

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

2020, №4, Том 7 / 2020, N 4, Vol. 7 <https://t-s.today/issue-4-2020.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/03SATS420.pdf>

DOI: 10.15862/03SATS420 (<http://dx.doi.org/10.15862/03SATS420>)

Анализ напряженно-деформированного состояния фундаментов дорожно-транспортных сооружений на сезоннопромерзающих грунтах

¹Пермикин А.С., ^{1,2}Овчинников И.Г., ¹Грицук А.И.

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Екатеринбург, Россия

²ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

Автор, ответственный за переписку: Пермикин Анатолий Сергеевич, e-mail: prmmost@gmail.com

Аннотация. В данной статье рассматриваются фундаменты дорожно-транспортных сооружений при их расположении в зоне сезоннопромерзающих грунтов. В качестве примера рассматривается и анализируется ряд применяемых конструкций водопропускных труб, как сооружений наиболее распространенных на сети автодорог и имеющих незначительный вес. Выделяются некоторые недостатки конструктивных решений таких труб. Отмечается, что эксплуатационные характеристики непучинистого грунта основания снижаются в процессе фильтрации водного потока и осаждения мелких частиц, приводится зависимость относительного морозного пучения грунта от процентного содержания мелкого заполнителя.

В качестве примера влияния сил морозного пучения рассматривается типовая конструкция водопропускной трубы. Выполняется расчёт нормальных и касательных сил пучения, действующих на оголовки трубы, из предположения загрязнённости грунта подушки. На основании расчёта приводятся графики зависимости расчётной величины поднятия ненагруженного основания от влажности грунта и

толщины пучащегося грунта, давления пучения от влажности грунта.

В связи с недостаточной величиной удерживающих от поднятия сил приведены возможные негативные последствия воздействия сил морозного пучения, влияющие не только на эксплуатационные характеристики водопропускных труб, но и на ровность дорожного полотна и безопасность движения. Таким образом обоснована необходимость дополнительных мероприятий, предотвращающих пучение грунта под оголовочной частью трубы. Рассматриваются рекомендуемые мероприятия по предотвращению чрезмерных деформаций при морозном пучении, а также современные аспекты развития таких технологий. Сделаны выводы о применимости и целесообразности их в отношении малых искусственных сооружений транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: фундамент; водопропускные трубы; сезоннопромерзающие грунты; морозное пучение; деформации грунта; противоположные мероприятия

A stress-strain state analysis of the road transport works foundations on seasonally freezing soils

¹Anatoliy S. Permikin, ^{1,2}Igor G. Ovchinnikov, ¹Anastasiya I. Gricuk

¹Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

²Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Corresponding author: Anatoliy S. Permikin, e-mail: prmmost@gmail.com

Abstract. This article discusses the road transport works foundations when they are located in the seasonally freezing soils zone. Some culvert aqueduct utilized structures were considered and analyzed as an example, in the scope of most common structures on the road network and that also has an insignificant weight. Some constructive solutions disadvantages of these pipes were pointed out. It is noted that the operational characteristics of nonfrost-susceptible soil decrease in the watercourse filtering process and settling small particles and reported the dependence of the relative soil frost boil on the fine aggregate percentage.

As an example of the frost boil forces influence, a typical culvert aqueduct design is considered. The calculation of axial and tangential heaving forces that affect the crown of tube is performed, assuming that the bedding soil is contaminated. Based on the calculation, rise calculated value dependence graphs of the unstressed base on the soil dampness and the heaving

soil thickness, and the heaving pressure on the soil dampness are presented here.

Due to the insufficient value of the forces holding back against lifting, possible negative consequences of the frost boil impact forces are presented, this affects not only the culvert aqueduct operational characteristics but also the roadbed smoothness and traffic safety. Thus, the need for additional measures to prevent soil swelling under the pipe head is justified. Recommended measures to prevent excessive deformations during frost boil, as well as modern aspects of the development of such technologies, are considered. Conclusions are made about their applicability and feasibility in relation to small artificial structures of transport infrastructure.

Keywords: foundation; culvert aqueduct; seasonally freezing soils; frost boil; soil deformation; anti-heaving measures

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 с почти повсеместным распространением явления морозного пучения на территории Российской Федерации обеспечение устойчивости и нормальной эксплуатации зданий и сооружений является актуальной проблемой. Многочисленные конструкции, расположенные в теле грунта и на его поверхности, должны быть тем или иным образом приспособлены к воздействию морозного пучения: способны воспринять его без критических последствий или же полностью или частично ограждены от этого воздействия. Во многом проблема несущественна для конструкций с солидными нагрузками, как многоэтажные здания на плитных и столбчатых фундаментах со значительным давлением под подошвой, и конструкций с достаточным заглублением, как городские наружные сети. Таким образом, особого внимания требуют малонагруженные наземные конструкции: железные и автомобильные дороги. В данной статье предлагается рассмотреть именно автомобильные дороги: протяженные и изобилующие искусственными сооружениями. Среди всех искусственных сооружений на автомобильных дорогах подавляющую часть составляют малые мосты и водопропускные трубы – порядка 93 %, и на каждые 1,35 км дорожной сети приходится одна водопропускная труба [1]. Небольшие нагрузки на фундаменты малых искусственных сооружений обуславливают повышенную чувствительность к силам морозного пучения, что особенно проявляется в условиях глубокого сезонного промерзания, характерного, например, Свердловской области. При этом заложение подошвы фундамента ниже глубины промерзания не гарантирует надёжную эксплуатацию сооружения, а устройство заглубленных фундаментов может значительно увеличивать стоимость строительства.

Состояние проблемы

Problem state

На сегодняшний день существует огромное количество научных трудов как зарубежных, так и отечественных авторов, посвящённых теме морозного пучения. Изучением механизма морозного пучения и характеристик пучинистых грунтов занимались такие авторы как В.О. Орлов [2], Н.А. Цытович¹ и многие другие. Силами советских учёных и инженеров были заложены основы расчёта актуальные и по сей день, современные же исследования направлены на совершенствование и развитие теории, методов полевых и лабораторных испытаний [3; 4].

¹ Цытович Н.А. Механика мёрзлых грунтов. Учебн. пособие. М.: «Высш. школа», 1973. – 448 с.

Отдельного внимания заслуживают работы, посвященные изучению изменений вечномёрзлых грунтов на фоне актуальной проблемы глобального изменения климата [5; 6]. В зарубежной практике изучение процессов промерзания и оттаивания грунтов связано в первую очередь с такими фамилиями как Taber, Miller, Penner [7–9] и другими.

В то время как наука не стоит на месте, строительная отрасль с давних времён тяготеет к унификации и упрощению и активно использует практику типового проектирования и строительства. Несмотря на то, что жилищное строительство приняло преимущественно индивидуальный характер, в остальных видах, особенно в транспортном строительстве ввиду его масштабов, по-прежнему наблюдается широкое применение типовых конструкций. Зачастую такие проектные решения имеют историю в десятки лет, а пересматриваются в основном в связи с изменением нормативных нагрузок, хотя в значительной мере морально устаревают с точки зрения растущих технических возможностей, современных материалов и инновационных технологий.

Рассмотрим некоторые известные решения конструкций водопропускных труб в порядке появления:

- трубчатый регулятор двустороннего регулирования ² на пучинистых грунтах, предполагающий в качестве противопучинных мероприятий создание искусственного основания из непучинистых грунтов толщиной не менее 2/3 от расчетной глубины промерзания, крепление входной и выходной части трубы; авторы справочника отмечают, что в процессе эксплуатации таких сооружений наблюдаются трещины в порталных оголовках от совместного действия морозного пучения и температурных напряжений;
- водопропускная труба по типовому проекту 3.503.1-112.97 ³, предполагающая замену грунтов пучинистого основания под оголовками и крайними звеньями труб на гравийно-песчаную подушку толщиной 1,5 м;
- водопропускная труба по типовому проекту с шифром 1484 ⁴ аналогично упомянутой выше серии предусматривает замену грунта основания гравийно-песчаной смесью ниже глубины

² Железняков Г.В., Ю.А. Ибад-заде, П.Л. Иванов и др. Гидротехнические сооружения. М.: Стройиздат, 1983. – с. 417–419. – (Справочник проектировщика).

³ Типовой проект: Трубы водопропускные круглые железобетонные сборные из длинномерных звеньев. Серия 3.503.1-112.97.

⁴ Типовой проект: Трубы водопропускные круглые железобетонные сборные для железных и автомобильных дорог. Шифр 1484, 2002.

промерзания на 25 см для одноочковых труб только в оголовке, для многоочковых – по всей длине трубы.

Согласно рекомендациям⁵ заложение подошвы фундамента в сезоннопромерзающем слое возможно в двух случаях:

- под подошвой залегают непучинистые грунты;
- специальными исследованиями и расчетами установлено, что деформации грунтов основания не нарушают эксплуатационную пригодность сооружения.

Рассмотренные конструкции труб следует относить к первому случаю применения малозаглубленных фундамента, но следует отметить, что предусмотренные противопучинные мероприятия только теоретически предотвращают возникновение сил морозного пучения как таковых. Действительно, высота насыпи, предполагающая нормальную эксплуатацию трубы, не допускает промерзание грунта под средними звеньями насыпи, а гравийно-песчаная подушка в основании оголовка считается не подверженной пучению (рис. 1). В то же время гравийно-песчаные подушки в процессе эксплуатации подвергаются кольматации водным потоком, в связи с отсутствием мероприятий по её предотвращению в конструкции трубчатого регулятора и выпучивании защитного экрана, предусмотренного в конструкции трубы по типовому проекту. Эффективность устройства таких подушек значительно падает, а грунт засыпки с глинистым заполнителем уже может рассматриваться как пучинистый.

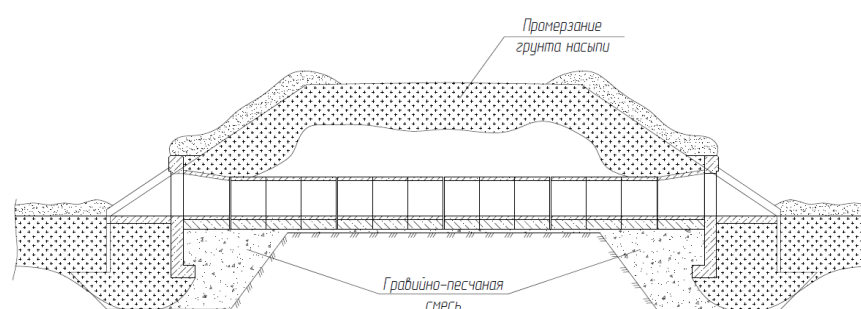


Рисунок 1. Промерзание грунтов насыпи и основания (составлено автором)

Figure 1. Embankment and base soils freezing (compiled by the author)

В своих работах Швец В.Б. [10] приводит зависимость интенсивности пучения крупнообломочных грунтов (щебень и дресва гранита) от влажности пылевато-глинистого заполнителя и его количественного содержания (рис. 2). Автором также отмечается, что в условиях открытой системы питания уже при 10%-ном содержании наблюдается значительное

⁵ Рекомендации по проектированию и расчету малозаглубленных фундамента на пучинистых грунтах. Москва: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 1985. – 31с.

пучение, а при увеличении пропорционально растёт, при 40%-ом же содержании интенсивность возрастает до значений, соответствующих пучению пылевато-глинистого заполнителя.

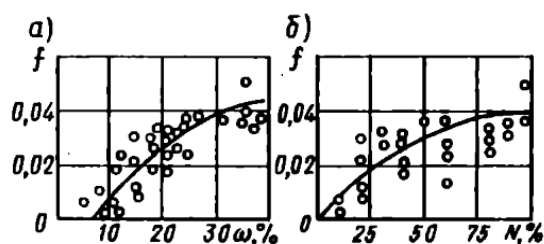


Рисунок 2. Зависимость относительного морозного пучения f крупнообломочного грунта от влажности w (а) и содержания N мелкообломочного заполнителя (б) (заимствовано из [10])

Figure 2. Dependence of the relative frost boil f of macrofragmental soil on moisture w (a) and content N of fine aggregate (b) (borrowed from [10])

Данную зависимость примем в качестве параметра, характеризующего степень загрязнения основания оголовков. Основываясь на заключениях автора, в качестве заполнителя приняты глинистые грунты, характерные для Екатеринбурга [11], приведённые в табл. 1:

Таблица 1 / Table 1

Физико-механические характеристики дисперсных грунтов

Dispersive soil stress-related characteristics

Вид грунта Soil type	p	p_d	p_s	w	n	e	w_l	w_p
Глины Clays	1.86	1.380	2.816	0.348	51.0	1.063	0.566	0.340

В качестве примера предлагается рассмотреть влияние сил морозного пучения на конструкцию одноочковой круглой сборной трубы для автомобильных дорог по типовому проекту 1484 диаметром 1,5 м с фундаментом типа 1 и минимально допустимой высотой насыпи, как вариант, распространённый на сети автомобильных дорог и изначально предполагающий благоприятные условия для развития сил морозного пучения. Основные размеры приведены на рис. 3.

Расчётная методика подробно рассматривается в рекомендациях⁶. Допущения, принятые при расчётах:

1. значения влажности грунта приняты от критической влажности w_{cr} , ниже которой пучение невозможно, до полной влагоёмкости грунта w_{sat} с разбивкой в 10 шагов, при этом не учитывается возможность отжатия лишней воды при промерзании;

⁶ Рекомендации по проектированию и расчету малозаглубленных фундаментов на пучинистых грунтах. Москва: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 1985. – 31 с.

2. толщина пучащегося грунта под оголовком принята 20, 50 и 100 см с целью выявления зависимости толщина пучащегося слоя – давление морозного пучения;

3. не учитывается влияние сжимаемости подстилающего слоя.

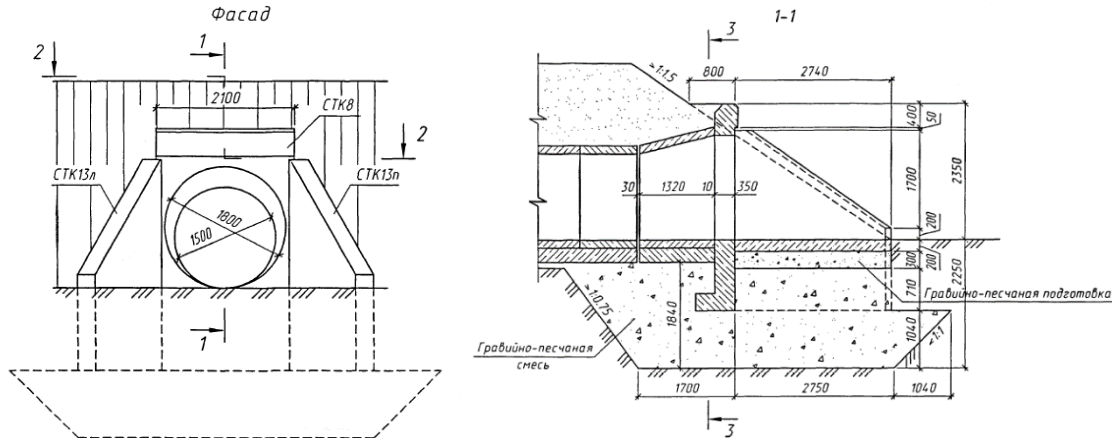


Рисунок 3. Основные размеры трубы (заимствовано из типового проекта⁷)

Figure 3. The main pipe dimensions (taken from a typical project)

По данным расчёта построены графики «влажность грунта – расчётная величина пучения» (рис. 4) и «влажность грунта – давление пучения» (рис. 5).

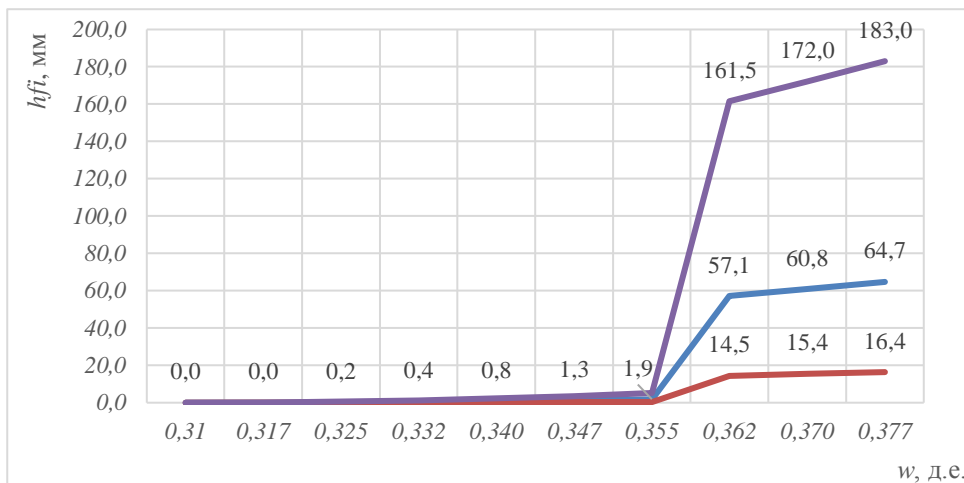


Рисунок 4. График зависимости расчётной величины поднятия ненагруженного основания h_{fi} от влажности грунта w глины при толщине слоя 20, 50 и 100 см (составлено автором)

Figure 4. Graph of the rise calculated value dependence of the unstressed base on the clay soil dampness with a layer thickness of 20, 50, and 100 cm (compiled by the author)

⁷ Типовой проект: Трубы водопропускные круглые железобетонные сборные для железных и автомобильных дорог. Шифр 1484, 2002.

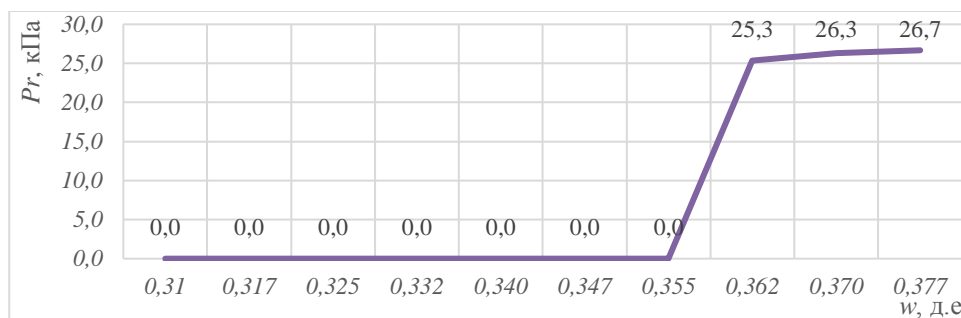


Рисунок 5. График зависимости величины давления пучения P_r от влажности грунта w глины при толщине слоя 100 см (составлено автором)

Figure 5. Graph of the heaving pressure dependence on the clay soil dampness with a layer thickness of 100 cm (compiled by the author)

Из приведённых графиков видно, что величина поднятия ненагруженного основания, как и давление пучения зависят от влажности грунта и в большей мере от толщины пучающегося слоя, зависимость имеет нелинейный характер с выраженным скачком значений, соответствующим влажности предела пучения грунта и обусловленным различиями в методике определения расчётной величины поднятия.

Кроме определённого выше давления пучения, которое является по сути нормальными силами морозного пучения, действующими на нижние грани порталной и откосных стенок, на фундамент крайнего звена, следует обратить внимание на касательные силы, возникающие при смерзании грунта с боковыми поверхностями конструкций, указанных выше. Зачастую именно касательные силы оказывают решающее значение на устойчивость сооружения.

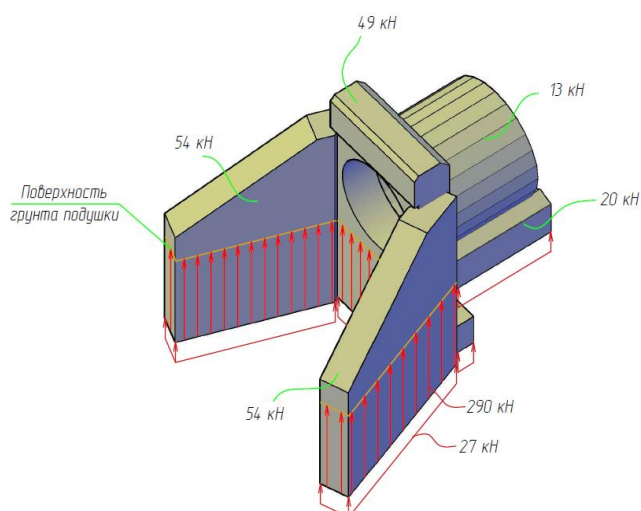


Рисунок 6. Нагрузки на крайнее звено водопропускной трубы (составлено автором)

Figure 6. Loads on the culvert aqueduct extreme link (compiled by the author)

Для гладких бетонных поверхностей в условиях среднепучинистых грунтов, значение удельной касательной силы следует принимать равным 90 кПа⁸. На рис. 6 приведены нагрузки на крайнее звено при принятых наиболее неблагоприятных условиях.

Нагрузки от собственного веса, удерживающего конструкцию трубы от поднятия, сравнительно малы и недостаточны, вследствие чего возникают значительные неравномерные деформации. При пучении происходит поднятие оголовка трубы, что приводит к относительному смещению звеньев, расстраиванию швов и разрушению гидроизоляции, нарушению режима работы и заиливанию лотка, возникновению и развитию трещин в бетоне, нарушению откосов насыпи. Деформации элементов накапливаются с каждым циклом замораживания-оттаивания грунта, пока наконец не приводят к аварийному состоянию не только трубы, но и земляного полотна и дорожного покрытия, необходимости дорогостоящих работ по ремонту или реконструкции.

Рассмотрим известные мероприятия, используемые при строительстве на пучинистых грунтах, применительно к поставленной проблеме.

Мероприятия по предотвращению чрезмерных деформаций при морозном пучении основания

Measures to prevent excessive deformations during frost boil of the base

В качестве решений проблемы чрезмерных деформаций зданий и сооружений при промерзании грунтов можно выделить следующие мероприятия⁹:

- *Строительно-конструктивные.*

К строительно-конструктивным мероприятиям, направленным на уравнивание сил морозного пучения или приспособление зданий и сооружений к деформациям при промерзании и оттаивании основания, можно отнести устройство свайных фундаментов и их заанкеривание, обмазку боковых поверхностей фундаментов. Применение свайных фундаментов, в особенности винтовых, призматических свай с наклонными гранями, конусных и двуконусных свай, исследованию работы которых

⁸ Рекомендации по проектированию и расчету малозаглубленных фундаментов на пучинистых грунтах. Москва: НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 1985. – 31 с.

⁹ Рекомендации по учёту и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1986. – 72 с.

посвящено множество как отечественных¹⁰ [12; 13], так и зарубежных публикаций [14; 15]¹¹, действительно может значительно снизить или нейтрализовать влияние касательных сил морозного пучения за счёт работы наклонных частей свай, но по большому счёту устройство свай приводит к увеличению трудозатрат и стоимости строительства при основании, не требующем свайного фундамента из условия его несущей способности, а названные конструкции на текущий момент не получили массового распространения по причине недостаточной изученности их работы в грунте. Для обмазки боковых поверхностей применяются битумные мастики, пластичные смазки, эпоксидные смолы и прочие составы, нашедшие своё применение в качестве меры, значительно, от двух до четырёх раз, снижающей силы смерзания грунта с обработанными бетонными поверхностями, не ограничивающей, однако, действие нормальных сил¹².

К этой же группе можно отнести цементацию грунтов основания. Подобное решение применено в типовом проекте¹³: устройство противодиффузионных перемычек из цементно-грунтовой смеси в оголовочной части трубы для предотвращения фильтрации воды под трубу. Относительно малые объёмы работ и высокая стоимость привлечения специализированной техники приводят к привлечению ручного труда, а ручное разрыхление, перемешивание и уплотнение не может гарантировать заявленные качества и однородность смеси.

- *Инженерно-мелиоративные*

В числе таких мероприятий разделяют гидромелиорацию и тепломелиорацию. Гидромелиорация как мера, предполагающая предотвращение морозного пучения путем осушения грунтов или понижения уровня грунтовых вод, по понятным причинам не применима. Тепломелиорация – прокладка коммуникаций, выделяющих тепло в грунт, и теплоизоляция фундаментов. Прокладка коммуникаций применяется в основном для зданий на ленточных фундаментах, а в остальных случаях нецелесообразна. Теплоизоляция фундаментов нашла широкое применение в гражданском строительстве, но применяется и в дорожном строительстве в условиях вечно- и сезонномёрзлых грунтов с целью повышения прочности и устойчивости основания трубы и прилегающих участков насыпи,

¹⁰ Пономарёв, А.Б. Взаимодействие полых конических свай с окружающим грунтом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 1991. – 16 с.

¹¹ Heave-proof Arctic piling: пат. US3703812 A United States, МПК E02D 5/44, E02D 5/22/R. George; № 93764; Newton, Tulsa, Okla; Amoco Production Company. заявл. 13.11.1970; опублик. 28.11.1972.

¹² Рекомендации по применению кремнийорганических соединений в борьбе с морозным выпучиванием фундаментов. М.: Стройиздат, 1973. – 14 с.

¹³ Типовой проект. Трубы водопропускные круглые отв. 0,5–2,5 м спиральновитые из гофрированного металла с гофром 68x13 и 125x26 мм. Серия 3.501.3-187.10.

предотвращения оттаивания вечномёрзлых грунтов и снижения деформаций морозного пучения¹⁴. Так же применяются теплоизолирующие экраны в конструкциях водопропускных труб, приведём некоторые решения:

- конструкция водопропускной трубы¹⁵, в основании которой имеется теплозащитный экран, выполненный из пенополистирола, обладающего высоким термическим сопротивлением, экран покрывается гидрофобизирующим составом и предотвращает миграцию влаги в основание оголовка; конструкция имеет повышенную устойчивость в условиях сезоннопромерзающих грунтов в результате предохранения промерзания основания фундамента трубы устройством под ним сплошного по длине либо на крайних участках в зависимости от фронта промерзания теплозащитного экрана;

- конструкция водопропускной трубы¹⁶, содержащая свод, боковые стены, лоток выполнен с теплоизоляционным материалом – грунтом, покрытым защитным двухслойным экраном: нижний слой выполнен из пенопласта, верхний – из железобетона; конструкция должна уменьшать объем промерзающего грунта и снижать общую величину касательных сил пучения.

В качестве теплоизоляционных материалов применяют пенопласт, пеноизол, широко в дорожном строительстве применяются плиты из экструзионного пенополистирола. Современные материалы обладают не только высокими теплоизоляционными, но и несущими свойствами, долговечностью.

- *Физико-химические*

Физико-химические мероприятия направлены на изменение физико-химического состава грунтов и включают мероприятия по гидрофобизации и засолению грунтов. Обе меры показывают определённую эффективность, но не применимы в представленной ситуации: гидрофобизация грунта предотвращает смачивание частиц грунта, уменьшает его поверхностную энергию, что, однако, не предотвращает кольматацию щебеночной подушки, накопление глинистого заполнителя и его пучение; засоленные грунты имеют уменьшенную температуру замерзания грунтовой влаги, что уменьшает объемную льдистость грунта, а

¹⁴ СТО 218.001-2006. Проектирование и устройство термоизолирующих слоёв из экструдированного пенополистирола «STYROFOAM» на автомобильных дорогах России, 2006 – 63 с.

¹⁵ Пат. РФ 2317367, МПК E01F 5/00. И.И. Сац, В.И. Гавриленко, В.А. Михайлов. Водопропускная труба на автомобильной дороге с пучинистым основанием – Оpubл. 20.02.2008.

¹⁶ Пат. РФ 187757, МПК E01F 5/00. В.В. Щербаков, В.В. Степанович, П.С. Пинчук, А.А. Опарин. Водопропускная труба в насыпи – Оpubл. 18.03.2019.

значит и деформации пучения, однако в виду быстрого вымывания солей мера малоэффективна.

Выводы

Conclusions

1. Меры по предотвращению сил морозного пучения и критических для сооружений неравномерных деформаций в каждом отдельном случае должны подбираться индивидуально ввиду отсутствия универсальных решений на основании анализа местных условия и экономической целесообразности.
2. Устаревшие по всем показателям конструкции типовых водопропускных труб, показывающие неудовлетворительные качества при эксплуатации в сложных условиях, как при расположении их на потенциально пучинистом основании и под высокими насыпями, должны быть переработаны и выходить из повсеместного применения.
3. Многие современные решения и исследования направлены на совершенствование конструкций водопропускных труб на вечно- и сезонномёрзлых грунтах с широким применением различных теплоизоляционных материалов и новых типов свайных фундаментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лисов В.М.** Дорожные водопропускные трубы / В.М. Лисов. – М.: Информ.-изд центр «ТИМР», 1998. – 140 с.
2. **Орлов В.О.** Криогенное пучение тонкодисперсных грунтов / В.О. Орлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 187 с.
3. **Роман Л.Т.** Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мёрзлых и оттаивающих дисперсных грунтов / Роман Л.Т., Царапов М.Н и др. – М.: «КДУ», «Университетская книга», 2018. – 188 с.
4. **Каган Г.Л.** Разработки в области строительства сооружений на сезоннопромерзающих грунтах: монография / Г.Л. Каган, В.А. Шорин, А.Ю. Вельсовский. – Вологда: ВоГУ, 2016. – 184 с.
5. **Шестернев Д.Д.** Пучение грунтов в условиях глобального изменения климата / Д.Д. Шестернев // Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменения: Материалы международной конференции. Т.1 / Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. – С. 315–317.

6. **Шестернев Д.М.** Пучение крупнообломочных пород Читино-Ингодинской впадины в связи с потеплением климата / Д.М. Шестернев, Д.Д. Шестернев // Криосфера Земли. – 2007. – № 4. – С. 80–92. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12795743> (дата обращения: 12.10.2020).
7. **Taber S.** Frost Heaving / S. Taber. – DOI <https://doi.org/10.1086/623637> // The Journal of Geology. – 1929. – Т 37, № 5. – С. 428–461. – URL: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/623637> (дата обращения: 26.09.2020).
8. **Miller R.D.** Frost heaving in non-colloidal soils / R.D. Miller // Proceedings of the Third International Conference on Permafrost, 10–13 July 1978 / Эдмонтон, Альберта. Оттава, Онтарио: National Research Council of Canada, 1978. – С. 708–713.
9. **Penner E.** Fundamental Aspects of Frost Action / E. Penner // Frost Action in Soils. Int'1. Symp. Univ. of Lulea, Sweden, Vol. 2. / Лүлео: Univ. of Lulea, 1977. – С. 17–28.
10. **Швец В.Б.** Элювиальные грунты как основания сооружений / В.Б. Швец. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1993. – 224 с.
11. **Грязнов О.Н.** Факторы инженерно-геологических условий города Екатеринбурга / О.Н. Грязнов, А.Н. Гуляев, Н.В. Рубан, И.А. Савинцев, С.А. Черкасов // Известия Уральского государственного горного университета. – 2015. – № 3. – С. 5–20. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24246737> (дата обращения: 14.10.2020).
12. **Добрынин А.О.** Повышение эффективности свайных фундаментов, устраиваемых в пучинистых грунтах / А.О. Добрынин. – DOI <https://doi.org/10.15862/09КО615> // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2015. – Т 7, № 6. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/09КО615.pdf> (дата обращения: 26.09.2020).
13. **Свидерских А.В.** Схема работы свай винтовых конусно-спиральных в условиях сезоннопромерзающего грунтового основания / А.В. Свидерских, И.В. Носков // Вестник Евразийской науки. – 2019. – № 3. – URL: <https://esj.today/PDF/53SAVN319.pdf> (дата обращения: 14.10.2020).
14. **Huang X.** Experimental Study on Anti-frost Jacking of Belled Pile in Seasonally Frozen Ground Regions / X. Huang, Y. Sheng. – DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-97115-5_102 // Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. / Под ред. Wu W., Yu Sh. Кам: Springer International Publishing, 2018. – С. 1368–1371. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-97115-5_102 (дата обращения: 15.10.2020).
15. **Domaschuk L.** Frost heave resistance of pipe piles with expanded bases / L. Domaschuk // Proceedings of the Third International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, presented at Energy-Sources Technology Conference & Exhibition, New Orleans, Louisiana, February 12–17, 1984. Vol. 3 / Под ред. Virgil J. Lunardini Нью-Йорк: American Society of Mechanical Engineers, 1984. – С. 58–63.

Сведения об авторах:

Пермикин Анатолий Сергеевич – доцент кафедры «Мосты и транспортные тоннели», ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Екатеринбург, Россия, e-mail: prmmost@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6162-156X>

Овчинников Игорь Георгиевич – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Екатеринбург, Россия, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, e-mail: bridgesar@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

Грицук Анастасия Ильинична – студент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Екатеринбург, Россия, e-mail: aigritysuk@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5390-9870>

Статья получена: 02.11.2020. Принята к публикации: 03.02.2021. Опубликовано онлайн: 17.02.2021.

REFERENCES

1. Lisov V.M. [Road culverts]. Moscow: Inform.-Publishing Center "TIMR"; 1998. (In Russ.).
2. Orlov. V.O. [Cryogenic heaving of finely dispersed soils]. Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Sciences; 1962. (In Russ.).
3. Roman L.T., Tsarapov M.N. et al. [A guide for determining the physical and mechanical properties of freezing, frozen and thawing dispersed soils]. Moscow: "KDU", "University book"; 2018. (In Russ.).
4. Kagan G.L., Shorin V.A., Velsovsky A.Yu. [Developments in the field of construction of structures on seasonally freezing soils: monograph]. Vologda: VoGU; 2016. (In Russ.).
5. Shesternev D.D. [Heaving of soils in the context of global climate change]. In: *[Theory and practice of assessing the state of the Earth's cryosphere and forecasting its change: Materials of the international conference. Vol. 1.]*. Tyumen: TyumGNGU; 2006. p. 315–317. (In Russ.).
6. Shesternev D.M., Shesternev D.D. Frost heaving of coarse clastic rocks of the Chitin-Ingodinskoi cavity in connection with climate warming. *Earth's Cryosphere*. 2007; (4): 80–92. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12795743> (accessed 12th October 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
7. Taber S. Frost Heaving. *The Journal of Geology*. 1929; 37(5): 428–461. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1086/623637>.
8. Miller R.D. Frost heaving in non-colloidal soils. In: *Proceedings of the Third International Conference on Permafrost, 10–13 July 1978*. Edmonton, Alberta. Ottawa, Ont: National Research Council of Canada; 1978. p. 708–713. (In Eng.).
9. Penner E. Fundamental Aspects of Frost Action. In: *Frost Action in Soils. Int'l. Symp. Univ. of Lulea, Sweden, Vol. 2*. Lulea: Univ. of Lulea; 1977. p. 17–28. (In Eng.).
10. Shvets V.B. [Eluvial soils as foundations of structures. 2nd ed., Rev. and add.] Moscow: Stroyizdat; 1993. (In Russ.).
11. Gryaznov O.N., Gulyayev A.N., Ruban N.V., Savintsev I.A., Cherkasov S.A. Factors of engineering and geological conditions of the city of Yekaterinburg. *Izvestia Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2015; (3): 5–20. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24246737> (accessed 14th October 2020). (In Russ.).

12. Dobrynin A.O. [Improving the efficiency of pile foundations built in heaving soils]. *Naukovedenie*. 2015; 7(6). (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15862/09KO615>.
 13. Sviderskikh A.V., Noskov I.V. Scheme of operation of screw cone-spiral piles in the conditions of seasonally freezing soil foundation. *The Eurasian Scientific Journal*. 2019; 11(3). Available at: <https://esj.today/PDF/53SAVN319.pdf> (accessed 14th October 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
 14. Experimental Study on Anti-frost Jacking of Belled Pile in Seasonally Frozen Ground Regions. In: Wu W., Yu Sh. (eds). *Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. Cham: Springer International Publishing; 2018. p. 1368–1371. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-97115-5_102 (accessed 15th October 2020). (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-97115-5_102.
 15. Domaschuk L. Frost heave resistance of pipe piles with expanded bases. In: Virgil J. Lunardini, ed. *Proceedings of the Third International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, presented at Energy-Sources Technology Conference & Exhibition, New Orleans, Louisiana, February 12–17, 1984*. Vol.3. New York: American Society of Mechanical Engineers; 1984. p. 58–63. (In Eng.).
-

Information about the authors:

Anatoliy S. Permikin – Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: prmmost@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6162-156X>

Igor G. Ovchinnikov – Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, e-mail: bridgesar@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

Anastasiya I. Gricuk – Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: aigritsuk@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5390-9870>

Submitted: 02nd November 2020. Revised: 03rd February 2020. Published online: 17th February 2020.