

УДК 625:1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ С ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫМ СЛОЕМ В ОСНОВАНИИ (НА ПРИМЕРЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЛИНИИ БОВАНЕНКОВО – КАРСКАЯ)

Алексеев Е. С.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения», адрес: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д 9, стр. 9, evalekseenko@gmail.com

Проведено математическое моделирование температурного режима грунтов на участке железнодорожной линии Бованенково – Карская, с целью составления прогноза отепляющего влияния насыпи в местах расположения водопропускных труб (с укладкой слоя пеноплекса под трубой) и предупреждения возможности возникновения опасных геокриологических процессов в теле насыпи и непосредственно прилегающих к ней областях. В работе предложена схематизация задачи: рассмотрены три варианта, которые характеризуют возможные крайние случаи, когда будут формироваться наилучшие и наилучшие условия с точки зрения теплового и механического взаимодействия водопропускной трубы с многолетнемерзлыми грунтами. Результаты моделирования показали, что для уменьшения теплового влияния трубы по вертикали под ее нижней образующей целесообразно укладывать слой пеноплекса толщиной 10 см. Тепловое влияние трубы в горизонтальном направлении при укладке слоя пеноплекса значительно.

Ключевые слова: водопропускная труба, математическое моделирование, многолетнемерзлые грунты, теплоизоляционный слой.

NUMERICAL MODELING OF THERMAL INFLUENCE OF WATER THROUGHPUT PIPES WITH THE HEAT-INSULATION LAYER IN THE BASIS ON PERMAFROST (ON THE EXAMPLE OF THE RAILWAY LINE OF BOVANENKOVO – KARSKAYA)

Alekseenko E. S.

Moscow State University of Railway Engineering, Obrazcova Street, 9, building 9, Moscow, Russia, 127994. evalekseenko@gmail.com

The numerical modeling of temperature schedule of subgrade layer has been carried out within the section of railway line Bovanenkovo - Karskaya, and has been targeted to develop precise forecast of dynamics thermal influence on embankment in the locations of water throughput pipes (with the installation of a heat-insulation layer under a pipe), and to prevent dangerous geocriological processes emergence within embankment and its contiguous areas. The author suggests the schematization of the problem, where three different paths have been considered as critical possibilities of formation of the best and the worst facilities for thermal and mechanical interaction of water throughput pipes and permafrost layer. The numerical modeling results have shown the reduction of thermal effect on the pipe vertically with its lower surface needs a 10 cm thick heat-insulation layer packing. The thermal effect of horizontally oriented pipe is substantial when packing the heat-insulation layer.

Keywords: water throughput pipes, numerical modeling, permafrost regions engineering, heat-insulation layer.

Введение

Одним из важнейших условий обеспечения устойчивости земляного полотна при строительстве в криолитозоне является устройство эффективного водоотвода. Застои теплых поверхностных вод в основании насыпи категорически недопустимы. Их отепляющее воздействие приводит к деградации мерзлоты и серьезным деформациям земляного полотна скорее, чем отепляющее влияние самой насыпи. Поэтому необходимо применять водопропускные трубы, размещаемые в нижней части насыпи [1, 6, 9, 10].

Для принятия технических решений при проектировании водопропускных труб необходимо определять температурные поля в окружающем грунте [2, 4].

Постановка задачи

Для составления прогноза отепляющего влияния насыпи в местах расположения водопропускных труб (с укладкой слоя пеноплекса под трубой) и предупреждения возможности возникновения опасных геокриологических процессов в теле насыпи и непосредственно прилегающих к ней областях было проведено математическое моделирование температурного режима грунтов на участке железнодорожной линии Бованенково – Карская. Для моделирования использовалась компьютерная программа «WARM». Программа разработана на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ под руководством проф. Л. Н. Хрусталева [7].

Водопропускная труба рассматривается как бесконечная в линейном направлении. Значительные сложности возникают при назначении граничных условий на поверхности трубы. В летние месяцы в первом приближении температура поверхности трубы может быть принята равной среднемесячной температуре воздуха. В зимние месяцы труба постепенно заносится снегом. Она может заноситься полностью или частично. В последнем случае по трубе будет циркулировать холодный воздух. Также необходимо учитывать чрезвычайно сложную динамику накопления снега на откосах насыпи. Это в значительной степени влияет на температурный режим трубы и, следовательно, на температурное состояние окружающего ее грунта.

Учитывая сложность и неоднозначность условий на разных участках трассы, отсутствие данных о динамике снегонакопления, в диссертации предложена схематизация задачи. Рассмотрены три варианта:

- 1) труба в течение всего зимнего периода не заносится снегом; среднемесячная температура ее поверхности в течение всего года принимается равной среднемесячной температуре воздуха. В этом случае в летний период вокруг трубы должен формироваться ореол сезонного оттаивания грунта, зимой оттаявший грунт будет промерзать.
- 2) в летний период труба остается открытой и ее температура равна температуре воздуха, зимой труба полностью заносится снегом, и ее температура равна среднемесячной температуре грунта насыпи на уровне середины трубы.
- 3) температура поверхности трубы в течение всего года равна среднемесячной температуре грунта насыпи на уровне середины трубы.

Очевидно, что в реальных условиях ни один из этих вариантов не реализуется. Однако эти варианты характеризуют возможные крайние случаи, когда будут формироваться

наихудшие и наилучшие условия с точки зрения теплового и механического взаимодействия водопропускной трубы с многолетнемерзлыми грунтами.

Рассмотрим частный случай, характеризующий условия формирования температурного режима грунтов на конкретном участке трассы ПК 14673. Для того чтобы реализовать второй и третий варианты условий снегонакопления на участке расположения водопропускной трубы, необходимо иметь данные о среднемесячной температуре грунта насыпи на глубине расположения середины трубы. Для этого была решена дополнительная задача – расчет температурного режима тела насыпи.

Конструкция насыпи железной дороги, согласно проекту, включает сверху вниз: земляное полотно с крутизной откосов 1:4, составляющей 3/4 высоты насыпи, полубойму мощностью 0,4–0,5 м, теплоизоляционный слой в верхней части насыпи и защитный слой мощностью 0,4–0,5 м. Высота насыпи принята 3,0 м. Защитный слой представляет грунтовую массу в пропорции 70/30, где 70 % – составляет скальный грунт с крупностью не более 0,15 м, а 30 % – местные грунты в виде пылеватого песка. В качестве теплоизолятора используется пеноплекс толщиной 0,1 м. Полубоймы и земляное полотно отсыпаются из местных грунтов [6].

Под насыпью залегают многолетнемерзлые грунты ненарушенного сложения со среднегодовой температурой минус 4 °С. Состав грунтов и необходимые для расчета физические свойства получены по данным инженерно-геологических изысканий [5], теплофизические свойства приведены в соответствии с СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» (таблица) [8].

Глубины залегания слоев в таблице 1 даны от поверхности насыпи.

Таблица 1. Состав и теплофизические свойства грунтов

Зная температурный режим тела насыпи, среднемесячную температуру воздуха [5], характер снегонакопления [3], можно решать задачу о динамике температурного поля

№ слоя	Интервал глубин, м	Состав грунта	Засоленность, D_{sal} , %	Температура начала замерзания грунта, °С	Коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·°С)		Объемная теплоемкость грунта, Вт·ч/(м ³ ·°С)		Затраты тепла на фазовые переходы, $Q_{\text{ф}}$, Вт·ч/м ³
					Талого, $\lambda_{\text{т}}$	Мерзлого, $\lambda_{\text{м}}$	Талого, $C_{\text{т}}$	Мерзлого, $C_{\text{м}}$	
1	0-0,5	Песок	0	0	1,91	2,14	800	560	36118
2	0,5-0,6	Пеноплекс	0	0	0,03	0,03	128	128	111
3	0,6-3,0	Песок	0	0	1,91	2,14	800	560	36118
4	3,0-6,3	Суглинок	0,31	-1,1	1,57	1,8	740	505	40173
5	6,3-49,8	Песок	0,025	0	1,40	2,00	800	560	36118

грунтов на участках заложения водопропускных труб. На поверхности трубы заданы граничные условия первого рода – значения среднемесячной температуры либо воздуха, либо грунта на глубине заложения трубы.

По результатам математического моделирования на десятый год эксплуатации получены значения среднемесячной температуры грунта насыпи на глубине расположения центра водопропускной трубы. Значения температуры поверхности трубы для трех указанных в начале раздела случаев приведены в табл. 2.

Таблица 2. Среднемесячные температуры поверхности трубы, принятые при расчетах

Значения температуры, °С	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Принята равной температуре воздуха	-20.0	-21.9	-18.9	-12.9	-5.5	2	7.3	6.9	3.5	-4.0	-12.6	-17.8
Принята равной температуре насыпи	-2.4	-3.0	-5.6	-6.5	-6.2	-4.7	-1.8	-0.1	0.6	0.1	-0.2	-0.4
Принята равной температуре: летом – воздуха, зимой – насыпи	-2.4	-3.0	-5.6	-6.5	-6.2	2	7.3	6.9	3.5	0.1	-0.2	-0.4

Фрагмент разбивки расчетной области на блоки показан на рис. 1.

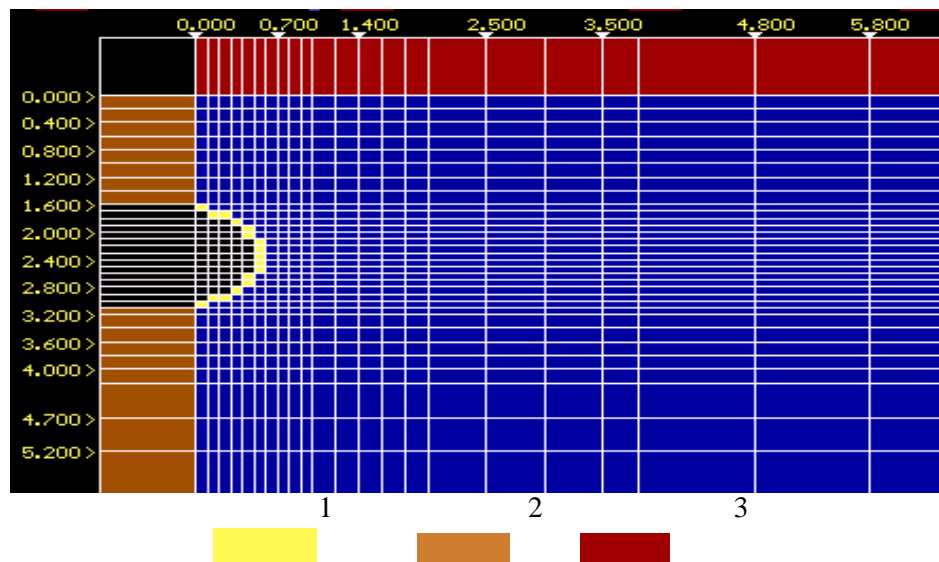
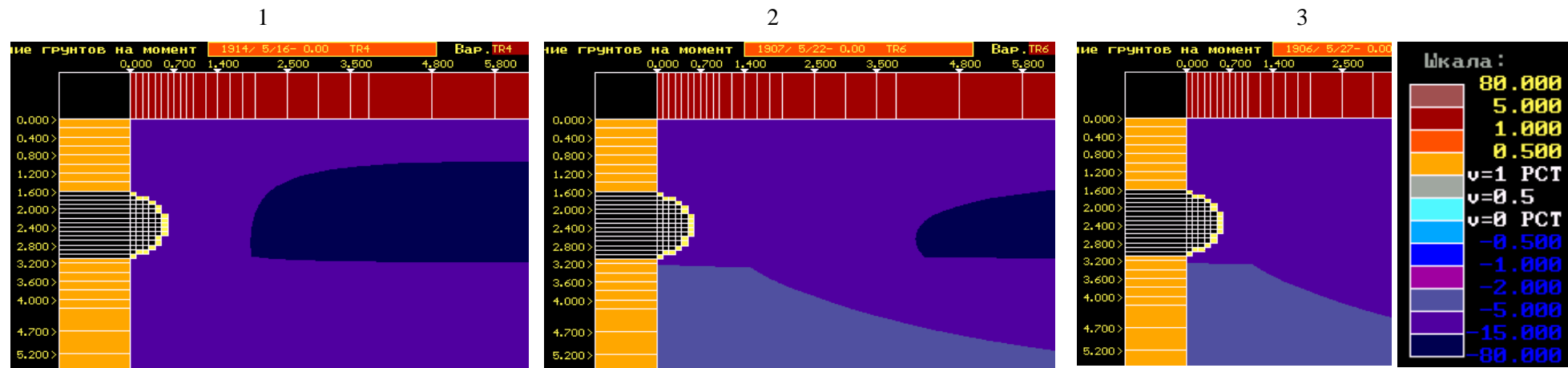


Рисунок 1. Фрагмент разбивки расчетной области на блоки:

1 – граничные условия первого рода; 2 – граничные условия второго рода; 3 – граничные условия третьего рода.

Полученные результаты

Некоторые результаты моделирования приведены на рис. 2. Шкала температур в °С показана на рис. 2 (май, вариант 3).



Май

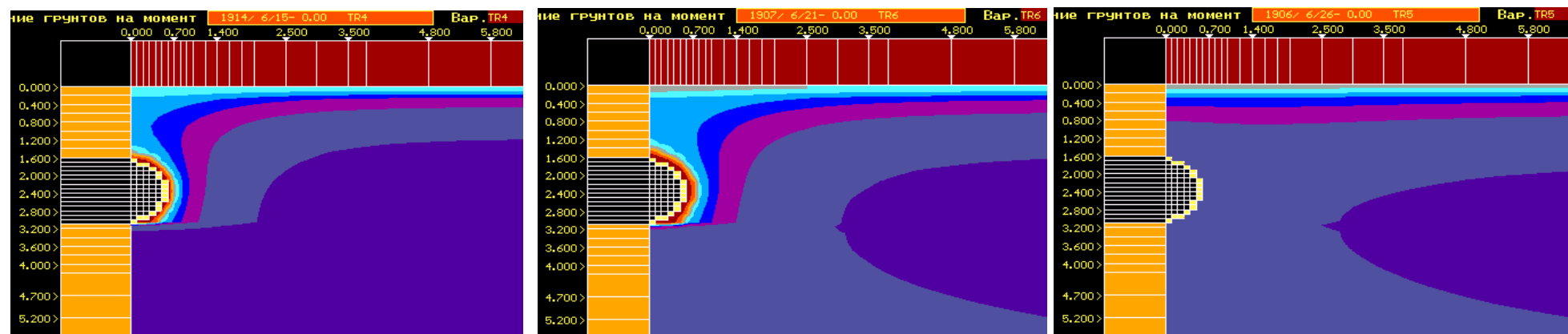
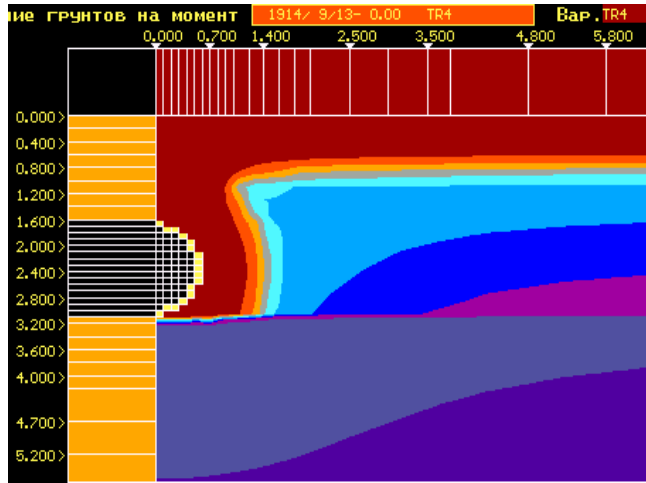


Рисунок 2. Температурное поле грунтов на участке расположения водопропускной трубы ПК 14673. Под нижней образующей трубы уложен слой пеноплекса

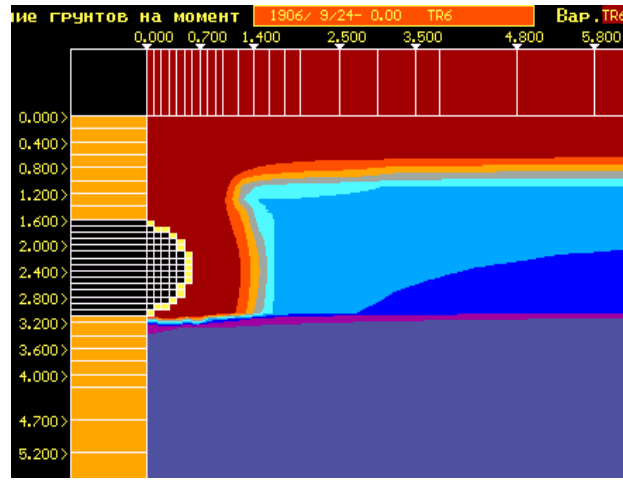
1 – температура на поверхности трубы равна среднемесячной температуре воздуха; 2 – температура на поверхности трубы в летний период равна среднемесячной температуре воздуха, в зимний период – среднемесячной температуре грунта в теле насыпи на уровне центра трубы; 3 – температура на поверхности трубы в течение всего года равна среднемесячной температуре грунта в теле насыпи на уровне центра трубы.

1

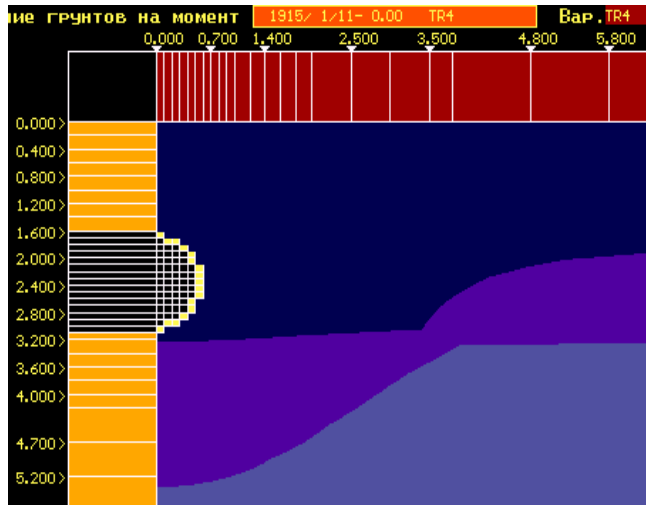
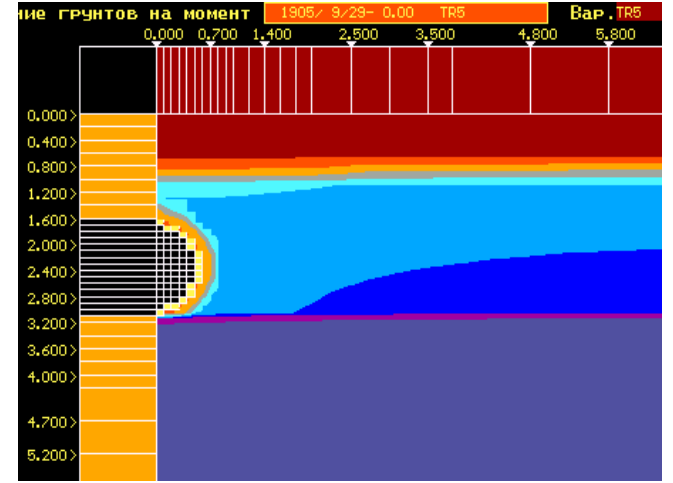


Сентябрь

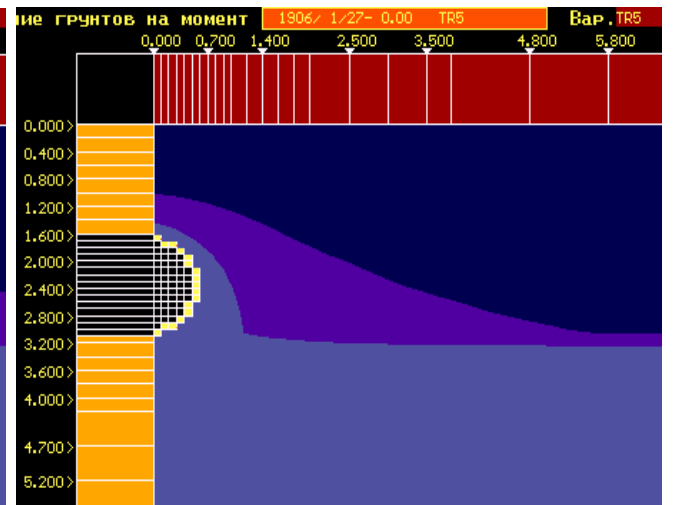
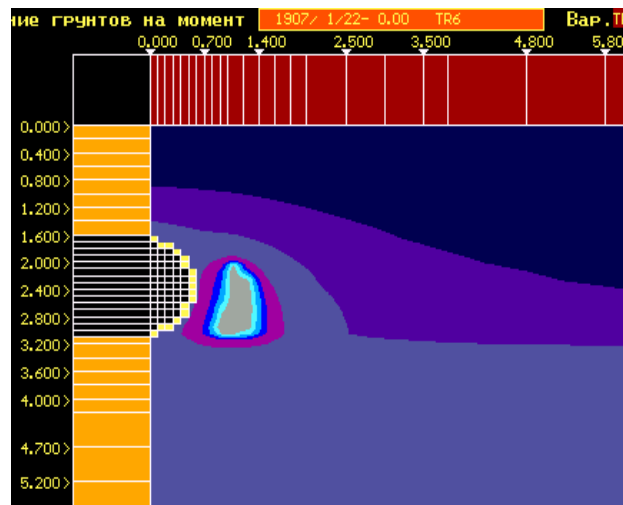
2



3



Январь



Продолжение рисунка 2

Проведенные расчеты позволяют выявить некоторые закономерности. В течение всего года при всех рассмотренных вариантах температурного режима в трубе оттаивание грунта под ее нижней образующей не происходит (рис. 3).

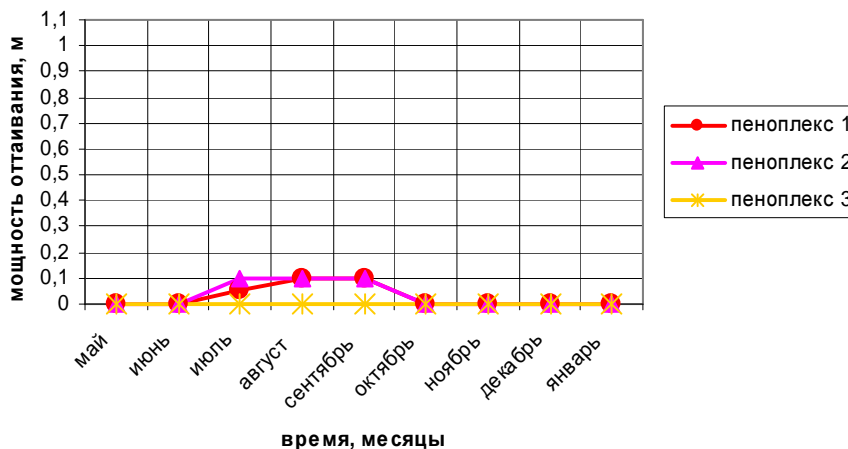


Рисунок 3. Величина оттаивания насыпи по вертикали при укладке теплоизолятора

При циркуляции в трубе атмосферного воздуха либо круглогодично, либо только в теплый период (варианты 1 и 2 на рис. 2), оттаивание грунта насыпи начинается в июне и достигает максимума в боковом направлении в конце сентября (0,8–1,0 м от края трубы). Грунт насыпи полностью промерзает в декабре и с этого момента до конца мая находится в мерзлом состоянии. В том случае, когда температурный режим в трубе определяется только тепловым состоянием насыпи (вариант 3), оттаивание грунта происходит только в сентябре – октябре и не превышает 0,1 м в боковом направлении (рис. 4).

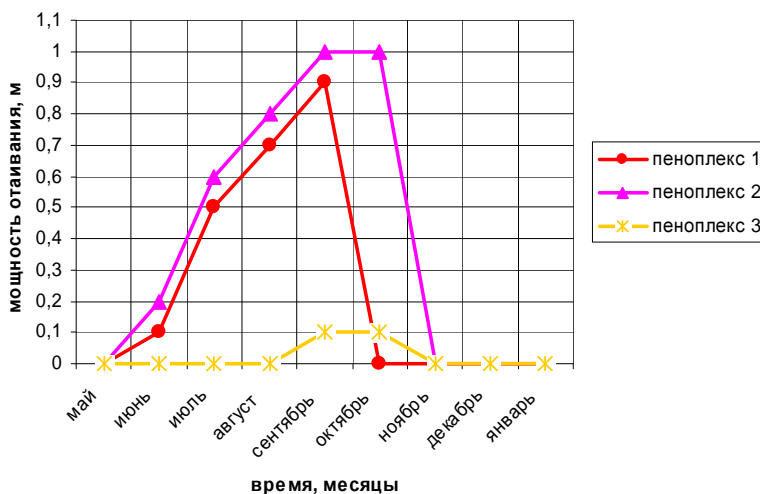


Рисунок 4. Величина оттаивания насыпи по горизонтали при укладке теплоизолятора

По результатам моделирования динамики температурного поля грунтов на участках заложения водопропускных труб можно отметить, что для уменьшения теплового влияния трубы по вертикали под ее нижней образующей целесообразно укладывать слой пеноплекса толщиной 10 см. Тепловое влияние трубы в горизонтальном направлении при укладке слоя пеноплекса значительно.

Также следует отметить, что влияние мощного снежного покрова невозможно учесть при построении расчетной модели, т.к. очень сложно рассчитать динамику снегонакопления, изменение плотности, теплопроводность и другие параметры, необходимые для определения коэффициента теплообмена. Для разработки такой модели необходимо провести натурные исследования и определить закономерности изменения и взаимодействия различных показателей.

Список литературы

1. ВСН 26-90 Инструкция по проектированию и строительству автомобильных дорог нефтяных и газовых промыслов Западной Сибири.
2. ВСН 61-89 Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты.
3. Геотехнический мониторинг земляного полотна в строительный период (участок 366–525 км) на строящейся железнодорожной линии Обская – Бованенково, ЯНАО. Отчет. Фонды ПНИИИС. М., 2009.
4. Кондратьев В. Г. Геокриологические проблемы железных и автомобильных дорог в криолитозоне. Материалы Четвертой конференции геокриологов России. Т. 3. М.: Университетская книга, 2011. С. 48-54.
5. «Новая железнодорожная линия Обская – Бованенково. Участок станция Бованенково – станция Карская» в составе стройки «Новая железнодорожная линия Обская – Бованенково». Инженерно-геологические изыскания. Пояснительная записка. ООО «Инжиниринговый центр Ямал». Лабытнанги. СПб., 2009.
6. «Новая железнодорожная линия Обская – Бованенково. Участок станция Бованенково – станция Карская» в составе стройки «Новая железнодорожная линия Обская – Бованенково». Технологические и конструктивные решения линейного объекта. Искусственные сооружения. Земляное полотно. Верхнее строение пути. Пояснительная записка. ООО «Инжиниринговый центр Ямал». Лабытнанги. СПб., 2009.
7. Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами WARM / Хрусталева Л. Н., Емельянов Н. В., Пустовойт Г. П., Яковлев С. В. Свидетельство № 940281. РосАПО, 1994.
8. СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах».
9. СНиП 2.05.03-84 (2000) Мосты и трубы.
10. СП 32-101-95 Проектирование и устройство фундаментов опор мостов в районах распространения вечномерзлых.

Рецензенты:

Коваленко Николай Иванович, д.т.н., профессор кафедры «Путь и путевое хозяйство» Института пути, строительства и сооружения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения», г. Москва.

Луцкий Святослав Яковлевич, д.т.н., профессор кафедры «Организация, технология и управление строительством» Института пути, строительства и сооружения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения», г. Москва.