -1$ °C at the start time $t = 0$ days (the embankment is conventionally not shown (made by the authors)

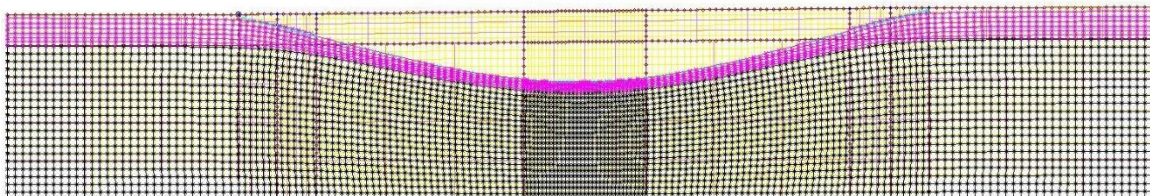


Рисунок 3. Деформированный вид водопропускной трубы $\varnothing 2,6$ м при температуре грунта основания $\theta = -1$ °С в момент времени $t = 180$ суток (насыпь условно не показана) (составлено авторами)

Figure 3. Deformed view of the culvert $\varnothing 2.6$ m at the base soil temperature $\theta = -1$ °C at the time $t = 180$ days (the embankment is conventionally not shown) (made by the authors)

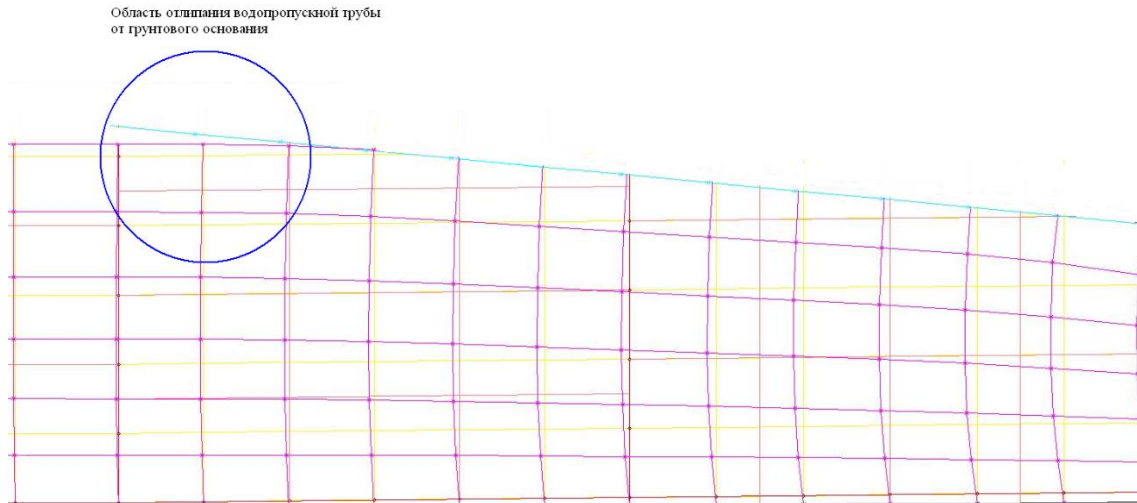


Рисунок 4. Деформированный вид участка водопропускной трубы $\varnothing 2,6$ м в районе ее выхода из тела насыпи при температуре грунта основания $\theta = -1$ °С в начальный момент времени $t = 0$ суток (составлено авторами)

Figure 4. Deformed view of the $\varnothing 2.6$ m culvert section in its exit area from the embankment body at the base soil temperature $\theta = -1$ °C at the initial time $t = 0$ days (made by the authors)

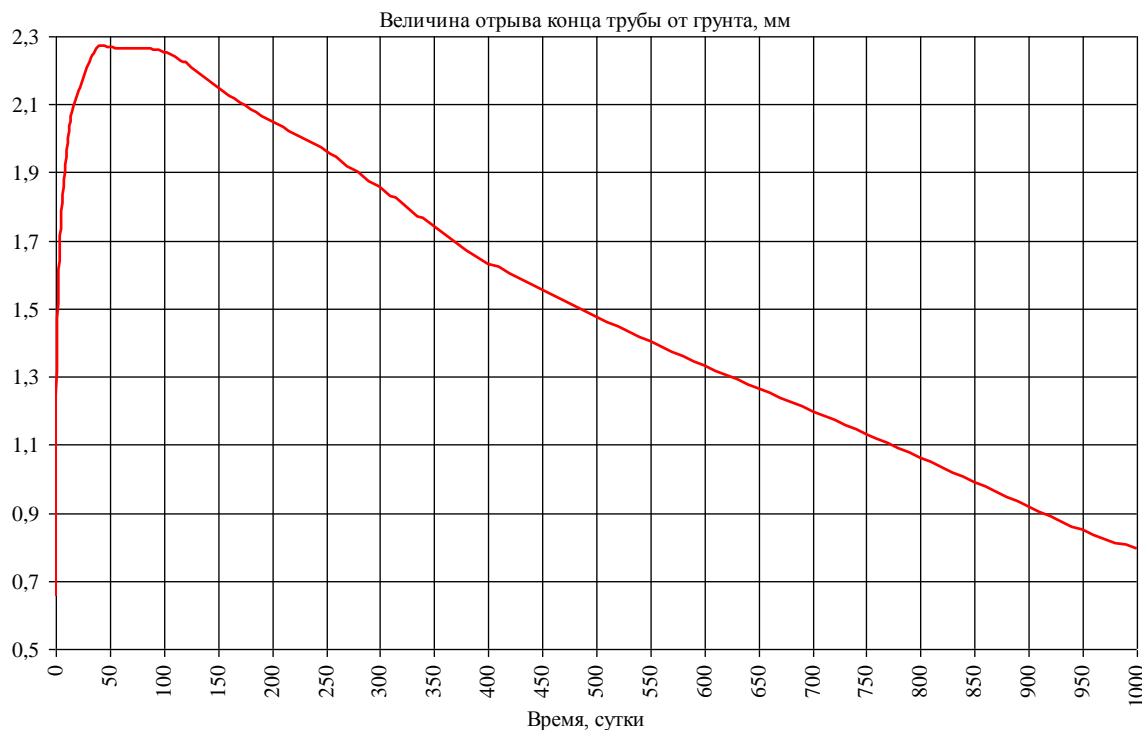


Рисунок 5. Зависимость от времени величины отрыва левого конца водопропускной трубы $\varnothing 2,6$ м от грунта основания при температуре грунта основания $\theta = -1$ °С (составлено авторами)

Figure 5. Time dependence of the separation value of the left end of the culvert $\varnothing 2.6$ m from the base soil at the temperature of the base soil $\theta = -1$ °C (made by the authors)

Заключение

Conclusion

В заключение, на основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. При проектировании объектов дорожной инфраструктуры в районах вечной мерзлоты необходимо учитывать ползучесть мерзлого грунта, в результате которой с течением времени могут развиваться весьма существенные значения напряжений и деформаций в элементах указанных конструкций.
2. Даже незначительное понижение температуры мерзлого грунта основания (на 1°C) приводит существенному снижению деформаций и напряжений, развивающихся в водопропускной трубе с течением времени в результате ползучести мерзлого грунта основания.
3. Увеличение диаметра водопропускной трубы способствует снижению деформаций и напряжений в трубе, развивающихся в результате ползучести грунта основания во времени, но в значительно меньшей степени, чем понижение температуры мерзлого грунта.
4. Для минимизации негативного влияния ползучести грунта основания на эксплуатационные характеристики водопропускной трубы можно рекомендовать назначение начального выгиба (строительного подъема) водопропускной трубы, параметры которого нужно определять на основе имеющихся исходных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Andersland, O.B.** Stress Effect on Creep Rates of a Frozen Clay Soil / O.B. Andersland, W. Akili. — DOI <https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.1.27> // Géotechnique. — 1967. — Т 17. — № 1. — С. 27–39. — URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/geot.1967.17.1.27> (дата обращения: 25.08.2021).
2. **Akili, W.** On the stress-creep relationship for a frozen clay soil / W. Akili // Materials Research and Standards. — 1970. — Т. 10. — № 1. — С. 16–22. — URL: <https://trid.trb.org/view/121445> (дата обращения: 25.08.2021).
3. **Ladanyi, B.** An Engineering Theory of Creep of Frozen Soils / B. Ladanyi. — DOI <https://doi.org/10.1139/t72-005> // Canadian Geotechnical Journal. — 1972. — Т 9. — № 1. — С. 63–80. — URL: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/t72-005> (дата обращения: 25.08.2021).
4. **Ma, W.** 冻土的蠕变及蠕变强度 [Ползучесть и сопротивление ползучести мерзлых грунтов] / W. Ma, Z.W. Wu, Y. Sheng // Journal of Glaciology and Geocryology. — 1994. — № 2. — С. 113–118. — URL: <http://caod.oriprobe.com/order.htm?id=34498949&ftext=base> (дата обращения: 25.08.2021). — (На кит. яз.).
5. **Li, D.W.** Research on parabolic yield-surface creep constitutive model of artificial frozen soil / D.W. Li, R.H. Wang, Y.H. Zhao, P. Hu // Rock and Soil Mechanics. — 2007. — № 9. — С. 1943–1948. — URL: https://www.researchgate.net/publication/290325957_Research_on_parabolic_yield-surface_creep_constitutive_model_of_artificial_frozen_soil (дата обращения: 25.08.2021).
6. **Chen, D.** A long-term strength criterion for frozen clay under complex stress states / D. Chen, W. Ma, G. Li, Z. Zhou, Y. Mu. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103089> // Cold Regions Science and Technology. — 2020. — Т 176. — С. 103089. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165232X20300252> (дата обращения: 25.08.2021).
7. **Вялов, С.С.** Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений / С.С. Вялов, В.Г. Гмошинский, С.Э. Городецкий и др. — Под общ. ред. д-ра техн. наук проф. С.С. Вялова. — М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. — 254 с.
8. Теория консолидации грунтов / Под ред. чл.-кор. АН СССР проф. Н.А. Цытовича. — М.: Наука, 1967. — 270 с.
9. **Ting, J.M.** On the nature of the minimum creep rate — time correlation for soil, ice, and frozen soil / J.M. Ting. — DOI <https://doi.org/10.1139/t83-017> // Canadian Geotechnical Journal. — 1983. — Т 20. — № 1. — С. 176–182. — URL: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/t83-017> (дата обращения: 25.08.2021).
10. **Tiande, M.** Creep of frozen soil by damage mechanics / M. Tiande, W. Xuexia, Z. Changqing. — DOI [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(96\)85042-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)85042-X) // Science in China, Series B. — 1995. — Т 38. — № 8. — С. 996–1002. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/014890629685042X> (дата обращения: 21.09.2021).
11. **Wang, S.** A simple rheological element based creep model for frozen soils / S. Wang, J. Qi, Z. Yin, J. Zhang, W. Ma. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.06.007> // Cold Regions Science and Technology. — 2014. — Т 106–107. — С. 47–54. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165232X14001177> (дата обращения: 21.09.2021).
12. **Nishimura, S.** THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application / S. Nishimura, A. Gens, S. Olivella, R.J. Jardine. — DOI <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.159> // Géotechnique. — 2009. — Т 59. — № 3. — С. 159–171. — URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.2009.59.3.159> (дата обращения: 21.09.2021).
13. **Морозов, В.С.** Расчет осадок сооружений на основании из мерзлого торфа / В.С. Морозов, Г.С. Морозов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. — 2003. — № 1. — С. 47–53. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9608067> (дата обращения: 25.08.2021).

14. Пономарева, Т.М. Деформирование длинномерного участка трубопровода с учетом реологических процессов мерзлых грунтов / Т.М. Пономарева // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2007. — № 3. — С. 78–82. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23840643> (дата обращения: 02.09.2021).
15. Иванов, В.А. Экспериментальные исследования продольных перемещений труб в мерзлых и оттаивающих грунтах / В.А. Иванов, Е.С. Михаленко, С.М. Соколов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2012. — № 2. — С. 77–81. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17698537> (дата обращения: 02.09.2021).
16. Мосина, А.С. Прогноз изменения состояния многолетнемерзлой грунтовой толщи под влиянием строительства и эксплуатации подземных резервуаров для захоронения отходов бурения в условиях Крайнего Севера (на примере Среднего Ямала) / А.С. Мосина, С.К. Николаева, А.А. Скворцов. — DOI <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2020-15-2-68-81> // Инженерная геология. — 2020. — Т. 15. — № 2. — С. 68–81. — URL: <http://www.geomark.ru/articles/prognoz-izmeneniya-sostoyaniya-mnogoletnemerzloj-gruntovoj-tolshhi-pod-vliyaniem-stroitelstva-i-ekspluatatsii-podzemnyh-rezervuarov-dlya-zahoroneniya-othodov-bureniya-v-usloviyah-krajnego-severa-na-p/> (дата обращения: 21.09.2021).
17. Gioda, G.A. numerical and experimental study of the artificial freezing of sand / G. Gioda, L. Locatelli, F. Gallavresi. — DOI <https://doi.org/10.1139/t94-001> // Canadian Geotechnical Journal. — 1994. — Т. 31. — № 1. — С. 1–11. — URL: <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/t94-001> (дата обращения: 21.09.2021).
18. Горбунов-Посадов, М.И. Расчет конструкций на упругом основании / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова. — М.: Стройиздат, 1973. — 627 с.
19. Цытович, Н.А. Исследование упругих и пластических деформаций мерзлых грунтов / Н.А. Цытович // Труды КОБМ АН СССР. — 1940. — Т. X.

Сведения об авторах:

Марасанов Александр Игоревич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительная механика», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: marasanovai@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8672-8822>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=6938

Шейкин Александр Александрович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Мосты и тоннели», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия, e-mail: a.sheikin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7358-8779>

Статья получена: 27.10.2021. Принята к публикации: 24.02.2022. Опубликовано онлайн: 10.03.2022.

REFERENCES

1. Andersland O.B., Akili W. Stress Effect on Creep Rates of a Frozen Clay Soil. *Géotechnique*. 1967; 17(1): 27–39. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.1.27>.
2. Akili W. On the stress-creep relationship for a frozen clay soil. *Materials Research and Standards*. 1970; 10(1): 16–22. Available at: <https://trid.trb.org/view/121445> (accessed 25th August 2021). (In Eng.).
3. Ladanyi B. An Engineering Theory of Creep of Frozen Soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 1972; 9(1): 63–80. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1139/t72-005>.
4. Ma W., Wu Z.W., Sheng Y. 冻土的蠕变及蠕变强度 [Strength and creep of frozen soil]. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 1994; (2): 113–118. Available at: <http://caod.oriprobe.com/order.htm?id=34498949&ftext=base> (accessed 25th August 2021). (In Chin.).
5. Li D.W., Wang R.H., Zhao Y.H., Hu P. Research on parabolic yield-surface creep constitutive model of artificial frozen soil. *Rock and Soil Mechanics*. 2007; (9): 1943–1948. Available at: https://www.researchgate.net/publication/290325957_Research_on_parabolic_yield-surface_creep_constitutive_model_of_artificial_frozen_soil (accessed 25th August 2021). (In Eng.).

6. Chen D., Ma W., Li G., Zhou Z., Mu Y. A long-term strength criterion for frozen clay under complex stress states. *Cold Regions Science and Technology*. 2020; 176: 103089. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103089>.
7. Vyalov S.S., Gmoshinskiy V.G., Gorodetskiy S.E. et al. [Strength and creep of frozen soils and calculations of ice-ground barriers]. Moscow: Publishing house Acad. sciences of the USSR; 1962. (In Russ.).
8. Tsytoich N.A. ed. [Soil Consolidation Theory]. Moscow: Nauka; 1967. (In Russ.).
9. Ting J.M. On the nature of the minimum creep rate — time correlation for soil, ice, and frozen soil. *Canadian Geotechnical Journal*. 1983; 20(1): 176–182. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1139/t83-017>.
10. Tiande M., Xuexia W., Changqing Z. Creep of frozen soil by damage mechanics. *Science in China, Series B*. 1995; 38(8): 996–1002. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(96\)85042-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)85042-X).
11. Wang S., Qi J., Yin Z., Zhang J., Ma W. A simple rheological element based creep model for frozen soils. *Cold Regions Science and Technology*. 2014; 106–107: 47–54. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.06.007>.
12. Nishimura S., Gens A., Olivella S., Jardine R.J. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application. *Géotechnique*. 2009; 59(3): 159–171. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.159>.
13. Morozov V.S., Morozov G.S. Calculation of building settlement on frozen peat base. *Russian Forestry Journal*. 2003; (1): 47–53. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9608067> (accessed 25th August 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Ponomareva T.M. [Deformation of a long section of the pipeline, taking into account the rheological processes of frozen soils]. *Oil and Gas Studies*. 2007; (3): 78–82. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23840643> (accessed 2nd September 2021). (In Russ.).
15. Ivanov V.A., Mikhalenko E.S., Sokolov S.M. Experimental studies of pipes length travel in the permafrost and thawing grounds. *Oil and Gas Studies*. 2012; (2): 77–81. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17698537> (accessed 2nd September 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
16. Mosina A.S., Nikolaeva S.K., Skvortsov A.A. Forecast of changes in the condition of the permafrost soil mass under the influence of the construction and operation of underground reservoirs for disposal of waste drilling in the conditions of the Far North (on the example of the Middle Yamal). *Engineering Geology World*. 2020; 15(2): 68–81. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2020-15-2-68-81>.
17. Gioda G., Locatelli L., Gallavresi F. A numerical and experimental study of the artificial freezing of sand. *Canadian Geotechnical Journal*. 1994; 31(1): 1–11. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1139/t94-001>.
18. Gorbunov-Posadov M.I., Malikova T.A. [Calculation of structures on an elastic foundation]. Moscow: Stroyizdat; 1973. (In Russ.).
19. Tsytoich N.A. [Study of elastic and plastic deformations of frozen soils]. *Proceedings of the KOVM of the Academy of Sciences of the USSR*. 1940; X. (In Russ.).

Information about the authors:

Alexander I. Marasanov — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
e-mail: marasanovai@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8672-8822>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=6938

Alexander A. Sheikin — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,
e-mail: a.sheikin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7358-8779>

Submitted: 27th October 2021. Revised: 24th January 2022. Published online: 10th February 2022.