

Строительство металлических гофрированных труб в условиях наличия многолетнемерзлых грунтов

*А.В. Каменчуков¹, П.И. Егоров¹, Г.О. Николаева², Ю.В. Каменчуков¹,
Я.М. Рудакова¹*

¹*Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск*

²*Северо-Восточный федеральный университет, Якутск*

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы оценки эффективности строительства и эксплуатации металлических гофрированных труб. Выявлены характерные особенности и сложности работы водопропускных труб из гофрированного металла в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Систематизированы характеристики основных дефектов водопропускных труб. Детально разобраны особенности теплофизических расчетов металлических гофрированных труб на мерзлом основании. Даны рекомендации по применению наиболее эффективных технических решений при строительстве водопропускных труб из гофрированного металла на многолетнемерзлых грунтах.

Ключевые слова: автомобильная дорога, водопропускная трубы, металлические гофрированные трубы, теплопроводность, многолетнемерзлые грунты.

Неотъемлемой частью автомобильной дороги являются искусственные сооружения в местах пересечения водотоков и понижения рельефа. От их работы зависит общее состояние дороги и обеспечение безопасности движения по ней автотранспорта и охраны окружающей среды. Большая часть данных сооружений представлена водопропускными трубами, как железобетонными, так и металлическими, из гофрированных элементов [1, 2].

Необходимо отметить, что применение металлических гофрированных труб (МГТ) значительно ускорило процесс строительства и реконструкции дорог. Стоимость строительства таких труб ниже, чем железобетонных. Срок службы металлических гофрированных конструкций в условиях вечной мерзлоты в пять раз дольше, чем у железобетонных.

За многолетний опыт строительства МГТ в России накоплен достаточно большой опыт строительства труб, выявлены основные виды дефектов водопропускных труб и сложности строительства и содержания.

В ходе проведения исследовательской работы был выполнен сбор информации о дефектах на существующих водопропускных трубах под насыпями дорог, проходящих в зоне вечной мерзлоты [3, 4]. Сведения были предоставлены организациями, на балансе которых находятся дороги и сооружения на них. В общем можно выделить основные виды дефектов: просадка грунта над трубой; просадка грунта под трубой; просадка грунта под укреплением русла; застой воды перед трубой; разрушение защитного лотка; деформация тела трубы.

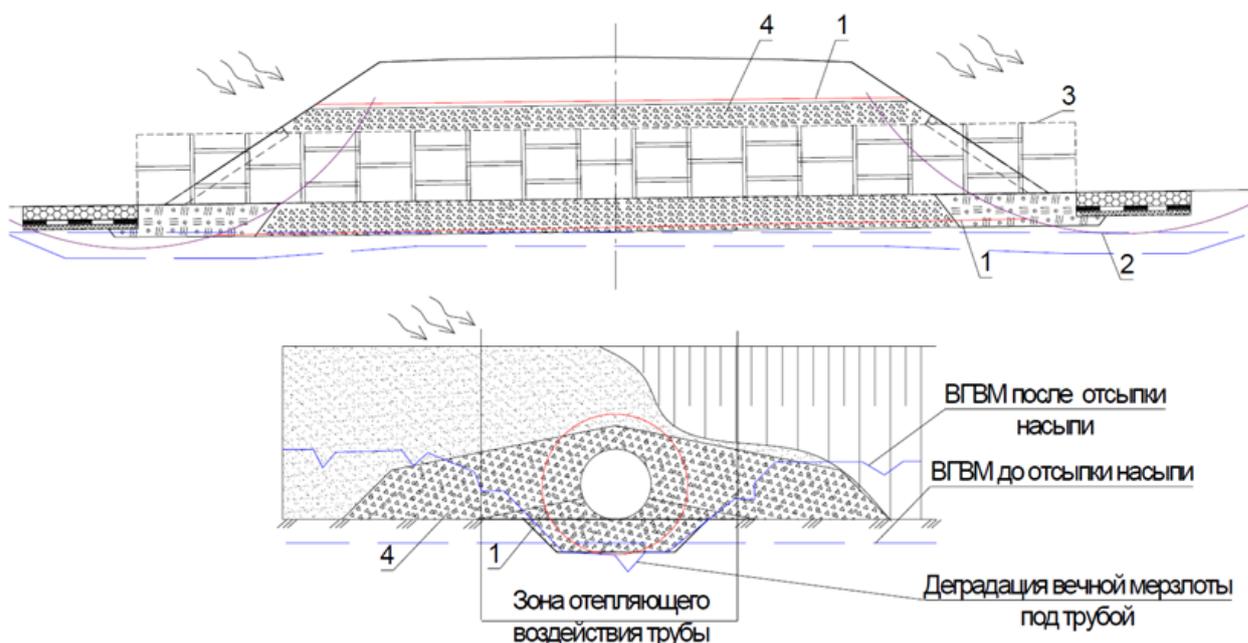
В целом, все дефекты являются следствием осадки и разуплотнения грунтов основания и засыпки [5]. Причиной этих процессов являются ошибки проектирования, некачественное производство работ при строительстве трубы, в том числе и применение неподходящих грунтов. В случае оттаивания грунтов основания и их осадки возникает застой воды на входном и выходном русле, что в дальнейшем может вызвать деградацию вечной мерзлоты. При этом геокриологические условия регионов Крайнего Севера зачастую характеризуются наличием термокарстовых процессов, представляющих собой опасные геологические явления.

Засыпка трубы в зимнее время предполагает использование талых, заранее подготовленных в карьерах грунтов, но по разным причинам часто происходят нарушения этих требований. Грунт укладывают с мерзлыми комьями. В итоге, при наступлении теплого периода, грунт насыпи оттаивает и разуплотняется, что особенно заметно при небольших высотах насыпи. В итоге происходят деформации и смещения звеньев труб. Дополнительно могут влиять силы морозного пучения, фильтрация воды в тело насыпи, как следствие, в некоторых случаях можно увидеть схождение или расхождение звеньев многоочковых труб.

При устройстве укрепления русла каменной наброской без применения теплоизолирующих слоев может возникнуть осадка просадочных грунтов,

что особенно опасно в верхнем бьефе. Материал и конструкция укрепления русла может быть назначена без учета размывающей скорости воды, как следствие, на выходном оголовке происходит разрушение конструкции укрепления, вымывается грунт под укреплением, что еще больше усиливает деградацию вечной мерзлоты и дальнейшую осадку грунта [6].

При наличии вечномерзлых грунтов в основании насыпи и трубы неравномерность осадки также возникает при различной глубине оттаивания грунтов основания и грунтов самой засыпки, особенно в случае отсыпки ее из мерзлых грунтов. На рис. 1 представлена условная схема отепляющего влияния трубы на окружающие грунты. При этом зона теплового влияния будет различной, так как зависит от теплопроводности материала лотка трубы, грунтов основания, подушки под трубой, засыпки, земляного полотна.



1 - граница распределения тепла, передающегося от нагретого летом воздуха через стенки трубы; 2 – зона теплового влияния солнечной радиации на укрепление откоса насыпи и русла, с нарушенным почвенно-растительным слоем; 3 – МГТ; 4 – грунтовая обойма.

Рис. 1. – Схема теплового взаимодействия МГТ с окружающей средой

Наглядно информация по неравномерности оттаивания грунта в системе «труба-основание-русло» представлена в ВСН176-78 (дополнение 2,

рис. 20). данная схема очень информативна для разработки технических решений по проектированию МГТ, так как позволяет в комплексе оценить взаимодействие трубы с окружающей ее средой, вероятные места оттаивания грунта и предусмотреть необходимые мероприятия по сохранению верхней границы вечной мерзлоты. Расчетная глубина оттаивания грунта ξ для других показателей, отличных от эталона вычисляются по формуле

$$\xi = \xi_{\text{э}} K K_1$$

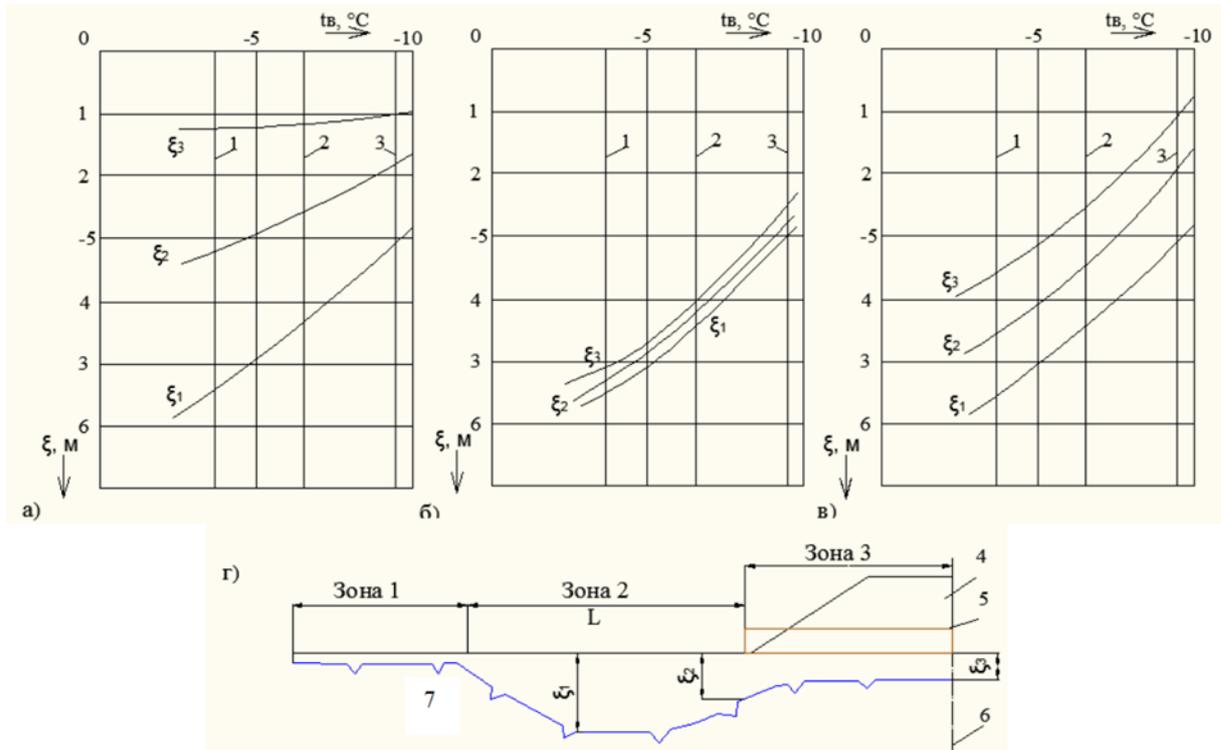
где $\xi_{\text{э}}$ – глубина оттаивания эталона, которая находится по графику (рис. 2); K – поправочный коэффициент; K_1 – коэффициент, учитывающий температуру вечномерзлых грунтов в начале строительства с учетом снежных заносов.

Коэффициент K ориентировочно принимается: для суглинка (влажностью $W_c = 30 - 20\%$) $k=0,9$; для песчаных грунтов (влажностью $W_c=15 - 20\%$) $k = 1,25$ для районов со среднегодовой температурой воздуха, равной или меньшей минус $6,5^{\circ}\text{C}$; $k = 1,35$ для районов со среднегодовой температурой воздуха минус $3,7^{\circ}$.

Так как ВСН176-78 не действует на момент проведения исследовательской работы, точные расчетные данные здесь не приводятся. Схема (рис. 2) приведена для представления о влиянии конструкции трубы на деградацию вечной мерзлоты.

Оттаивание грунтов сопровождается разрушением льдоцементационных связей минеральных частиц при переходе льда в воду. При этом резко уменьшается как сцепление с грунтов, так и их угол внутреннего трения φ . При оттаивании льдистых грунтов возникают осадки оттаивания–просадки. Внешняя нагрузка вызывает осадки уплотнения при оттаивании, происходящие за счет уменьшения пористости оттаивающего грунта. Согласно [7, 8], мерзлые грунты можно считать несжимаемыми, но строительство водопропускного сооружения невозможно с сохранением

естественного мерзлого состояния грунтов основания. За летний период года с положительными температурами воздуха неизбежно оттаивание грунтов основания [7, 9].



а – труба, продуваемая в зимний период; б – труба, не продуваемая в зимний период; в – труба, не продуваемая с теплоизолирующим слоем из пенопласта вокруг трубы толщиной 10 см; г – схема размещения исследуемых зон; t_b – среднегодовая температура воздуха; ξ_1 – глубина оттаивания грунта эталона в зоне с ненарушенной естественной поверхностью, м; ξ_2 – глубина оттаивания грунта эталона в зоне с нарушенной поверхностью, оголоенной от растительного и торфяного покрова, м; ξ_3 – глубина оттаивания грунта эталона под насыпью без растительного покрова с трубой, м; 1 – $t_b = -3,7$ оС (Усть-Кут); 2 – $t_b = -6,5$ оС (Тында); 3 – $t_b = -9,4$ оС (Чульман); 4 – насыпь; 5 – МГТ; 6 – ось насыпи; 7 – верхняя граница вечной мерзлоты.

Рис.2 – Графики для определения расчетной глубины оттаивания грунтов в зависимости от среднегодовой температуры воздуха

Глубину оттаивания грунта можно определить, согласно источникам [10, 11] по формуле:

$$d_{th,n} = \sqrt{\frac{2\lambda_{th}(T_{th,c}-T_{bf})t_{th,c}}{q_1} + \left(\frac{Q}{2q_1}\right)^2} - \frac{Q}{2q_1},$$

$$Q = \left(0.25 - \frac{t_{th,c}}{t_1}\right) (T_0 - T_{bf}) k_m \sqrt{\lambda_f C_f t_{th,c}},$$

$$q_1 = L_v - \left(\frac{t_{th,c}}{t_2} - 0.1\right) [C_{th}(T_{th,c} - T_{bf}) - C_f(T_0 - T_{bf})],$$

где T_{bf} - температура начала замерзания грунта, °С; $T_{th,c}$ - расчетная температура поверхности грунта в летний период, °С; $t_{th,c}$ - расчетный период положительных температур, ч; T_0 - расчетная среднегодовая температура многолетнемерзлого грунта, °С; λ_{th} и λ_f - теплопроводность соответственно талого и мерзлого грунта, Вт/(м·°С); C_{th} и C_f - объемная теплоемкость соответственно талого и мерзлого грунта, Дж/(м³·°С); k_m - коэффициент, принимаемый для грунтов в зависимости от значения теплоемкости C_f и средней температуры грунта.

Исходя из вышеописанного, на сегодня можно применить много методик для теплотехнического расчет труб под насыпями дороги. Большая часть их них требует определения большого числа параметров, за исключением приближенного расчета по картам глубин сезонного оттаивания. Цепочка расчетов может составить до 20 уравнений, что, при проектировании автомобильных дорог со средним количеством труб, равным 3-4 на один километр, является трудоемким процессом. Другой сложностью при составлении расчетов являются расхождения в размерностях и единицах измерений показателей, представленных в справочной информации и требуемых в формулах. Особенно это касается теплотехнических характеристик, например, коэффициентов теплопроводности и теплоемкости. Большинство справочных материалов были разработаны в СССР. В них эти показатели указаны в единицах измерения [ккал/м·ч·град] и [ккал/кг·град] соответственно, в то время как в расчетных формулах эти значения ставят в единицах измерения [Вт/м·град] и [Дж/кг·град], соответственно.

Важно определять оттаивание грунта при наличии в основании просадочных грунтов или линз льда. Полученное значение сравнивают с геологическим разрезом грунтов в месте устройства трубы, проверяя не достигают ли расчетные значения глубины оттаивания слоя просадочных многолетнемерзлых грунтов или линз льда. В противном случае требуются мероприятия по замене просадочного грунта или устройству теплоизолирующего слоя, для уменьшения глубины оттаивания грунта.

Для определения толщины теплоизолирующего слоя необходимо знать коэффициент теплопроводности материала и требуемое сопротивление теплопередаче.

Коэффициент теплопроводности показывает какое количество тепла проходит за один час через один квадратный метр материала толщиной один метр при разности температур в один градус. В виду высокой теплопроводности стали в любых условиях (более 58 Вт/м·К) в сравнении с теплопроводностью грунтов, которая зависит от характеристик и состояния грунта (1-3 Вт/м·К)], а также малой толщины ЛГМ, в расчет стенки металлической трубы можно не учитывать. Другим фактором является наличие воды в русле и теле трубы. Коэффициент теплопроводности воды составляет 0,569 Вт/м·К.

Исходя из известного коэффициента теплопроводности и толщины расчетного слоя, определяют термическое сопротивление для каждого слоя по формуле [1, 2]:

$$R_T = \frac{h}{\lambda},$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К; h - толщина слоя, м.

Для расчета требуемого сопротивления теплопередаче применительно к водопропускным трубам формул в опубликованных источниках найти не удалось. В проектной документации, разработанной АО

«Иркутскгипродорнии», для определения требуемого сопротивления теплопередаче при расчете толщины теплоизолирующего слоя была применена формула, принятая по [1, 2]:

$$R_{mp} = \text{ГС} \times a + b,$$

где a , b – коэффициенты, принятые по примечанию таблицы 3 СП50.13330.2012; ГС – градусутки периода года с положительными температурами, К·сут/год, которые определяются по формуле

$$\text{ГС} = Z_{\text{ТП}}(t_{\text{вв}} - t_{\text{г}}),$$

где $t_{\text{вв}}$ – температура сохранения грунта основания в мерзлом состоянии, градус; $t_{\text{г}}$ – средняя температура воздуха и воды в теплый период, градус; $Z_{\text{ТП}}$ – продолжительность периода с положительными периодами, сутки.

Значения температур и продолжительности периода следует определять по источнику или по данным многолетних наблюдений.

В качестве теплоизоляционного материала при строительстве дорог, в районах распространения вечной мерзлоты используют естественные и искусственные теплоизоляционные материалы. К естественным материалам можно отнести мохорастительный слой, торф или дополнительную подсыпку грунта, если позволяет рельеф. К искусственным теплоизоляционным материалам относятся пенопласт и, получивший в настоящее время наибольшее распространение, экструдированный пенополистирол.

При строительстве МГТ теплоизоляционные материалы естественного происхождения (мох и торф) применяют только при укреплении откосов насыпи и русел водотока. Существуют рекомендации по устройству каменной наброски на укреплении русла по естественному уплотненному почвенно-растительному слою, но данная рекомендация справедлива при незначительной скорости воды на выходном русле. Также должно

соблюдаться соотношение отметок входного и выходного лотка и соответствующий уклон трубы.

В основании водопропускного сооружения используют искусственные теплоизоляционные материалы. Укладывают материал, как правило под тело трубы. Толщина грунтовой засыпки между теплоизоляционными материалами и трубой составляет не менее 0,2 м, чтобы исключить неравномерно продавливание теплоизоляционного материала выступающими частями гофров. Сам теплоизоляционный материал укладывают на выравнивающий слой, отсыпанный, как правило, из песка.

Требования к условиям применения, а также способу укладки и засыпки данных материалов схожи. Выбор при проектировании определяется, как правило, стоимостью материала и его доставки.

Применение теплоизоляционных материалов при сооружении МГТ обычно находят в основании насыпи и тела трубы. Но возможна также их укладка под укрепление русла или откоса насыпи [12].

В целом, в данной работе определено несколько проблем, которые требуют дальнейшего решения. Первое, это выработка единой методики расчета металлических гофрированных труб в условиях взаимодействия распространения веной мерзлоты с учетом особенностей взаимодействия трубы с грунтами засыпки и основания, а также укрепления русел. Методика, представленная в ВСН 176-78, видится автору наиболее соответствующей поставленной задаче, но требует актуализации, так как за последние 40 лет изменились климатические параметры. В актуализированных СНиП изменились в некоторой части требования к грунтам, методам расчета их параметров. Возникла необходимость определения новых расчетных значений для регионов, где ранее мало велось метеорологических наблюдений, в связи с расширением транспортной инфраструктуры в этих регионах, например, Чукотский автономный округ или Магаданская область.

Необходимо усовершенствование нормативно-технической базы, особенно в сфере теплотехнических расчетов, так как в некоторых документах допущены разночтения в определениях и расчетах, что приводит к ошибкам в расчетах и принятию неверных решений.

Литература

1. Hydraulic design of highway culverts. U.S. Department of Transportation. Hydraulic design series number 5. Publication No. FHWA-NHI-01-020. Sept. 2001 (Revised May 2005), p. 348.

2. Hydraulic design of highway culverts. U.S. Department of Transportation. Hydraulic design series number 5. Third edition. Publication No. FHWA-NIF-12-026. April 2012. -326 p

3. Кудряшова Е.Е., Марущак В.В., Троян Т.П. Металлические гофрированные водопропускные трубы. Исторический обзор // Техника и технология строительства. 2016. № 4 (8). С. 86-91.

4. Алтунин В.И., Аграновский А.М., Черных О.Н. Опыт применения гофрированных металлических устройств в водопропускных сооружениях различного назначения // Вопросы мелиорации. 2007. № 3-4. -С. 65-69.

5. Бехтерев Р.А., Юркин Ю.В., Авдонин В.В., Басалаев А.А. Обзор методов стабилизации пучинистых грунтов Кировской области // Инженерный вестник Дона, 2022, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7696

6. Попов А.Н. Расчёт системы труба-основание-насыпь как контактной задачи с трением // Инженерный вестник Дона, 2022, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7850

7. Израэль Ю.А., Анохин Ю.А., Мяч Л.Т., Шерстюков А.Б. Оценка и прогноз возможного изменения климата и состояния вечной мерзлоты на территории Российской Федерации в 21 в. // Криогенные ресурсы полярных

регионов: Материалы международной конференции. - Салехард, 2007. - Т. 1. - С.127-129.

8. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky V.E., Nelson F.E., Etzelmuller B. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. Nature Communications. - 2018. - Vol. 9 (5147). - Article number 5147. DOI: 10.1038/s41467-018-07557-4

9. Aalto J., Karjalainen O., Hjort J., Luoto M. Statistical forecasting of current and future circum Arctic ground temperatures and active layer thickness. Geophysical Research Letters. - 2018. - Vol. 45. - Issue 10. - Pp. 4889-4898. DOI: 10.1038/s41467-018-07557-4. DOI: 10.1038/s41467-018-07557-4

10. Клевеко В.И., Моисеева О.В., Новодзинский А.Л. Выбор оптимального грунта засыпки подземного пешеходного перехода из металлических гофрированных конструкций // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. № 1. С. 102-114.

11. Wolters M., Wessing W., Dalmolen B., Eckert R., Wuest Ju. Reinforced Thermoplastic Pipeline (RTP) Systems for Gas Distribution. 23rd World Gas. Conf., Amsterdam: proceedings, 2006. URL: <http://members.igu.org/html/wgc2006/pdf/paper/add10946.pdf>

12. Слепнев П.А. Инженерная подготовка оснований и защита конструкций земляного полотна транспортных сооружений возводимых из глинистых грунтов с применением геосинтетических материалов // Инженерный вестник Дона, 2022, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7727

References

1. Hydraulic design of highway culverts. U.S. Department of Transportation. Hydraulic design series number 5. Publication No. FHWA-NHI-01-020. Sept. 2001 (Revised May 2005), p. 348.

2. Hydraulic design of highway culverts. U.S. Department of Transportation. Hydraulic design series number 5. Third edition. Publication No. FHWA-HIF-12-026. April 2012. 326 p.
 3. Kudryashova Ye.Ye., Marushchak V.V., Troyan T.P. Tekhnika i tekhnologiya stroitel'stva. 2016. № 4 (8). pp. 86-91.
 4. Altunin V.I., Agranovskiy A.M., Chernykh O.N. Voprosy melioratsii. 2007. № 3-4. pp. 65-69.
 5. Bekhterev R.A., Yurkin Yu.V., Avdonin V.V., Basalaev A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7696
 6. Popov A.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2022/7850
 7. Izrael' YU.A., Anokhin YU.A., Myach L.T., Sherstyukov A.B. Kriogennyye resursy polyarnykh regionov: Materialy mezhdunarodnoy konferentsii. Salekhard, 2007. T. 1. pp.127-129.
 8. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky V.E., Nelson F.E., Etmuller B. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. Nature Communications. 2018. Vol. 9 (5147). Article number 5147. DOI: 10.1038/s41467-018-07557-4
 9. Aalto J., Karjalainen O., Hjort J., Luoto M. Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45. Issue 10. Pp. 4889-4898. DOI: 10.1038/ s41467-018-07557-4. DOI: 10.1038/s41467-018-07557-4
 10. Kleveko V.I., Moiseeva O.V., Novodzinskij A.L. Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arhitektura. 2017. T. 8. № 1. pp. 102-114.
 11. Wolters M., Wessing W., Dalmolen B., Eckert R., Wuest Ju. Reinforced Thermoplastic Pipeline (RTP) Systems for Gas Distribution. 23rd World Gas. Conf., Amsterdam: proceedings, 2006. URL: members.igu.org/html/wgc2006/pdf/paper/add10946.pdf.
-



12. Slepnev P.A. Inzhenerny`j vestnik Dona, 2022, №6. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7727