

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ С ГРУНТАМИ ОСНОВАНИЯ В КРИОЛИТОЗОНЕ

## MATHEMATICAL SIMULATION OF THERMAL INTERACTION BETWEEN CULVERTS AND THEIR GROUND BASES IN THE PERMAFROST ZONE

### АЛЕКСЕЕНКО Е.С.

Аспирант кафедры организации, технологии и управления строительством Института пути, строительства и сооружений Московского государственного университета путей сообщения, г. Москва, [evalekseenko@gmail.com](mailto:evalekseenko@gmail.com)

### ALEKSEENKO E.S.

A post-graduate student of the organization, technology and management of construction department of the Institute of Railway, Construction and Constructions of Moscow State University of Railway Transport, Moscow, [evalekseenko@gmail.com](mailto:evalekseenko@gmail.com)

### Ключевые слова:

водопротупская труба; математическое моделирование; многолетнемерзлые грунты; теплоизоляционный слой; железнодорожная насыпь.

### Key words:

culvert; mathematical simulation; permafrost soils; frost protection layer; railway embankment.

### Аннотация

Статья посвящена математическому моделированию температурного режима грунтов на участке расположения водопротупской трубы в пределах железнодорожной линии Бованенково — Карская в целях составления прогноза отепляющего влияния насыпи и предупреждения возможности развития опасных геокриологических процессов. В работе предложена схематизация задачи. Рассмотрены три возможных случая, характеризующих формирование наихудших и наилучших условий с точки зрения теплового и механического взаимодействия водопротупской трубы с многолетнемерзлыми грунтами. Результаты моделирования показали, что для уменьшения теплового влияния трубы под ней целесообразно укладывать теплоизоляционный слой пеноплекса толщиной 10 см.

Эксплуатация железных дорог в районах распространения многолетнемерзлых грунтов сопряжена со значительными постоянно возрастающими и часто непроизводительными материальными и трудовыми затратами на текущее содержание и ремонт. В основном эти затраты связаны с ликвидацией остаточных деформаций земляного полотна и искусственных сооружений вследствие осадков при оттаивании льдистых грунтов или пучения при промерзании влажных дисперсных грунтов основания. Деградация многолетней мерзлоты вызывает развитие неравномерных осадков и термокарста, что угрожает безопасности движения поездов [4].

В связи с этим возникает необходимость сохранения грунтов основания земляного полотна в мерзлом состоянии на всем протяжении жизненного цикла железной дороги или, если процесс деградации мерзлоты под земляным полотном уже происходит, прекращения этого процесса. Это требует охлаждения грунтов основания земляного полотна с помощью естественного или искусственного холода. Для снижения отепляющего действия застойных поверхностных вод применяют водопротупские трубы, размещаемые в нижней части насыпи [1].

Принятие эффективных решений при проектировании водопротупских труб требует умения определять температурные поля в окружающем грунте [1].

Для составления прогноза динамики слоя сезонного промерзания (оттаивания) грунта под насыпью железной дороги в месте расположения водопротупской трубы (со слоем щебня или теплоизоля-

### Abstract

The article is devoted to mathematical simulation of the soil temperature regime at a culvert site of the Bovanenkovo — Karskaya railway line to prognose the embankment thermal influence and prevent development of hazardous geocryological processes. The author proposes a schematization of the task and considers three possible cases characterizing formation of the worst and the best conditions from the standpoint of thermal and mechanical interaction between the culvert and permafrost soils. The simulation results have shown that it is advisable to put a 10 cm thick frost protection layer of PENOPLEX under the culvert to reduce its thermal influence.

Таблица 1

Теплофизические свойства грунтов и теплоизолирующего материала (пеноплекс)									
№ слоя	Интервал глубин от поверхности насыпи, м	Грунт или теплоизолирующий материал	Засоленность $D_{sal}$ , %	Температура начала замерзания, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)		Объемная теплоемкость, Вт·ч/(м³·°С)		Затраты тепла на фазовые переходы $Q_{\phi}$ , Вт·ч/м
					грунта или материала				
					талого $\lambda_m$	мерзлого $\lambda_m$	талого $C_m$	мерзлого $C_m$	
1	0,0–0,5	Песок	0,000	0,0	1,91	2,14	800	560	36 118
2	0,5–0,6	Пеноплекс	0,000	0,0	0,03	0,03	128	128	111
3	0,6–3,0	Песок	0,000	0,0	1,91	2,14	800	560	36 118
4	3,0–6,3	Суглинок	0,310	-1,1	1,57	1,80	740	505	40 173
5	6,3–49,8	Песок	0,025	0,0	1,40	2,00	800	560	36 118

ционного слоя под ней) вследствие ее отепляющего влияния и предупреждения возникновения опасных геокриологических процессов в теле насыпи и непосредственно прилегающих к ней областях было выполнено математическое моделирование температурного режима грунтов с использованием программы WARM [3].

Прогноз динамики температурного поля грунтов на участках заложения водопропускных труб представляет собой сложную трехмерную задачу теплопроводности, которая может быть решена только численными методами. К сожалению, в настоящее время в нашем распоряжении нет программ численного решения трехмерных задач теплопроводности, поэтому пришлось пойти на упрощения и решать ее не в трехмерной, а в двухмерной постановке (в этом случае краевые эффекты не будут учитываться).

Водопропускная труба рассматривается как бесконечная в линейном направлении. Сложности возникают при назначении граничных условий на ее поверхности. В летние месяцы температура поверхности трубы может быть принята равной среднемесячной температуре воздуха, но в зимние месяцы труба постепенно (полностью или частично) заносится снегом. В последнем случае по трубе будет циркулировать холодный воздух.

Необходимо учитывать сложную динамику накопления снега на откосах насыпи, которая влияет на температурный режим трубы и, следовательно, на температурное состояние окружающего ее грунта.

Учитывая сложность и неоднозначность условий на разных участках трассы Обская — Бованенково и отсутствие данных о динамике снегонакопления, предлагаются три варианта типизации условий:

1) труба в течение зимнего периода не заносится снегом; среднемесячная температура ее поверхности в течение года принимается равной среднемесячной температуре воздуха; в летний период вокруг трубы формируется ореол сезонного оттаивания грунта, а зимой оттаявший грунт промерзает;

2) в летний период труба остается открытой и температура в ней равна температуре воздуха; зимой она полностью заносится снегом и ее температура равна среднемесячной температуре грунта насыпи на уровне середины трубы;

3) температура поверхности трубы в течение года равна среднемесячной температуре грунта насыпи на уровне середины трубы.

Очевидно, что в реальных условиях ни один из этих вариантов не реализуется, но они характеризуют крайние случаи формирования наилучших и наихудших условий теплового и механического взаимодействия водопропускной трубы с многолетнемерзлыми грунтами.

Рассмотрим пример формирования температурного режима грунтов на участке трассы ПК 14673. Для реализации второго и третьего типовых вариантов необходимо иметь данные о среднемесячной температуре грунта насыпи на глубине расположения середины трубы. Для этого была решена задача по расчету температурного режима тела насыпи.

Конструкция насыпи железной дороги согласно проекту включает сверху вниз: земляное полотно с крутизной откосов 1:4; полуобойму из геотекстиля мощностью 0,4–0,5 м; теплоизоляционный слой в верхней части насыпи и защитный слой мощностью 0,4–0,5 м. Высота насыпи принята равной 3,0 м. Защитный слой представляет собой грунтовую массу с 70% скального грунта крупностью не более 0,15 м и 30% местного пылеватого песка. В качестве теплоизолятора используется пеноплекс толщиной 0,1 м. Полуобоймы и земляное полотно отсыпаются из местных грунтов (рис. 1).

Под насыпью залегают многолетнемерзлые грунты ненарушенного сложения со среднегодовой температурой минус 4 °С. Данные по составу и физическим свойствам грунтов, необходимые для расчета, были взяты из материалов инженерно-геологических изысканий, проведенных на исследуемом участке ООО «Инжиниринговый центр Ямал» в 2009 году, по теплофизическим свойствам (табл. 1) — из СНиП 2.02.04-88 [2].

Зная температурный режим тела насыпи, среднемесячную температуру воздуха и характер снегонакопления (которые были взяты из материалов изысканий ООО «Инжиниринговый центр Ямал» и ОАО «ПНИИИС»), можно решать задачу о динамике температурного поля грунтов на участках заложения водопропускных труб. Для поверхности трубы задавались граничные условия первого рода — значения температуры, равные средне-

Таблица 2

Среднемесячные значения температуры поверхности трубы, принятые при расчетах													
№ варианта	Температура $T$ принята равной	Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	$T$ воздуха	-20,0	-21,9	-18,9	-12,9	-5,5	2,0	7,3	6,9	3,5	-4,0	-12,6	-17,8
2	Летом $T$ воздуха, зимой $T$ насыпи	-2,4	-3,0	-5,6	-6,5	-6,2	2,0	7,3	6,9	3,5	0,1	-0,2	-0,4
3	$T$ 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

месячной температуре воздуха или грунта на глубине ее заложения.

По результатам математического моделирования были получены величины среднемесячной температуры грунта насыпи на глубине расположения центра водопропускной трубы на 10-й год эксплуатации. Значения температуры поверхности трубы для трех вариантов типизации условий, указанных выше, приведены в табл. 2.

Были рассмотрены два варианта конструктивного решения трубы:

1) для уменьшения теплового влияния трубы под ее нижней образующей укладывается слой пеноплекса толщиной 10 см (его теплофизические свойства приведены в табл. 1);

2) под нижней образующей трубы укладывается слой щебнистого грунта толщиной 10 см (коэффициент теплопроводности щебня в талом состоянии составляет 2,5 Вт/(м·°C), в мерзлом — 2,73 Вт/(м·°C);

его объемная теплопроводность в талом состоянии равна 870 Вт·ч/(м<sup>3</sup>·°C), в мерзлом — 650 Вт·ч/(м<sup>3</sup>·°C); затраты тепла на фазовые переходы составляют 7000 Вт·ч/м<sup>3</sup>).

Некоторые результаты моделирования приведены на рис. 2, 3.

Проведенные расчеты позволяют выявить некоторые закономерности. В частности, в случае, когда под трубой уложен слой теплоизоляции (см. рис. 2), в течение всего года при всех рассмотренных вариантах температурного режима в трубе оттаивания грунта под ее нижней образующей не происходит.

При циркуляции в трубе атмосферного воздуха круглогодично или только в теплый период (см. 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 начале — конце декабря и с этого момента до конца мая находится

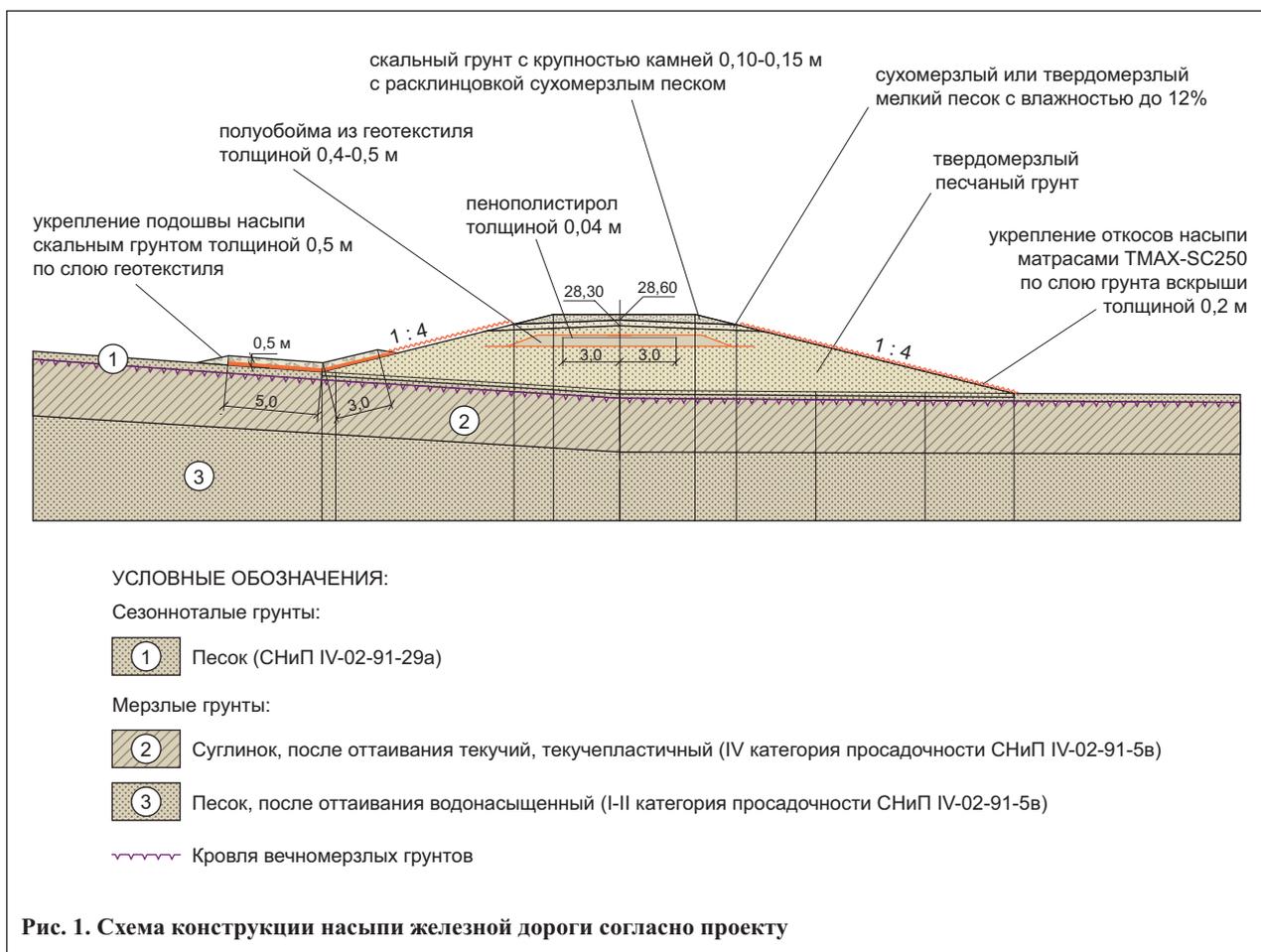


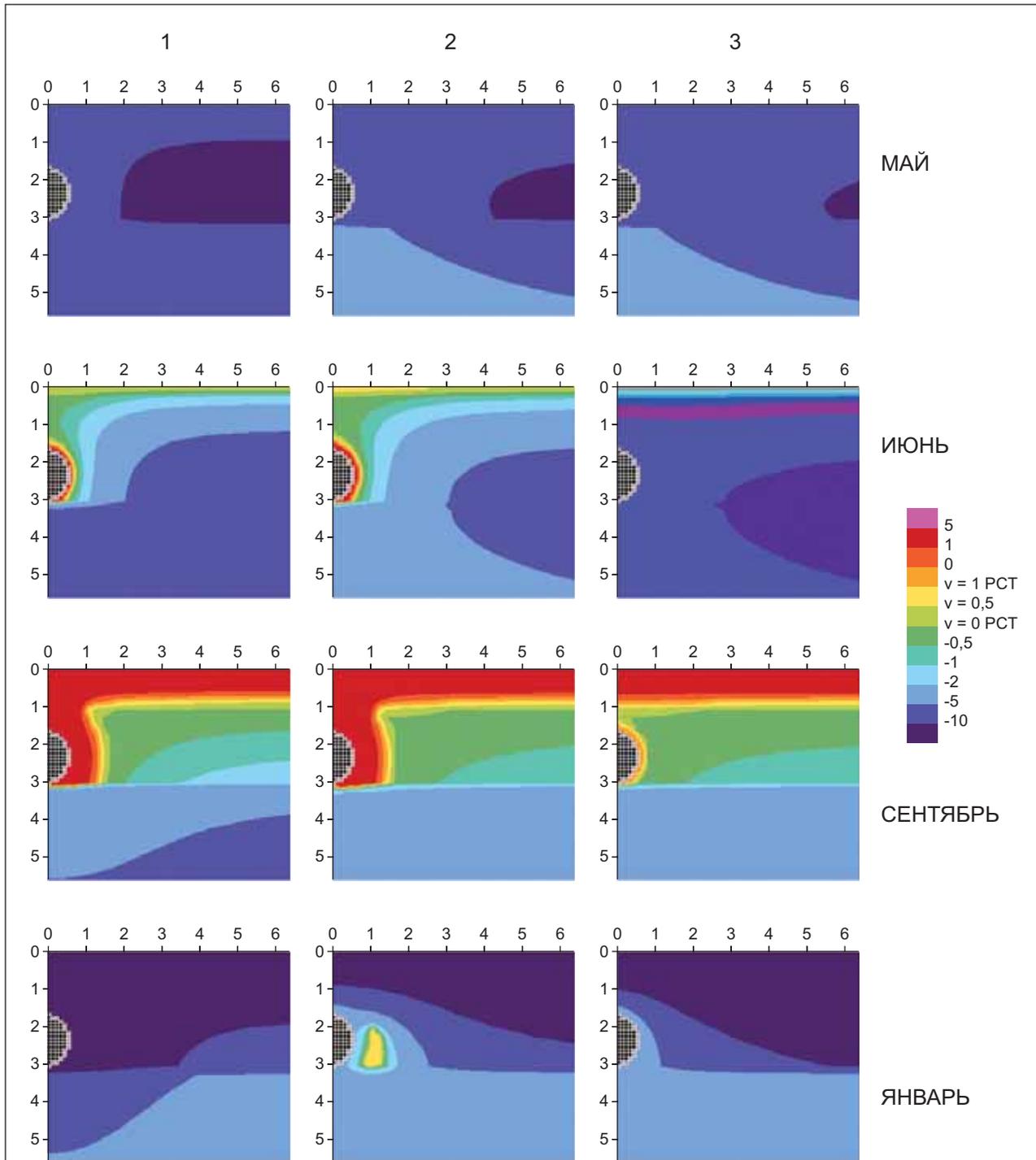
Рис. 1. Схема конструкции насыпи железной дороги согласно проекту



в мерзлом состоянии. В том случае, когда температурный режим в трубе определяется только тепловым состоянием насыпи (см. вариант 3 на рис. 2), оттаивание грунта происходит только в сентябре–октябре и не превышает 0,1 м от поверхности трубы в боковом направлении.

В случае, когда под трубой теплоизоляция отсутствует, а ее заменяет слой щебнистого грунта (см. рис. 3), в первых двух вариантах (воздух в трубе циркулирует либо круглогодично, либо только в теплый период) оттаивание

грунта также начинается в июне и заканчивается в первом случае в конце ноября, во втором — в январе. В этих вариантах, когда по трубе циркулирует воздух, сезонное оттаивание грунта в сентябре составляет около 0,7 м вертикально вниз от нижней образующей трубы. В боковом направлении величина оттаивания грунта аналогична. Если температурный режим в трубе соответствует среднемесячной температуре грунта насыпи, максимальное оттаивание не превышает 0,2 м от нижней образующей.



**Рис. 2.** Температурное поле грунтов на участке расположения водопропускной трубы ПК 14673 на 10-й год эксплуатации, под нижней образующей которой уложен слой пеноплекса: 1 — температура  $T$  на поверхности трубы равна среднемесячной  $T$  воздуха; 2 —  $T$  на поверхности трубы в летний период равна среднемесячной  $T$  воздуха, в зимний — среднемесячной  $T$  грунта в теле насыпи на уровне центра трубы; 3 —  $T$  на поверхности трубы в течение всего года равна среднемесячной  $T$  грунта в теле насыпи на уровне центра трубы

Сравнивая толщину слоев оттаявшего грунта при укладке слоя щебня или пеноплекса под водопрпускной трубой по всем вариантам, можно сделать некоторые выводы. Толщина оттаявшего слоя под трубой, под которую уложен слой щебня, значительно превышает таковую в случае укладки пеноплекса. Для первого варианта условий разница составляет около 60 см (рис. 4, *a*), для второго — 70 см (рис. 5, *a*), для третьего — 20 см (рис. 6, *a*).

Мощность талого слоя в стороне от трубы при укладке слоя щебня или пеноплекса различается незначительно (около 10 см). Для первых двух вариантов грунт оттаивает больше, если уложен теплоизолятор (рис. 4, *b*, 5, *b*), для третьего — если уложен слой щебня (рис. 6, *b*).

По результатам моделирования динамики температурного поля грунтов на участках расположения водопрпускных труб можно заключить, что для уменьше-

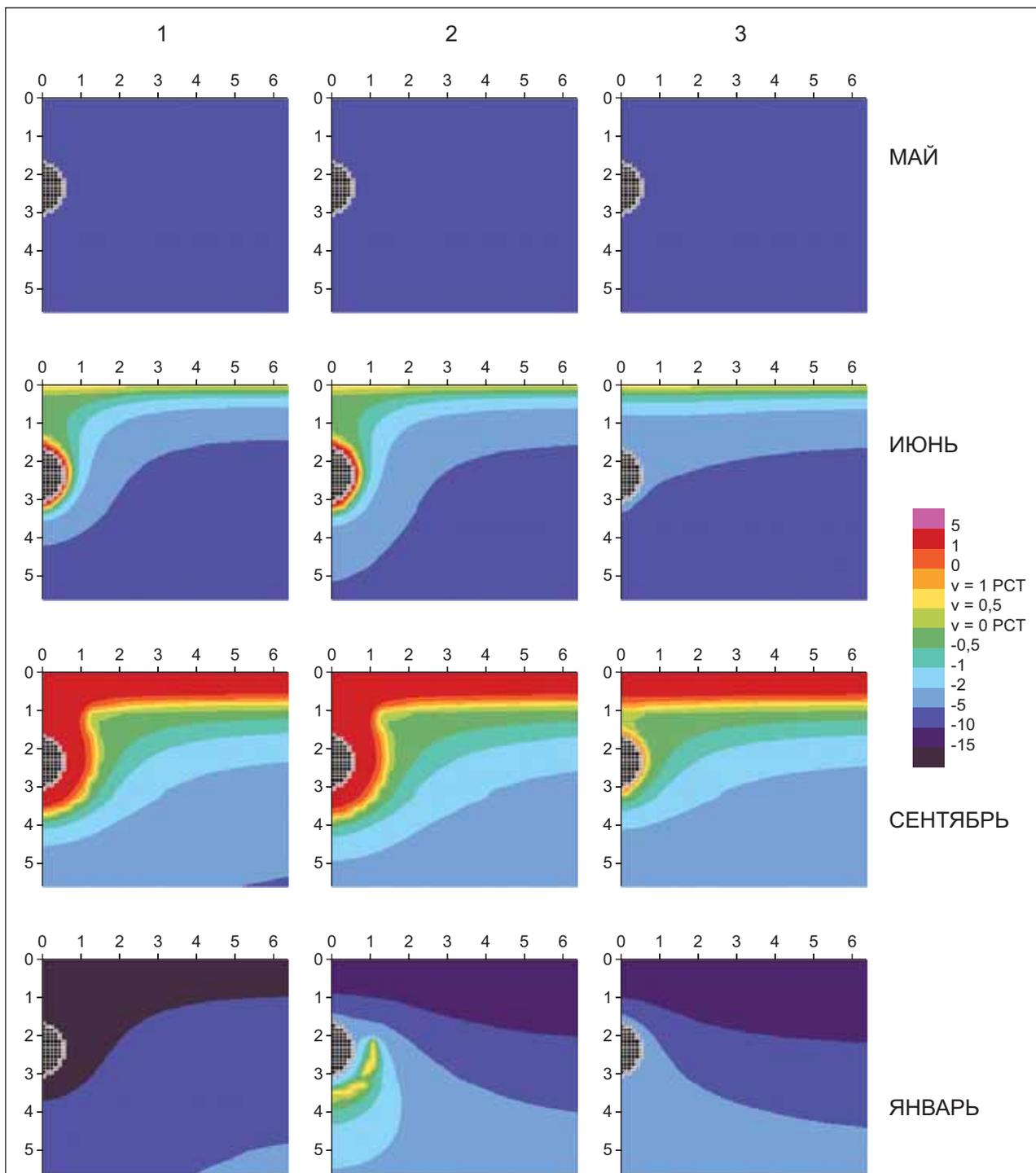
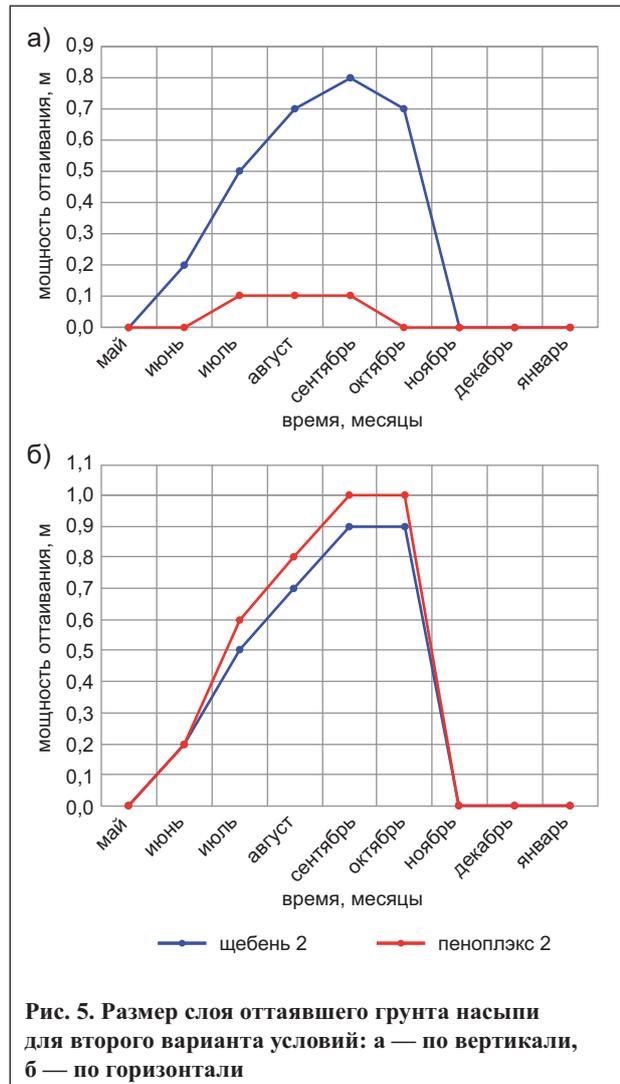
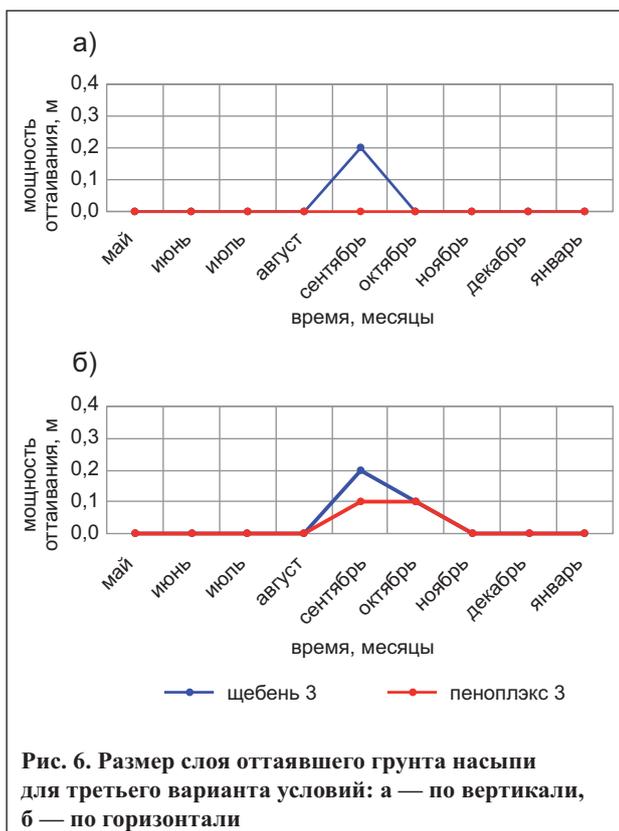
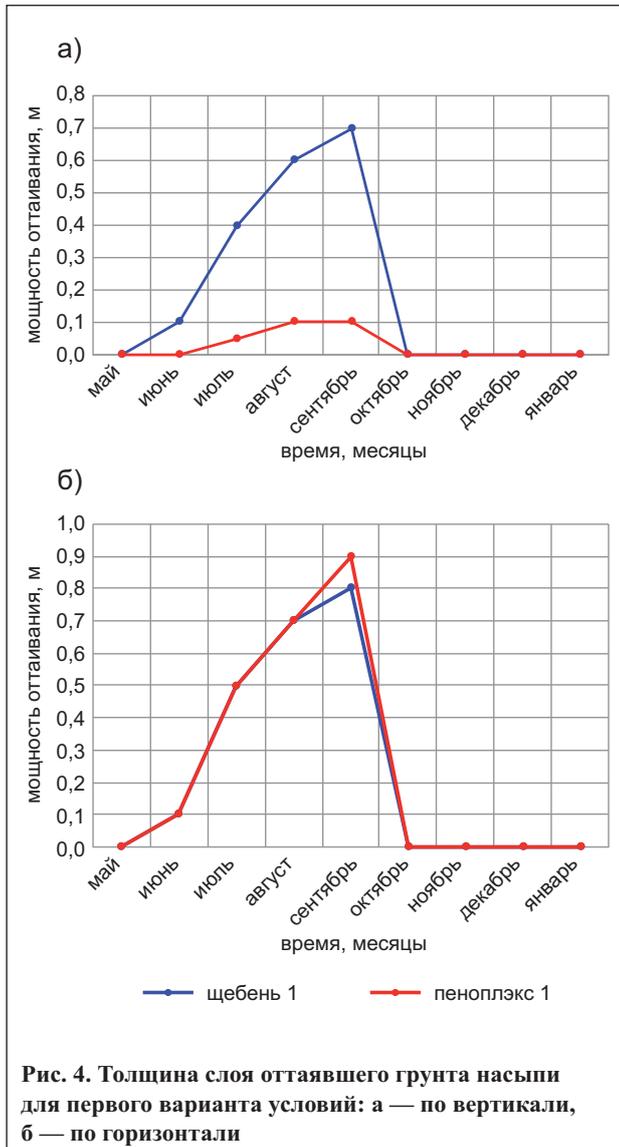


Рис. 3. Температурное поле грунтов на участке расположения водопрпускной трубы ПК 14673 на 10-й год эксплуатации, под нижней образующей которой уложен слой щебнистого грунта: 1 — температура  $T$  на поверхности трубы равна среднемесячной  $T$  воздуха; 2 —  $T$  на поверхности трубы в летний период равна среднемесячной  $T$  воздуха, в зимний период — среднемесячной  $T$  грунта в теле насыпи на уровне центра тубы; 3 —  $T$  на поверхности трубы в течение всего года равна среднемесячной  $T$  грунта в теле насыпи на уровне центра трубы



ния 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 щебня или пеноплекса различается незначительно.

Полученные результаты, несмотря на ряд допущений и упрощений, принятых при построении расчетной модели, позволяют обоснованно перейти к выбору рациональных конструктивных решений системы «водопротекная труба — земляное полотно» при строительстве железных дорог в сложных геокриологических условиях.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. 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.
2. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Госстрой СССР, 1990.
3. Хрусталев Л.Н., Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Яковлев С.В. Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами WARM / Свидетельство № 940281. СПб.: РосАПО, 1994.
4. Ma W., Cheng G., Wu Q. Construction on permafrost foundations: lessons learned from the Qinghai — Tibet railroad // Cold Regions Science and Technology. 2009. № 59. P. 3–11.