

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ОБВОДНЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ МЕРЗЛОГО ОСНОВАНИЯ НАСЫПНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Я.Б. Горелик^{1,*}, И.В. Земеров¹, А.Х. Хабитов²

¹Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625000, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия

²ПАО «Гипротюменнефтегаз», 625000, Тюмень, ул. Республики, 62, Россия

*Автор для контакта, gorelik@ikz.ru

Изложены исходные посылки прогнозной модели изменения температурного режима массива мерзлых грунтов при обводнении его поверхности. Теплообмен поверхности грунта с атмосферой через водный покров небольшой глубины (до 1 м) описывается эффективным коэффициентом теплообмена, который учитывает интенсивность перемешивания водного слоя в летнее время. Приведены результаты расчета двух параметров нового термического состояния мерзлого массива (температуры на глубине нулевых годовых амплитуд и максимальной глубины сезонного протаивания), возникающего в результате обводнения. Выполнен также анализ скорости перехода к новому состоянию. Показано, что при интенсивном перемешивании водного слоя в летнее время происходит существенное отопление грунтов основания. При отсутствии перемешивания для малых глубин водоема возможно его охлаждающее действие, которое для более глубоких водоемов сменяется отоплением, более слабым, чем в случае перемешивания. Этот анализ выполнен для наименее изученного элемента природно-технической системы «насыпь–водоем–мерзлое основание» с целью контроля корректности расчетной процедуры в более сложном случае двумерного процесса. Приведены результаты численного моделирования динамики температурного поля в мерзлом основании насыпи дорожного полотна при наличии неглубокого водоема вблизи одного из ее откосов. При интенсивном перемешивании водного слоя в летнее время происходит значительное отопление основания насыпи и откосов. Если же процесс перемешивания исключен каким-либо способом, то начальное температурное состояние в основании дороги может быть сохранено в течение всего срока ее эксплуатации. Предложены достаточно простые технические способы устранения процесса перемешивания водного слоя.

Ключевые слова: мерзлый грунт, сезонное оттаивание, подошва деятельного слоя, глубина нулевых годовых амплитуд, поверхностный водоем, дорожное полотно.

Ссылка для цитирования: Горелик Я.Б., Земеров И.В., Хабитов А.Х. Предотвращение негативного влияния обводнения на температурный режим мерзлого основания насыпных сооружений // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 2, с. 32–44. DOI: 10.15372/KZ20230204.

PREVENTION OF THE NEGATIVE IMPACT OF FLOODING ON THE TEMPERATURE REGIME OF THE FROZEN BASE OF ROAD EMBANKMENTS

J.B. Gorelik^{1,*}, I.V. Zemerov¹, A.K. Khabitov²

¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Malygina str. 86, Tyumen, 625000, Russia

² PJSC «Giprotymenneftegaz», str. Respubliki 62, Tyumen, 625000, Russia

*Corresponding author, gorelik@ikz.ru

The article presents the initial assumptions of the predictive model of changes in the temperature regime of the frozen soil massif in the case of surface flooding. Heat exchange of the soil surface with the atmosphere through a shallow (up to 1 m) water cover is described using an effective heat exchange coefficient, which includes the intensity of mixing of the water layer during the summer season. The results of calculation of two parameters of the new thermal condition of the frozen massif (temperature at a depth of zero annual amplitude and the maximum depth of seasonal thawing) appearing as a result of flooding are presented. In addition, the rate of transformation to the new condition is considered. Significant warming of the frozen foundation soil occurs in the case of intense mixing of the water layer during the summer season. If the mixing process does not take place in the water reservoir of a shallow depth, its cooling effect is possible. In deeper reservoirs, the warming effect is possible, but it is weaker than that under mixing conditions. This analysis has been performed for the least studied element of the “roadway embankment – reservoir – frozen soil” technical system in order to control the correctness of the calculation procedure in a more complex case for a two-dimensional process. The results of mathematical modeling of the temperature field in the frozen base of the roadway in contact with shallow water basin are presented. It is demonstrated that the frozen base warms up essentially, if the water layer is intermixed intensively (by wind) in summer time. The initial temperature state may be preserved during the whole period of road exploitation, if the summer mixing of water is blocked by fairly simple technical measures that are proposed in this paper.

Keywords: frozen ground, seasonal thawing, depth of seasonal thaw penetration, depth of zero annual amplitude of temperatures, surface water reservoir, roadbed.

ВВЕДЕНИЕ

При строительстве в районах распространения многолетнемерзлых грунтов часто наблюдается образование мелких водоемов (глубиной до 1 м), длительное время контактирующих с откосами насыпных сооружений и оказывающих неконтролируемое тепловое воздействие на грунты мерзлого основания [Воронцов и др., 2014; Гребенец, Исаков, 2016; Кондратьев, 2016; Дыдышко, 2017]. Их возникновение может быть связано с изменением природных факторов или с недостатками проектирования водоотводных и водопропускных конструкций вдоль насыпных сооружений. Основным техническим мероприятием по устранению негативного влияния обводнения в настоящее время являются специальные водоотводные решения и ремонтно-восстановительные работы уже существующих конструкций либо строительство новых. При этом эффективность этих работ оказывается низкой и требует дополнительных мероприятий по укреплению основания [Андрянов, 2011; Литовко, 2011]. В итоге этот способ устранения негативного влияния обводнения оказывается малоэффективным и трудозатратным.

Сегодня фактически остаются нерешенными вопросы оценки и прогноза влияния таких водоемов на температурный режим мерзлого основания насыпных сооружений, практическое значение которых для обеспечения их устойчивости, является весьма важным. Целью настоящей работы является создание адекватного метода прогноза последствий влияния неглубокого водоема на температурный режим мерзлого основания насыпного сооружения, установление на этой основе наиболее важных факторов, определяющих интенсивность негативного влияния, и оценка возможных предложений по его устранению.

ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРЕДЛАГАЕМОЙ ПРОГНОЗНОЙ МОДЕЛИ

Прогноз изменения температурного режима мерзлых грунтов при любых нарушениях условий теплообмена с окружающей средой должен дать ответ на два основных вопроса: а) каковы будут значения параметров нового устойчивого состояния грунтов, возникающего после воздействия возмущающих факторов; б) каково характерное время достижения нового устойчивого состояния грунтов.

Отдельные элементы насыпи и насыпь в целом могут оказывать как охлаждающее, так и тепляющее воздействие на основание [Ашпиз и др., 2008; Ашпиз, Хрусталева, 2013; Чжан и др., 2018]. Влияние водоема на мерзлое основание также носит сложный характер и заранее неизвестно. Для корректной постановки математической задачи по расчету температурного режима мерзлого основа-

ния насыпи дорожного полотна (этот тип насыпного сооружения рассматривается ниже в качестве примера), контактирующей с водоемом, целесообразно прежде всего выяснить характер раздельного (т. е. не зависящего от насыпи) влияния водоема на подстилающие грунты мерзлого основания. Определенный шаг при решении этой части проблемы сделан в работе [Горелик, Земеров, 2020].

Определение нового термического состояния грунтов при возникновении водного покрова

В полной постановке задачи о влиянии водоема наиболее важным является граничное условие, описывающее теплообмен верхней поверхности массива грунта с атмосферой через водный покров, и дополнительные соотношения к нему. Обычно оно записывается в виде граничного условия 3-го рода. Однако необходимо отметить, что точная запись этого соотношения предполагает разделение теплового потока на радиационную и конвективную составляющие с заданием способа их определения, что существенно усложняет процедуру расчета, а в практическом плане часто невыполнимо в силу сложности проведения актинометрических определений, учитывающих действие локальных факторов конкретного участка местности [Павлов, 1965]. Поэтому в практических задачах радиационная составляющая, как правило, не учитывается, а граничное условие имеет вид

$$\alpha(t_a - t) = -\lambda(dt/dz)_{z=0}. \quad (1)$$

Это условие должно быть дополнено следующими соотношениями:

$$\alpha_{ss} = \left(\alpha_s^{-1} + \frac{h}{\lambda_{ef}} \right)^{-1}; \quad (2)$$

$$\alpha_{ww} = \left(\alpha_w^{-1} + \frac{h}{\lambda_i} \right)^{-1}; \quad (3)$$

$$\int_0^{\tau_h} t_a(\tau) d\tau = \frac{h\kappa_v}{\alpha_s}; \quad (4)$$

$$\int_0^{\tau_i} t_a(\tau) d\tau = - \left[\kappa_v h \left(h + \frac{2\lambda_i}{\alpha_w} \right) \right] / 2\lambda_i. \quad (5)$$

Здесь t , $t_a(\tau)$ – температура поверхности грунта и зависящая от времени τ температура воздуха в годовом цикле; α – коэффициент теплообмена верхней границы массива с атмосферой, зависимость которого от сезона кусочно-постоянная; α_s , α_w – усредненные по времени летний и зимний коэффициенты теплообмена, определенные без учета влияния водоема (т. е. в состоянии до его возникновения); α_{ss} – летний коэффициент теплообмена после образования водоема, определяемый через толщину водного слоя h и его эффективный коэффициент теплопроводности λ_{ef} , который учитывает характер перемешивания воды (диапазон

его возможного изменения: $\lambda_w \leq \lambda_{ef} \leq \infty$, где $\lambda_w = 0.5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ – кондуктивная теплопроводность воды); α_{ww} – зимний коэффициент теплообмена после возникновения водоема, определяемый аналогично летнему коэффициенту через коэффициент теплопроводности льда ($\lambda_i = 2.2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$). Коэффициент теплопроводности грунта λ в (1) также принимает кусочно-постоянные (сезонные) значения: λ_u – в талом состоянии, λ_f – в мерзлом. Соотношения (4) и (5) определяют время оттаивания слоя льда τ_h с наступлением летнего сезона и время замерзания водного слоя τ_i с наступлением зимы (с учетом предпосылок, сформулированных в [Горелик, Земеров, 2020]); κ_v – объемная теплота фазового перехода вода–лед. В рассматриваемых ниже примерах температура воздуха $t_a(\tau)$ принимается по метеостанции Уренгой (см. таблицу).

Среднегодовые температуры на подошве слоя сезонного оттаивания (t_m) и на глубине годовых нулевых амплитуд (t_0) определяются усреднением зависящих от времени температур $t_m(\tau)$ и $t_0(\tau)$ на соответствующих уровнях согласно соотношениям

$$t_m = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} t_m(\tau) d\tau, \quad t_0 = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} t_0(\tau) d\tau \quad (6)$$

(глубина годовых нулевых амплитуд z_0 принимается равной 12 м; τ_0 – год).

В процедуре расчета температурного поля грунта в периоды таяния и промерзания водного слоя (длительность которых составляет определенную часть летнего и зимнего сезонов) на контакте воды с дном водоема температура принимается равной 0°С [Горелик, Земеров, 2020]. Таким образом, при наличии водоема на поверхности массива мерзлого грунта процессы сезонного промерзания–протаивания в его верхних слоях и динамика температуры ниже подошвы слоя сезонного оттаивания вне интервалов времени промерзания и оттаивания собственно водоема в общей постановке математической задачи описываются соотношениями (1)–(3) для соответствующих сезонов, а в период промерзания или протаивания водного слоя на верхней границе массива грунта (совпадающей с поверхностью дна водоема) ис-

пользуется граничное условие 1-го рода (с температурой 0°С на его поверхности). Заметим, что в установившихся условиях теплообмена температуры t_m и t_0 совпадают [Карслоу, Егер, 1964; Достовалов, Кудрявцев, 1967; Тихонов, Самарский, 1972].

Во всех приведенных ниже примерах расчетов приняты следующие характеристики грунтов и начальных условий (индекс u относится к талому грунту, f – к мерзлому): теплоемкость ($\text{Дж}/(\text{м}^3\cdot^\circ\text{С})$): $C_u = 2.86\cdot 10^6$, $C_f = 2.20\cdot 10^6$; коэффициенты теплопроводности грунта ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$): $\lambda_u = 1.76$, $\lambda_f = 2.10$; коэффициенты теплопроводности воды и льда $\lambda_w = 0.5$, $\lambda_i = 2.2$; объемный вес скелета $\gamma_s = 1500 \text{ кг}/\text{м}^3$; температуропроводность $\mu_f = 9.55\cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; весовая влажность $w = 0.2$; начальная температура на глубине нулевых годовых амплитуд в невозмущенном массиве $t_0 = -2.0^\circ\text{С}$.

Соотношения (2)–(5) в явном виде выделяют вклад только водного покрова в теплообмен с поверхностью грунта. Однако надо помнить, что даже для невозмущенных условий коэффициент α в своих сезонных составляющих α_s , α_w неявным образом зависит от значительного числа влияющих факторов, имеющих физико-географическую, климатическую и геологическую природу. Влияние всей совокупности этих факторов в рассматриваемой задаче установить сложно, а выделить преобладающее влияние минимального их числа часто вообще невозможно. Для решения этой проблемы в работе [Горелик, Паздерин, 2017] предложен способ определения коэффициентов α_s , α_w по эмпирическим данным, получаемым при инженерных изысканиях, которые содержат фактическую информацию о максимальной глубине сезонного протаивания (ξ_m) и температуре на глубине годовых нулевых амплитуд (t_0) (еще лучше для этих целей использовать материалы мониторинговых наблюдений, тогда для указанных величин принимаются среднемноголетние значения). Определенные этим способом коэффициенты неявным образом учитывают действие всей группы влияющих факторов и обеспечивают неизменность величин ξ_m и t_0 (в области вне контура сооружения) на протяжении всего срока эксплуатации сооружений (как правило, не менее 30 лет) при условии постоянства внешних условий. При этом для прогноза влияния сооружения на мерзлые грунты тепловое воздействие самого сооружения рассматривается отдельно в явном виде (так же как это сделано для водоема).

Для приведенных выше характеристик грунтов и температуры воздуха таким способом получены значения коэффициентов для невозмущенного массива грунта ($\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{С})$): $\alpha_s = 17.5$, $\alpha_w = 1.02$. Как видно на рис. 1, эти значения коэффициентов обеспечивают постоянство величин $\xi_m = 1.7 \text{ м}$ (определяется по точке излома темпера-

Среднемесячные температуры воздуха для района метеостанции Уренгой

Месяц	Средняя температура воздуха, $^\circ\text{С}$	Месяц	Средняя температура воздуха, $^\circ\text{С}$
Январь	-26.4	Июль	15.4
Февраль	-26.4	Август	11.3
Март	-19.2	Сентябрь	5.2
Апрель	-10.3	Октябрь	-6.3
Май	-2.6	Ноябрь	-18.2
Июнь	8.4	Декабрь	-24.0

туры на соответствующих кривых) и $t_0 = -2^\circ\text{C}$ в течение 30 лет циклически повторяющихся сезонных колебаний температуры. Важно, что это состояние грунта при использовании численных методов принимается также в качестве начального условия в задачах о нахождении температурного поля в грунте при поверхностных нарушениях любой природы. При таком способе задания коэффициентов α_s , α_w и согласованного с ними начального условия исключается систематическая ошибка вычислений, связанная с “необоснованным влиянием” грунтового массива вне зоны поверхностных нарушений на результаты расчета.

Отметим, что в некоторых работах постоянство температуры t_0 на весь срок эксплуатации сооружения обеспечивается специальным подбором динамики высоты снежного покрова в течение этого срока. По нашему мнению, такой подход имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что для прогноза температуры в основании грунтового массива используется дополнительный прогноз, который не имеет никакого фактического обоснования. Его противоречивость видна на примере отсутствия тренда климатических изменений в течение рассматриваемого срока. В этом случае отсутствуют причины для изменения среднееголетних значений любого из кли-

матических параметров (в частности, снегонакопления), и они должны быть приняты постоянными во времени. При этом практически невозможно осуществить подбор сезонных коэффициентов теплообмена (на основании, например, известных соотношений по скорости ветра и данных местных метеостанций), обеспечивающих постоянство температуры t_0 в течение заданного срока. Это может привести к значительным погрешностям при выполнении количественного прогноза теплового воздействия сооружений на мерзлое основание. Предлагаемый авторами подход основан только на фактических данных (определяемых среднееголетними значениями величин ξ_m и t_0 , в которых неявно отражается действие всей совокупности влияющих факторов, включая снежный покров), он свободен от указанного недостатка. Модификация этого подхода может быть применена для прогноза температуры в грунтовом массиве и в случае возникновения тренда климатических изменений [Горелик, Земеров, 2022].

С использованием соотношений (1)–(6) в работе [Горелик, Земеров, 2020] получены зависимости новой установившейся температуры на глубине нулевых годовых амплитуд t_0 от глубины водоема в двух предельных случаях по условиям перемешивания водного слоя (рис. 2). Результаты

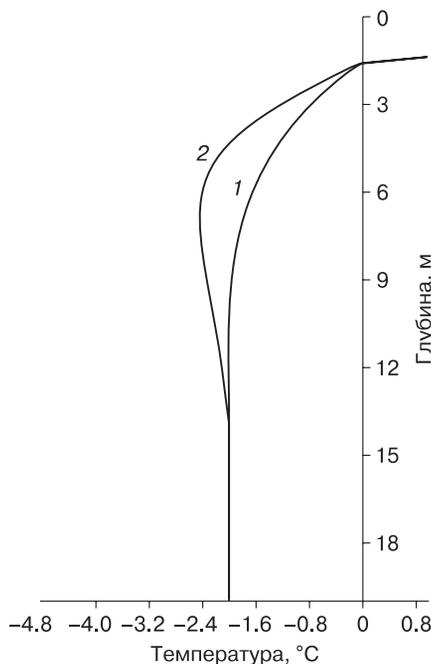


Рис. 1. Расчетное распределение температуры по глубине массива грунта в условиях естественного теплообмена в течение первого года (1) и завершающего расчетного года (2) при $\alpha_s = 17.5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $\alpha_w = 1.02 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

1 – 01.06.2000–01.06.2001; 2 – 01.06.2031–01.06.2032.

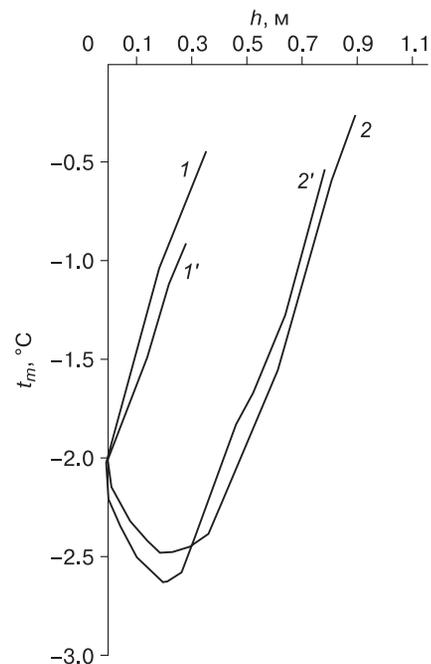


Рис. 2. Зависимость среднегодовой температуры на глубине нулевых годовых амплитуд под водоемом (t_m) от его глубины h в режиме установившихся колебаний:

1, 1' – при полном перемешивании ($\lambda_{ef} \rightarrow \infty$); 2, 2' – при отсутствии перемешивания ($\lambda_{ef} = \lambda_w$); 1, 2 – расчет численным методом; 1', 2' – расчет аналитическим методом.

получены двумя независимыми способами – аналитическим (кривые 1', 2') и численным (кривые 1, 2). При необходимости можно провести дополнительные расчеты при промежуточных значениях коэффициента λ_{ef} . Если же применяется достаточно надежный способ предотвращения перемешивания, то необходимость в таких расчетах отпадает.

Важные особенности поведения новой установившейся температуры t_0 тесно связаны с двумя характеристиками водного слоя – его глубиной и интенсивностью перемешивания в летнее время. При интенсивном перемешивании (за счет ветрового воздействия и естественно-конвективного движения) температура грунта монотонно растет с увеличением глубины водоема (см. рис. 2, кривые 1, 1'). Если же в летнее время возникают условия, препятствующие перемешиванию водного слоя, то существует диапазон глубин, при которых слой воды оказывает охлаждающее влияние на подстилающие грунты (см. рис. 2, кривые 2, 2'). При анализе графиков следует иметь в виду, что точка $h = 0$, $t_0 = -2$ °С характеризует состояние мерзлого грунта в отсутствие водоема, она одинакова для обеих пар кривых 1, 1' и 2, 2' на рис. 2. Поэтому обе пары имеют на графиках указанную выше общую начальную точку. Неординарное поведение температуры на рис. 2 при отсутствии перемешивания обусловлено разнонаправленным влиянием глубины водоема на время промерзания донных отложений и на длительность охлаждающего импульса в зимнее время. Величина сезонного протаивания монотонно уменьшается с увеличением глубины водоема, что при малых глубинах способствует уменьшению времени его промерзания зимой (и увеличивает длительность охлаждающего импульса). Однако, начиная с некоторой глубины, решающее влияние начинает оказывать длительность промерзания водного слоя (в первом приближении пропорциональная квадрату его глубины), что приводит к сокращению длительности охлаждающего импульса и повышению температуры грунта [Горелик, Земеров, 2020]. При этом можно видеть, что и в диапазоне глубин, где происходит разогрев грунта при отсутствии перемешивания ($h > 0.5$ м), температура грунта остается существенно ниже, чем при перемешивании воды.

Условия, препятствующие перемешиванию, могут возникать по естественным причинам (например, при зарастании водоема или его заиливании и обогащении органоминеральным веществом, привносимым ветровым путем или сплывами со склонов). Этим объясняются известные факты затухания процесса термокарста при зарастании термокарстовых озер на начальной стадии развития этого процесса (что соответствует снижению теплового потока в льдистое основание) или охлаждающего влияния заболоченных участ-

ков (включающих значительную долю органоминерального компонента) на температурный режим подстилающих грунтов [Достовалов, Кудрявцев, 1967; Общее мерзлотоведение, 1978; Фельдман, 1984; Шур, 1988]. Предотвратить перемешивание неглубокого водоема в летнее время года возможно и чисто техническими средствами [Способ..., 2021]. Для этого применяются: а) искусственный засев болотными травами (в отличие от засева откосов полевыми видами для их укрепления); б) подсыпка органоминерального материала в необходимом количестве (например, заторфованного грунта или торфа); в) размещение в этой зоне специальных легких сетчатых (или ячеистых) конструкций (например, в виде матов из тонких пластмассовых нитей или натуральных волокон). При необходимости маты могут быть прикреплены ко дну водоема анкерными штырями. Возможно применение различных сочетаний указанных способов.

Основными требованиями к заполняющему водоем материалу являются достаточно высокая влагоемкость (обеспечивающая необходимые затраты тепла на оттаивание в летнее время) и образование в воде жесткой или вязкой структуры, препятствующей перемешиванию воды под действием ветра и естественной конвекции.

Вышесказанное позволяет выделить следующие основные моменты: наиболее существенными факторами, определяющими тепловое воздействие водоема на подстилающие мерзлые грунты, являются глубина водоема и интенсивность перемешивания водного слоя в летнее время года. Уменьшение негативного влияния возможно путем исключения или снижения до минимума возможности перемешивания водного слоя в летний сезон. Способ определения нового термического состояния грунтов при обводнении поверхности заключается в использовании соотношений (1)–(6) при математическом описании процесса теплообмена мерзлого грунта с атмосферой через водный слой (для предварительного анализа могут быть использованы результаты расчета, представленные на рис. 2).

Время релаксации к новому состоянию

Время перехода τ_f температуры грунтов t_0 к новому устойчивому состоянию, соответствующему новому значению t_m при возникновении водоема, определяется приближенным методом по формуле [Горелик, Земеров, 2020]:

$$\tau_f = \frac{z_0^2}{12\mu_f(1-\sqrt{1-n})^2}, \quad \Delta t = t_0 - t_m, \quad \delta t = t_f - t_m, \quad n = |\delta t / \Delta t|. \quad (7)$$

Ввиду того что время релаксации от температуры t_0 к значению t_m является, вообще говоря,

бесконечным [Карслоу, Егер, 1964; Тихонов, Самарский, 1972], вводится вспомогательная (промежуточная) температура t_f , достаточная для достижения инженерных целей, но несколько отличающаяся от t_m . Из формулы (7) следует, что при $t_f = t_m$ получим $n = 0$, а время τ_f обращается в бесконечность. Достижение температуры t_f происходит за конечное время τ_f , которое является функцией этой температуры. Ранее эта формула применялась также для оценки времени релаксации при специальных поверхностных способах охлаждения основания в работах [Горелик, Хабитов, 2021; Горелик и др., 2021].

На момент публикации работы [Горелик, Земеров, 2020] авторы не имели возможности сопоставить результаты расчета по формуле (7) с

результатами вычислений численными методами. Ниже такое сравнение приводится для некоторых важных случаев (рис. 3). На рис. 3, а представлены результаты вычислений численными методами изменения во времени температуры на подошве слоя сезонного протаивания и на глубине нулевых амплитуд при возникновении на поверхности грунтового массива водоема глубиной $h = 0.3$ м без возможности перемешивания водного слоя ($t_0 = -2$ °С, $t_m = -2.6$ °С). Видно, что температура на глубине z_0 достигает значения $t_f = -2.3$ °С через $\tau_f = 5$ лет, а при $t_f = -2.4$ °С – через $\tau_f = 10$ лет. Соответствующие значения по формуле (7): $\tau_f = 3.2$ и 8.2 лет. Для случая перемешивания слоя при $h = 0.3$ м результаты численных расчетов приведены на рис. 3, б ($t_0 = -2$ °С, $t_m = -0$ °С). Разогрев

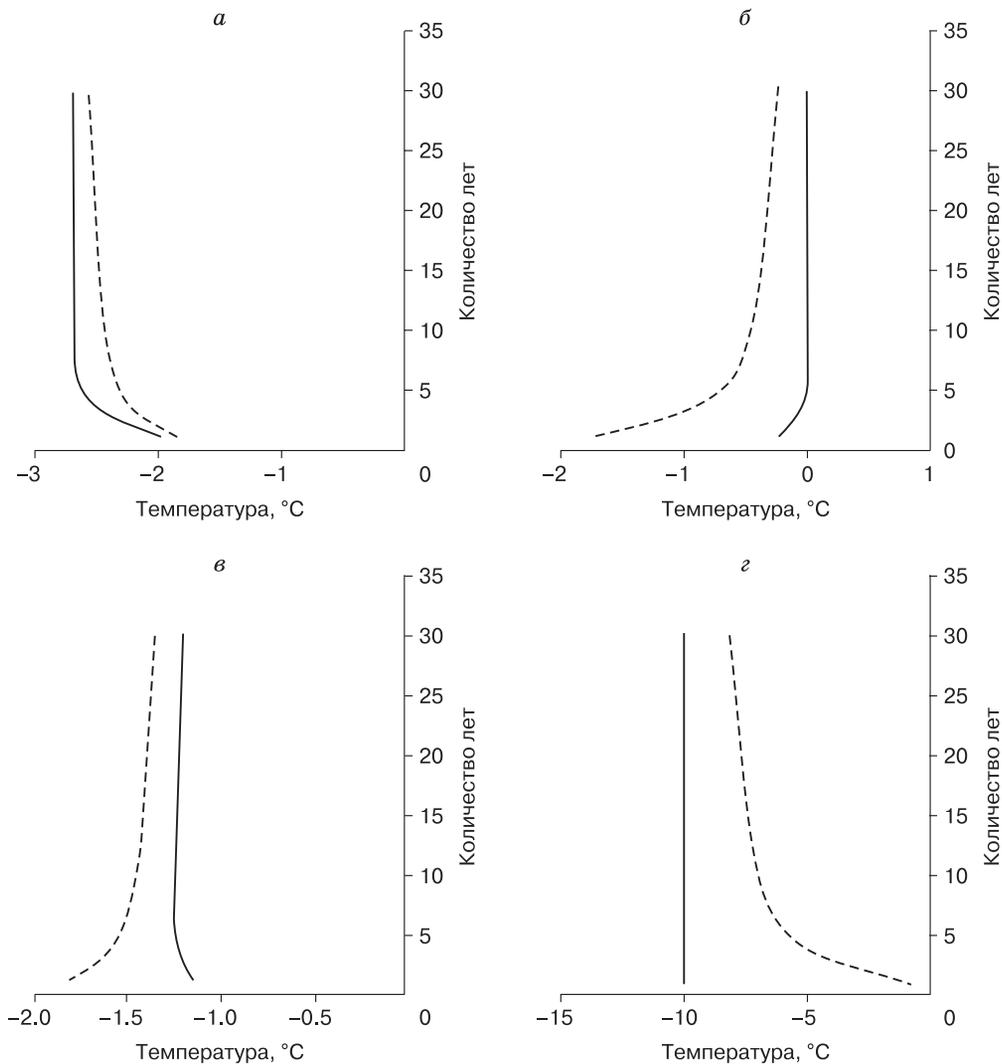


Рис. 3. Ход среднегодовой температуры на подошве слоя сезонного протаивания (сплошная линия) и на глубине годовых нулевых амплитуд (штриховая):

а, б – $h = 0.3$ м без перемешивания водного слоя летом (а) и с его перемешиванием летом (б); в – $h = 0.6$ м без перемешивания водного слоя летом; г – при применении специальных технических мероприятий, обеспечивающих низкую среднегодовую температуру на подошве слоя сезонного протаивания.

грунта до значения, например, $t_f = -0.5^\circ\text{C}$ происходит за время $\tau_f = 10$ лет, а по формуле (7) получим $\tau_f = 15$ лет. Динамика обеих температур для $h = 0.6$ м без перемешивания (но при котором также происходит процесс отепления, см. рис. 2) приведена на рис. 3, в ($t_0 = -2^\circ\text{C}$, $t_m = -1.24^\circ\text{C}$). В этом случае время релаксации до значения $t_f = -1.5^\circ\text{C}$ равно $\tau_f = 7.5$ лет, а по формуле (7) $\tau_f = 7.8$ лет.

В случае, когда с помощью специальных технических средств температура на подошве слоя сезонного оттаивания поддерживается весьма низкой (см. рис. 3, з, $t_0 = -2^\circ\text{C}$, $t_m = -10^\circ\text{C}$), понижение температуры на один градус на глубине z_0 ($t_f = -3^\circ\text{C}$) достигается весьма быстро (примерно за один год), что подтверждается расчетом как численным методом, так и по формуле (7). По графикам можно также контролировать корректность выполнения вычислительной процедуры: штриховая кривая должна асимптотически приближаться к сплошной линии при $\tau_f \rightarrow \infty$; при возмущениях на поверхности грунта охлаждающего характера сплошная кривая должна лежать левее штриховой, и наоборот. В целом можно утверждать, что несмотря на недостаточную точность, формула (7) может быть использована для предварительных оценок. Ее преимущество заключается в простоте вычислений, а процедура ее вывода позволяет понять физику происходящих процессов. В то же время численные методы не только являются более точными и позволяют учитывать зависимость внешних факторов от координат и времени, но и дают возможность получить гораздо более полную информацию о пространственных характеристиках температурного поля и его динамике в случаях, когда размерность расчетной области превышает единицу. В исследованиях

динамики температурного поля при поверхностных нарушениях оба метода полезны и дополняют друг друга.

Вместе с тем в течение каждого года происходит изменение температуры на каждом из двух рассматриваемых уровней, которое носит характер почти периодических изменений в течение 30-летнего временного цикла. Так, поведение температуры на подошве слоя сезонного оттаивания в течение 1-го, 5, 15 и 30-го годов после возникновения водоема показаны на рис. 4, а, на глубине нулевых годовых амплитуд – на рис. 4, б. Среднегодовые значения температуры на этих уровнях, полученные по формулам (6), отражаются в соответствующих точках кривых рис. 4, б. Можно отметить, что при заметном количественном изменении температуры на глубине z_0 ее поведение на подошве деятельного слоя, спустя короткий начальный участок, остается практически неизменным в течение 30-летнего периода, что отражается в почти постоянном значении среднегодовой температуры (см. рис. 3, а). То есть на уровне ξ_m устойчивое значение новой температуры достигается весьма быстро (время релаксации не превышает 5 лет). Небольшое повышение этой температуры (в пределах 0.1°C за 30 лет) на рис. 3, в, вероятнее всего, связано с недостаточной точностью вычислений и будет проанализировано в дальнейших исследованиях. При этом величина ξ_m изменяется слабо: $\xi_m = 0.59$ м при $\tau = 1$ год, $\xi_m = 0.57$ м при $\tau = 30$ лет.

На уровне ξ_m отличия в динамике температуры в течение каждого года носят размытый характер, но ощутимы в среднегодовом выражении, что отражено в поведении начального участка сплошных кривых на рис. 3. Из положения кривых на

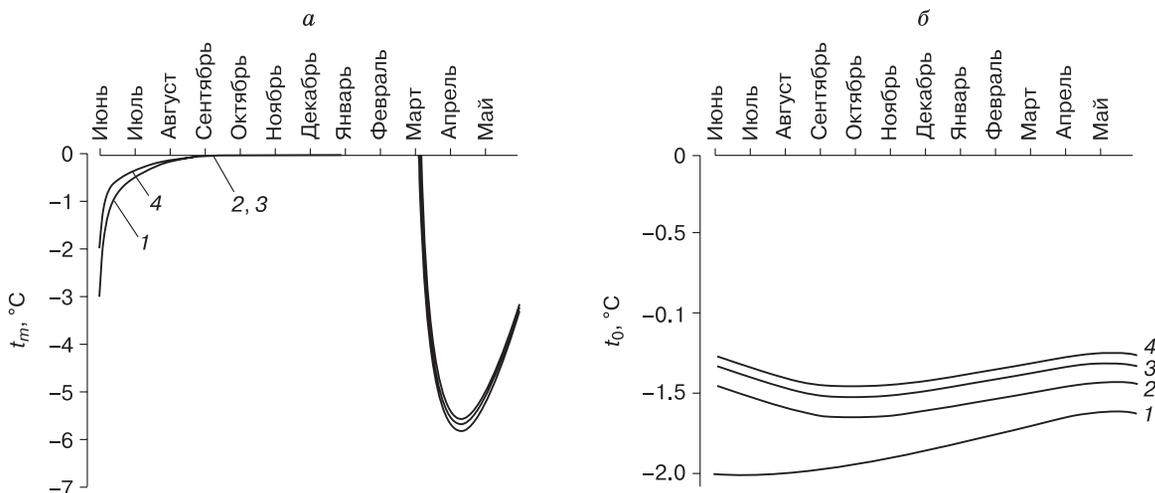


Рис. 4. Изменение температуры на подошве слоя сезонного протаивания t_m (а) и на глубине нулевых годовых амплитуд t_0 (б) в течение расчетных лет:

1 – 1-й год; 2 – 5-й год; 3 – 15-й год; 4 – 30-й год.

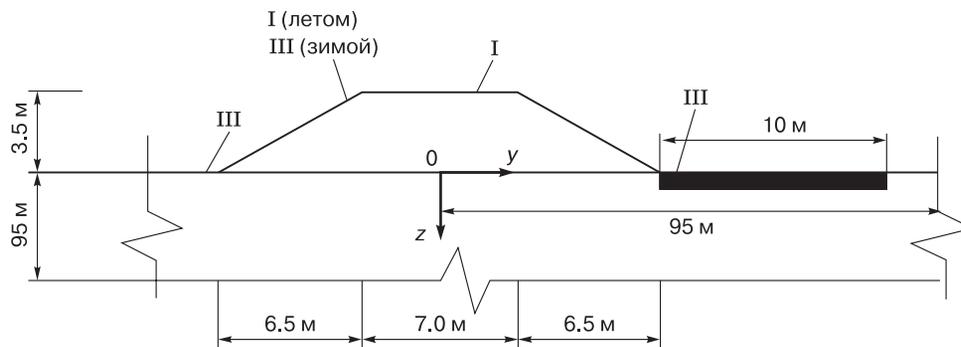


Рис. 5. Геометрические параметры расчетной области и вид граничных условий на ограничивающих ее элементах.

I, III – граничные условия 1-го и 3-го рода соответственно. Пояснения в тексте.

рис. 3 следует, что значение среднегодовой температуры на подошве деятельного слоя является главной причиной изменения температуры на глубине нулевых годовых амплитуд, что ранее отмечалось в ряде работ [Общее мерзлотоведение, 1978; Порхаев, 1970; Фельдман, 1984; Горелик, Земеров, 2020, 2022]. Нечеткость проявления изменения среднегодовой температуры на уровне подошвы деятельного слоя может способствовать выработке адекватных критериев для определения точности измерений температуры в пределах деятельного слоя при мониторинговых исследованиях.

Анализ кривых на рис. 3–5 является весьма полезным с точки зрения количественной оценки влияния различных типов поверхностных нарушений или применения специальных технических мероприятий на температурный режим массива мерзлых грунтов. Например, из него следует, что эффективность открытых проветриваемых подполий или навесных конструкций может быть существенно повышена путем периодического уплотнения снежного покрова в зимнее время года. Увеличение плотности снега сильно сказывается на повышении его теплопроводности [Фельдман, 1977; Сморгин, 1988], что приводит к заметному снижению его утепляющего влияния на грунты в зимнее время года. Аналогичного эффекта можно добиться путем сохранения снежного покрова в течение большей части летнего периода (что можно осуществить с помощью сезонного применения теплоизоляционных покрытий). Хотя возможность реализации указанных мероприятий в виде каких-либо приемлемых технологий в настоящее время недостижима, они вполне могут быть применены в экстремальных условиях с использованием достаточно простых технических средств. Интересно также, что таким путем могут быть сформированы многолетнемерзлые острова внутри массивов талого грунта в районах с довольно средними значениями глубины сезонного промер-

зания при условии, что начальная температура t_0 незначительно превышает $0\text{ }^\circ\text{C}$. Кроме того, анализ результатов расчета по динамике температуры мерзлых грунтов будет полезен при анализе их термического отклика на климатические изменения [Горелик, Земеров, 2022].

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОСНОВАНИИ НАСЫПИ ПРИ НАЛИЧИИ ВОДОЕМА

В настоящей работе приводятся описание постановки задачи и результаты расчета температурного поля в мерзлом основании дорожной насыпи в течение срока ее эксплуатации (30 лет) при наличии неглубокого водоема вблизи одного из откосов. Целью расчетов является оценка эффективности технических мероприятий по устранению перемешивания водного слоя в летнее время для стабилизации мерзлого состояния основания насыпи.

Характеристика расчетных условий

На рис. 5 приведена схема расчетной области, включающая поперечное сечение насыпи дорожного полотна, уложенной на многолетнемерзлый грунт и контактирующей с неглубоким водоемом. Предполагается, что фильтрация воды сквозь тело насыпи отсутствует и во всех частях грунтового массива (включающего тело насыпи и грунты основания) теплоперенос осуществляется только кондуктивным путем. Конвективный теплоперенос присутствует только в пределах водоема и учитывается через коэффициент эффективной теплопроводности водного слоя. Постановка задачи включает: нестационарное уравнение теплопроводности, записанное в энтальпийной форме [Горелик и др., 2021]; совокупность граничных условий по всей поверхности выделяемой расчетной области; начальное условие по температуре для ее внутренних точек.

Расчет динамики температурного поля в неоднородном по свойствам массиве грунта производится с учетом изменения фазового состояния в сезонном слое. Границы расчетной области сверху образованы сочетанием внешней границы насыпи, дном водоема и горизонтальной поверхностью естественного массива (см. рис. 5). Верхняя граница водного слоя совпадает с уровнем горизонтальной поверхности грунтов основания (выемка произвольного генезиса). Система координат расположена в горизонтальной плоскости, совпадающей с поверхностью основания, ее центр совпадает с центром симметрии поперечного сечения насыпи. Ось Oz направлена вертикально вниз, оси Ox и Oy лежат в горизонтальной плоскости и направлены вдоль продольной и поперечной осей насыпи соответственно. Размеры расчетной области вдоль каждой оси определяются радиусом теплового влияния [Горелик, Паздерин, 2017], при расчете на 30-летний срок радиус составляет 95 м. Таким образом, границы расчетной области должны быть удалены на 95 м от границ контура насыпи в плане и на такое же расстояние в глубь

массива по вертикали. На этих границах задается нулевое значение теплового потока. Теплообмен верхней границы грунтового массива с воздухом (в естественных условиях – вне сооружения и водоема) через напочвенные покровы учитывается граничным условием 3-го рода с различными коэффициентами теплообмена в летнее и зимнее время. Эти коэффициенты обеспечивают неизменность температуры на глубине нулевых амплитуд ($t_0 = -2.0 \text{ }^\circ\text{C}$) в течение всего рассматриваемого срока (30 лет): $\alpha_s = 17.5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$, $\alpha_w = 1.02 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$. Теплообмен поверхности проезжей части насыпи с воздухом учитывается граничным условием 1-го рода с температурой, равной температуре воздуха (в предположении наличия твердого покрытия и его регулярной очистки от снега зимой). Теплообмен верхней границы откосов насыпи с воздухом в летнее время определяется граничным условием 1-го рода при температуре, равной температуре воздуха (с учетом отсутствия условий влагонакопления), а зимой – граничным условием 3-го рода с зимним коэффициентом теплообмена, который вдвое меньше, чем

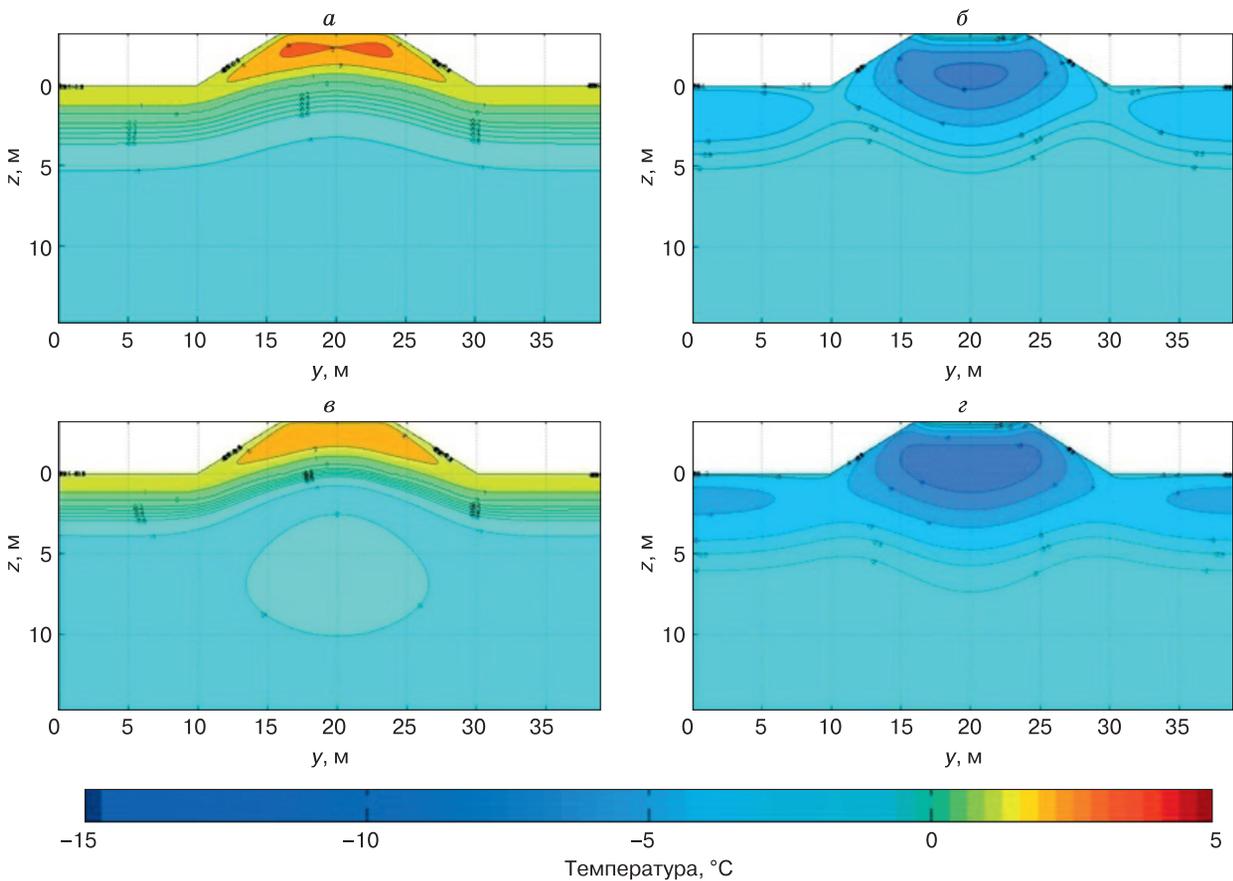


Рис. 6. Температурное поле в основании насыпи при отсутствии обводнения.

a, б – первый год эксплуатации: *a* – 01.10.2000, *б* – 01.06.2001; *в, з* – тридцатый год эксплуатации: *в* – 01.10.2030, *з* – 01.06.2031. Внизу – шкала соответствия цвета и температуры.

в естественных условиях ($\alpha_w = 0.55 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$), с учетом дополнительного снегонакопления за счет расчистки дорожного полотна и ветровых отложений.

Теплофизические характеристики грунтов являются кусочно-постоянными, различающимися для талого и мерзлого состояний. Для грунтов основания они приняты как описано выше. Для материала насыпи (песок) характеристики следующие: объемная теплоемкость ($\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°С})$): $C_u = 2.26 \cdot 10^6$, $C_f = 2.10 \cdot 10^6$; коэффициенты теплопроводности ($\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$): $\lambda_u = 2.1$, $\lambda_f = 2.14$; объемная теплота фазового перехода $q_v = 3.34 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{м}^3$. Начальная температура грунтов на глубине нулевых амплитуд $t_0 = -2 \text{ °С}$.

Геометрические параметры поперечного сечения насыпи приняты следующими (сечение имеет трапециевидную форму): высота насыпи – 3.5 м; ширина главной площадки (верх насыпи) – 7 м; ширина у основания – 20 м (см. рис. 5).

Глубина прилегающего к откосу водоема в примере $h = 0.6 \text{ м}$. Теплообмен поверхности грун-

тового основания (дна водоема) с воздухом через водный слой описывается соотношениями (1)–(6) с учетом изложенного выше относительно температуры дна водоема в периоды ледостава и схода ледового покрова. При описании конвективного теплообмена в форме (1) коэффициент теплообмена между движущимися средами (или эквивалентный ему эффективный коэффициент теплопроводности слоя воды λ_{ef}) неограниченно возрастает при увеличении интенсивности перемешивания [Михеев, Михеева, 1973]. Предельные значения для интенсивного перемешивания этих коэффициентов могут быть приняты бесконечно большими. Расчеты показывают, что результаты вычислений практически перестают зависеть от λ_{ef} , если его величина превышает $200 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$. По этой причине (а также для сохранения достаточной общности применяемого алгоритма) при рассмотрении случая интенсивного перемешивания в летнее время года эффективный коэффициент теплопроводности водного слоя принят $\lambda_{ef} = 300 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$. При условии отсутствия пе-

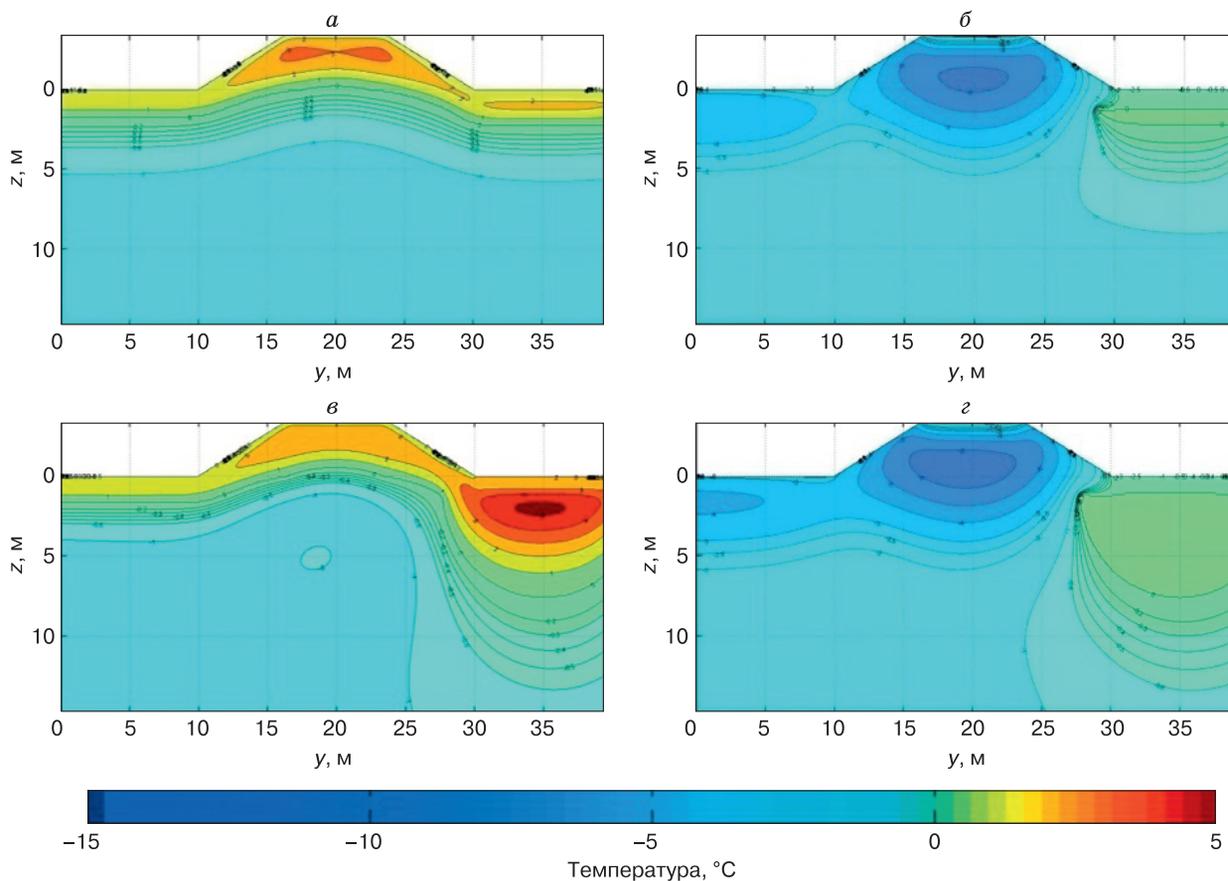


Рис. 7. Температурное поле в основании насыпи при наличии водоема (со стороны правого откоса) в случае сильного перемешивания.

a, б – первый год эксплуатации: *a* – 01.10.2000, *б* – 01.06.2001; *в, з* – пятнадцатый год эксплуатации: *в* – 01.10.2015, *з* – 01.06.2016.

ремешивания $\lambda_{ef} = 0.5$ Вт/(м·°С) (кондуктивная теплопроводность воды). При зимнем замерзании водоема теплопроводность его мерзлой части идентична теплопроводности льда (2.2 Вт/(м·°С)), а перемешивание в жидкой фазе воды пренебрежимо мало, поэтому теплопроводность этой части принимается равной кондуктивной теплопроводности воды [Горелик, Земеров, 2020]. Таяние ледового покрова с началом летнего сезона происходит в плавающем состоянии [Фельдман, 1977; Павлов, 2008; Горелик, Земеров, 2020], и в этот период остаются справедливыми те же допущения относительно значений коэффициентов теплопроводности льда и воды, что и в период ледостава.

Задача решается численно. Применяемая расчетная процедура неоднократно тестирована на различных задачах и описана ранее [Горелик, Хабитов, 2021; Горелик и др., 2021]. Для проверочных расчетов использовалась также вычислительная программа Frost-3D (академическая версия, Лицензионный договор ИКЗ СО РАН с ООО "НТЦ Симмэйкерс" № D 8/20-01), а также моди-

фицированный авторами настоящей работы вариант учебной программы Q-Frost.

Результаты расчета динамики температуры

При отсутствии водоема насыпь оказывает слабое охлаждающее воздействие на основание (рис. 6). На рис. 7 приведены результаты расчета при наличии обводнения (показано в правой части рисунка) при интенсивном его перемешивании в летнее время. Результаты приведены на конец летнего и зимнего периодов в первый и пятнадцатый год эксплуатации дорожного полотна. По сравнению с рис. 6 результаты расчетов показывают значительный разогрев грунтов основания на 15-й год эксплуатации сооружения со стороны откоса насыпи, контактирующего с водоемом. На 30-й год эти нарушения проявляются еще существеннее.

В случае отсутствия перемешивания воды в летнее время нарушения практически отсутствуют на 30-й год эксплуатации в конце как летнего, так и зимнего сезонов эксплуатации сооружения (рис. 8).

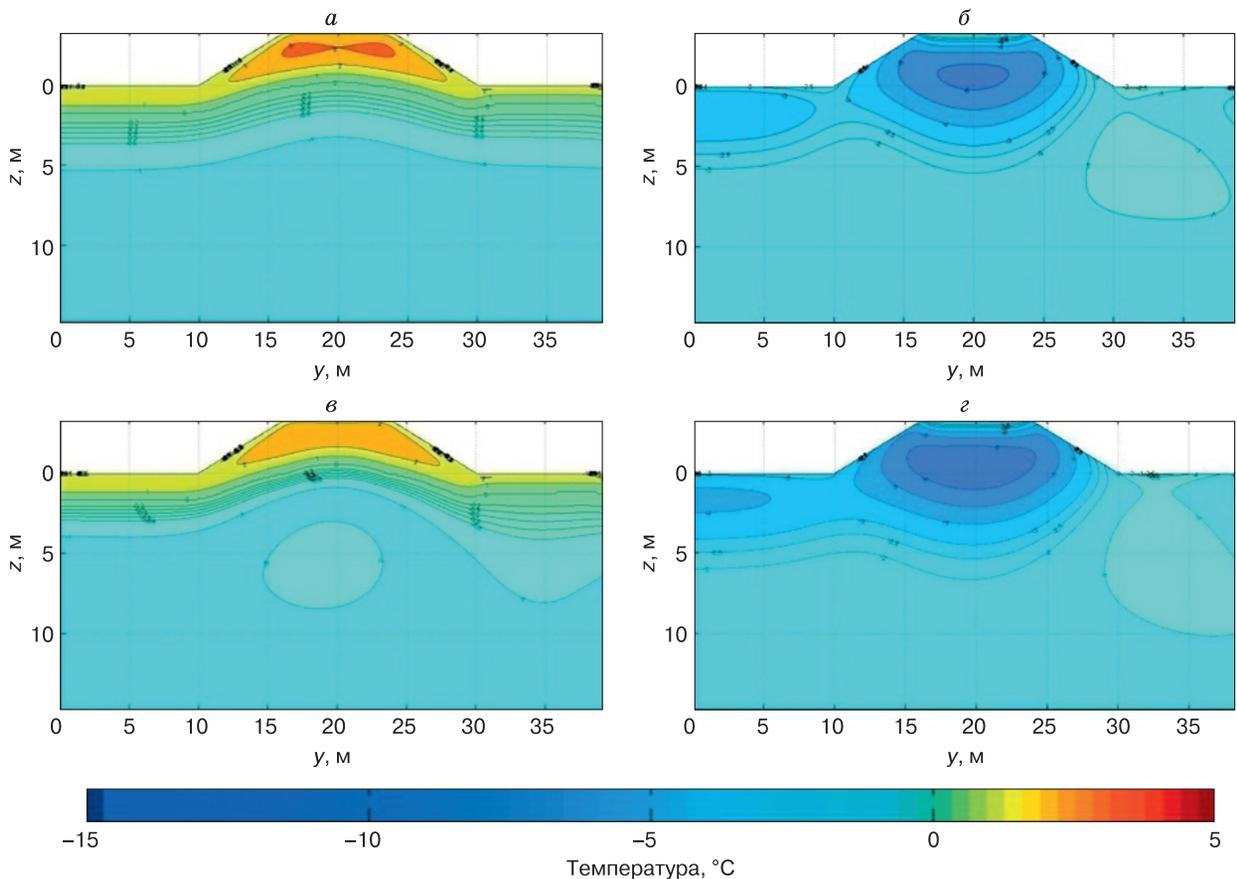


Рис. 8. Температурное поле в основании насыпи при наличии водоема (со стороны правого откоса) при отсутствии перемешивания.

а, б – первый год эксплуатации: *а* – 01.10.2000, *б* – 01.06.2001; *в, г* – тридцатый год эксплуатации: *в* – 01.10.2030, *г* – 01.06.2031.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты математического моделирования процесса формирования температурного поля в мерзлом основании под неглубоким водоемом, а также под насыпью дорожного полотна при наличии обводнения одного из ее откосов позволяют сделать следующие выводы.

1. Общее тепловое взаимодействие мерзлого основания с насыпью дорожного полотна и контактирующим с ней водным слоем носит сложный характер, и для обеспечения корректности процедуры численного моделирования этого процесса целесообразно предварительно проанализировать тепловое воздействие водоема на основание (как наименее изученного элемента общей системы) с выделением наиболее важных факторов, определяющих это взаимодействие. Установлено, что такими факторами в рассматриваемой задаче являются глубина водоема и характер перемешивания водного слоя в летнее время года (см. рис. 2).

2. Важную предварительную оценку нового устойчивого теплового состояния мерзлых грунтов и времени релаксации к нему при возникновении неглубокого водоема на поверхности массива дает анализ динамики температур на подошве слоя сезонного оттаивания и на глубине годовых нулевых амплитуд, а также их поведения в течение предполагаемого срока эксплуатации сооружения. Предложенный метод анализа допускает обобщение практически на любой вид изменений поверхностных условий естественного или искусственного происхождения и может быть полезным при оценке эффективности различных технических мероприятий, направленных на улучшение термического состояния грунтов при строительстве и эксплуатации сооружений.

3. Интенсивное перемешивание воды в неглубоком водоеме имеет место вследствие ветрового воздействия и влияния естественной конвекции в летнее время года. При интенсивном перемешивании контактирующего с откосом насыпи слоя воды происходит существенное отепление грунтов основания. Это отепление наступает задолго до завершения срока эксплуатации сооружения и может привести к частичному (и неравномерно) оттаиванию грунтов.

4. Предотвращение процесса перемешивания водного слоя в летний период каким-либо способом приводит к тому, что начальное температурное состояние в основании дороги можно сохранить в течение всего срока ее эксплуатации.

Работа выполнена в рамках государственного задания, тема № 121041600047-2.

Литература

- Андрянов А.И.** Железная дорога на “вечной” мерзлоте // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. по инженерному мерзлотоведению. Тюмень, НПО “Фундаментстройаркос”, 2011, с. 77–79.
- Ашпиз Е.С., Хрусталева Л.Н.** Предупреждение оттаивания мерзлоты в основании насыпей // Дороги, 2013, № 25, с. 32–34.
- Ашпиз Е.С., Хрусталева Л.Н., Емельянова Л.В., Ведерникова М.А.** Использование синтетических теплоизоляторов для сохранения мерзлотных условий в основании железнодорожной насыпи // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 2, с. 84–89.
- Воронцов В.В., Краев А.Н., Игошин М.Е.** Стабилизация критических деформаций земляного полотна автомобильной дороги в криолитозоне // Вестн. СибАДИ, 2014, вып. 6 (40), с. 67–72.
- Горелик Я.Б., Земеров И.В.** Влияние поверхностного обводнения на температурный режим мерзлых грунтов // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2020, т. 6, № 1 (21), с. 10–40.
- Горелик Я.Б., Земеров И.В.** Полуэмпирический метод прогноза термического отклика многолетнемерзлых грунтов на потепление климата // Мониторинг криолитозоны: Сб. докл. Шестой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2022 г.). М., МГУ, 2022, с. 529–537.
- Горелик Я.Б., Паздерин Д.С.** Корректность постановки и решения задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 3, с. 49–59.
- Горелик Я.Б., Хабитов А.Х.** Эффективность поверхностного охлаждения мерзлых грунтов в связи с механизмом формирования температурной сдвижки // Криосфера Земли, 2021, т. XXV, № 2, с. 24–37.
- Горелик Я.Б., Хабитов А.Х., Земеров И.В.** Эффективность поверхностного охлаждения мерзлых оснований с применением агрегата принудительной циркуляции хладагента // Криосфера Земли, 2021, т. XXV, № 4, с. 36–46.
- Гребенец В.И., Исаков В.А.** Деформации автомобильных и железных дорог на участке Норильск–Талнах и методы борьбы с ними // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 2, с. 69–77.
- Достовалов Б.Н.** Общее мерзлотоведение / Б.Н. Достовалов, В.А. Кудрявцев. М., МГУ, 1967, 403 с.
- Дыдышко П.И.** Деформации земляного полотна железнодорожного пути и их устранение в условиях вечной мерзлоты // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 4, с. 43–57.
- Карслоу Г.** Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. М., Наука, 1964, 487 с.
- Кондратьев С.В.** Деформации Забайкальской части федеральной автомобильной дороги “Амур” Чита–Хабаровск на участках льдистых многолетнемерзлых грунтов: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2016, 22 с.
- Литовко А.В.** Геокриологические условия пород “ледового комплекса” и их воздействие на ж/д АЯМ “Беркалит–Томмот–Якутск” // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. по инженерному мерзлотоведению. Тюмень, НПО “Фундаментстройаркос”, 2011, с. 386–390.
- Михеев М.А.** Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. М., Энергия, 1973, 320 с.
- Общее мерзлотоведение** / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., МГУ, 1978, 464 с.

Павлов А.В. Теплообмен промерзающих и протаивающих грунтов с атмосферой. М., Наука, 1965, 254 с.

Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2008, 230 с.

Порхаев Г.В. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами. М., Наука, 1970, 208 с.

Сморьгин Г.И. Теория и методы получения искусственно-го льда. Новосибирск, Наука, 1988, 284 с.

Способ защиты мерзлого основания насыпи дорожного полотна от негативного влияния обводнения: пат. РФ № 2753329 / Горелик Я.Б., Земаеров И.В. Зарегистрирован 13.08.2021.

Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. М., Наука, 1972, 736 с.

Чжан А.А., Ашпиз Е.С., Хрусталева Л.Н., Шестернев Д.М. Новый способ защиты мерзлых грунтов основания насыпи от оттаивания // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 3, с. 67–71.

Фельдман Г.М. Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов. Новосибирск, Наука, 1977, 102 с.

Фельдман Г.М. Термокарст и вечная мерзлота. Новосибирск, Наука, 1984, 262 с.

Шур Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск, Наука, 1988, 213 с.

References

Andrianov A.I. Railway on permafrost. In: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference on Engineering Geocryology. Tyumen, NPO "Fundamentstroyarkos", 2011, p. 77–79 (in Russian).

Ashpis E.S., Khrustalev L.N. Prevention of the permafrost thawing in roadbeds. Dorogi [Roads], 2013, No. 25, p. 32–34.

Ashpis E.S., Khrustalev L.N., Emelyanova L.V., Vedernikova M.A. Using of synthetical thermal insulators for conservation of frozen soil conditions in the base of railway embankment. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2008, vol. XII, No. 2, p. 84–89.

Vorontsov V.V., Kraev A.N., Igoshin M.E. Stabilisation of the car road critical deformations in permafrost. Vestnik SibADI [Bulletin SibADI], 2014, iss. 6 (40), p. 67–72.

Gorelik J.B., Zemerov I.V. Influence of the surface water reservoir to the thermal regime of frozen ground. Bulletin TGU [Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy], 2020, vol. 6, No. 1, p. 10–40.

Gorelik J.B., Zemerov I.V. Prognosis method of temperature response of permafrost on climate warming. In: Proceedings of the 6th Conference of Russian Geocryologists. Moscow, MGU, 2022, p. 529–535 (in Russian).

Gorelik J.B., Pazderin D.S. Correctness of formulation and solution of thermotechnical problems of forecasting temperature field dynamics in the ground base of structures on permafrost. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 3, p. 45–54.

Gorelik J.B., Khabitov A.K. Affectivity of surface cooling of frozen ground in connection with mechanism of temperature shift formation. Earth's Cryosphere, 2021, vol. XXV, No. 2, p. 22–34.

Gorelik J.B., Khabitov A.K., Zemerov I.V. Efficiency of surface cooling of frozen soil foundation using a forced refrigerant circulation unit. Earth's Cryosphere, 2021, vol. XXV, No. 4, p. 30–39.

Grebenets V.I., Isakov B.A. Deformation and stabilization of motor and rail roads within the Norilsk–Talnach transportation corridor. Earth's Cryosphere, 2016, vol. XX, No. 2, p. 62–68.

Dostovalov B.N., Kudryvtsev V.A. Obshchee merzlotovedenie [General Geocryology], Moscow, MGU, 1967, 403 p. (in Russian).

Dydyshko P.I. Deformations of railway subgrad upon permafrost and stabilization measures. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 4, p. 36–47.

Karslow G., Eger D. Teploprovodnost' tverdykh tel [Thermal conductivity of solid body]. Moscow, Nauka, 1964, 487 p.

Kondratiev C.V. Deformatsii Zabaikalskoi chasti federalnoi avtomobilnoi dorogi Amur Chita–Khabarovsk na uchastkakh l'distykh mnogoletnemerzlykh gruntov [Deformations of car road bed "Amur" at the part Chita–Khabarovsk with high icy permafrost]: Thesis of PhD dissertation. Irkutsk, 2016, 22 p. (in Russian).

Litovko A.V. The geocryology conditions of "ice complex" and their action on rail way "Berkakit–Tommot–Yakutsk". In: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference on Engineering Geocryology. Tyumen, NPO "Fundamentstroyarkos", 2011, p. 386–390 (in Russian).

Micheev M.A., Micheeva I.M. Osnovy teploperedachi [The Bases of Heat Transfer]. Moscow, Energiya, 1973, 320 p. (in Russian).

Obshchee merzlotovedenie [General Geocryology]. Kudryvtsev V.A. (Ed.). Moscow, MGU, 1978, 464 p. (in Russian).

Pavlov A.V. Teploobmen promerzayushchikh i protaivayushchikh gruntov s atmosferoi [Heat exchange of freezing and thawing soils with atmosphere]. Moscow, Nauka, 1965, 254 p. (in Russian).

Pavlov A.V. Monitoring kriolitozony [Monitoring of Permafrost]. Novosibirsk, Acad. Izd-vo "Gео", 2008, 230 p. (in Russian).

Porchaev V.G. Teplovoe vzaimodeistvie zdaniy i sooruzheniy s vechnomerzlymi gruntami [Thermal interaction of buildings with permafrost]. Moscow, Nauka, 1970, 208 p. (in Russian).

Smorigyn G.I. Teoriya i metody polucheniya iskustvennogo l'da [Theory and methods of production the artificial ice]. Novosibirsk, Nauka, 1988, 284 p. (in Russian).

Sposob rashchity merzlogo osnovaniya nasypi dorozhnogo polotna ot negativnogo vliyaniya obvodneniya [Method of protection of frozen roadbeds against negative influence of contact with water basin]: Patent RF No. 2753329 / Gorelik J.B., Zemerov I.V. Data: 13.08.2021.

Tychonov A.N., Samarsky A.A. Uravneniya matematicheskoi fiziki [Methods of Mathematical Physics]. Moscow, Nauka, 1972, 736 p. (in Russian).

Zhang A.A., Ashpis E.S., Khrustalev L.N., Shesternev D.M. A new way for thermal stabilization of permafrost under railway embankment. Earth's Cryosphere, 2018, vol. XXII, No. 3, p. 59–62.

Feldman G.M. Prognoz temperaturnogo rezhima gruntov i razvitiya kriogennukh protsessov [Prognoses of temperature regime for grounds and evolution of cryogenic processes]. Novosibirsk, Nauka, 1977, 102 p. (in Russian).

Feldman G.M. Termokarst i vechnaya merzlota [Thermokarst and Permafrost]. Novosibirsk, Nauka, 1984, 262 p. (in Russian).

Shur Y.L. Verkhnyy gorizont tolshechi merzlykh porod i termokarst [Upper layer of frozen ground and thermokarst]. Novosibirsk, Nauka, 1988, 213 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 25 июля 2022 г.,
после доработки – 2 декабря 2022 г.,
принята к публикации 16 февраля 2023 г.*