

УДК 625.731.3:536.24

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ПРОТИВОНАЛЕДНЫХ
СООРУЖЕНИЯХ**

Инженер **Е.В. Шехтман**
(ПНИ «Мосжелдорпроект»),
д-р техн. наук **Н.П. Сигачев**,
канд. техн. наук **Я.В. Клочков**
(Институт природных ресурсов,
экологии и криологии СО РАН),
инженер **З.Б. Дашинамаев**
(«Забайкалжелдорпроект»),
инженер **Д.А. Григорьев**
(АО «Виллюйавтодор»)
Контактная информация: (499) 262-51-10;
(3022) 20-61-97;
klochkov.zabirt@mail.ru

Рассмотрен способ безналедного пропуска воды при промерзании подземных водотоков вблизи дорожных сооружений. Приведена математическая модель тепловых процессов в дренажах, заполненных гранулированным пеностеклом. Выполнены теплотехнические расчеты дренажей в различных климатических условиях. Дана оценка способности дренажей пропускать воду в зависимости от расчетных температур зимнего периода.

Ключевые слова: *безналедный пропуск воды, грунт, пеностекло, дренаж, теплопроводность, теплотехнические расчеты, математическое моделирование.*

Строительство дорожных сооружений сопровождается нарушением естественного режима протекания речных и грунтовых вод. Это часто приводит к возникновению на дневной поверхности ледяного тела – наледи, образовавшейся в результате вытекания речных, подземных, снеговых, ледниковых вод, их растекания и послойного замерзания. Наледи речных и подземных вод образуются поздней осенью и зимой при промерзании потока речных или грунтовых вод либо при разгрузке подземных вод. Наиболее широко наледи распространены в Якутии, Бурятии, Забайкалье, Туве, на Алтае, в Магаданской, Амурской и Иркутской областях, Красноярском крае. Наблюдаются наледи также в Западной Сибири и на Урале [1,2].

Для предотвращения развития и негативного влияния данных процессов необходимо регулирование потоков грунтовых и подземных вод с помощью различных водоотводных устройств, в том числе дренажей. При эксплуатации дренажей в случае их расположения в зоне сезонного промерзания грунтов возникают проблемы, связанные с замерзанием воды в дренажной системе в зимний период, что приводит к прекращению отвода воды из грунтов.

Один из способов безналедного пропуска воды заключается в заполнении русла дренажа гранулированным теплоизоляционным материалом с обеспечением сохранения положительных температур на его дне [3]. Предлагаемое решение позволяет предотвратить возможность полного промерзания дренажных систем, устроить дренаж в зоне сезонного промерзания грунтов, устранить наледообразование и исключить давление льда на пролетные строения и опоры мостов, основания земляного полотна дорог и другие инженерные сооружения.

Материал, применяемый для заполнения дренажа, должен быть малотеплопроводным, прочным, малопоглощающим воду, химически и биологически стойким, морозостойким и долговечным, при этом иметь окатанную форму частиц и гранулометрический состав, обеспечивающие его дренирующие свойства. Всем перечисленным выше качествам отвечают гранулированные ячеистые стекло и керамика (пеностекло, газостекло, пенокерамика, газокерамика), часто объединяемые одним названием «пеностекло» [4].

В настоящее время на рынке предлагается достаточно широкий ассортимент гранулированного пеностекла. Гранулометрический состав представлен частицами, размер которых в среднем изменяется от 2-5 до 70 мм. Насыпная плотность варьируется от 85 до 350 кг/м³, прочность – от 0,3 до 2,8 МПа. Водопоглощение по объему составляет от 0,5 до 6%, при этом коэффициент теплопроводности изменяется от 0,045 до 0,085 Вт/м К в сухом состоянии, до 0,16 Вт/м К во влажном.

Приведенные свойства данного материала позволяют установить основные принципы его работы:

- *первый принцип* определяется гранулированным составом, который обеспечивает требуемые дренирующие свойства. В летний период дождевые и грунтовые воды свободно фильтруются через верхний слой из тяжелого гравия, служащего пригрузом от всплывания пеностекла, и далее через пеностекольный дренаж поступают в регуляционные перфорированные трубы, каналы, либо свободно истекают на рельеф или в хорошо фильтрующие нижележащие грунты;

- *второй принцип* определяется теплоизоляционными свойствами. В зимний период верхние слои пеностекляного дренажа, замерзая, образуют конгломерат льда и пеностекла, теплопроводность которого существенно ниже по сравнению с естественными грунтами, что предотвращает промерзание нижележащих слоев дренажа.

Для обоснования применения данного способа безналедного пропуска воды и установления конструктивных параметров дренажа выполняются гидрогеологические и теплотехнические расчеты [5]. Гидрогеологические расчеты производятся на летний период для определения пропускной способности дренажа в паводковый период. Теплотехническими расчетами определяют глубину зимнего промерзания, периоды оттаивания в весенний период, геометрические параметры дренажа.

Для установления оптимальной ширины и толщины утепляющего слоя произведено математическое моделирование теплофизического процесса сезонного промерзания-оттаивания грунта в программной среде *МОДЭН 3.22*. Моделирование велось с учетом пропуска измеренного в зимний период 2013-2014 гг. расхода воды в районе железнодорожного моста с постоянным образованием наледи, который составил 8 л/с, при температуре воды 1,5 °С. Разработанная математическая модель позволяет рассчитывать температурное поле в грунте при различных среднечасовых ежемесячных колебаниях температур, ежемесячной величине снежного покрова, глубине расположения уровня грунтовых вод, разном расходе подземных вод и т.д. Все необходимые данные вводятся в модель на основании результатов изысканий или сведений из климатических справочников.

Следует отметить, что область моделирования состоит из неоднородных слоев грунта, с различными теплофизическими свойствами – теплоемкостью, теплопроводностью, плотностью и влагосодержанием, которые изменяются в зависимости от агрегатного состояния воды в грунте. В связи с этим для компьютерного моделирования необходимо построение области вычислительного эксперимента, в которой учтено реальное распределение слоев грунта с различными теплофизическими свойствами. Такое распределение слоев грунта строится на основании данных, полученных по инженерно-геологическим изысканиям.

На начальный момент времени задано температурное поле для всех элементов среды, известна функция изменения температуры воздуха в годовом цикле $T_{\text{вод}}(t)$ и температура на глубине нулевых годовых амплитуд. Требуется определить распределение температур в каждом элементе среды в плоскости *ОХУ* для произвольного значения времени.

За верхнюю границу области моделирования принята поверх-

ность земли, а нижняя граница расположена на достаточно большой глубине, чтобы минимизировать ее влияние на тепловые процессы в рассматриваемой области.

Верхняя граница области моделирования является граничным условием третьего рода. На ней задаются условия теплообмена с окружающей средой, которые определяются температурой воздуха в зависимости от времени, а также коэффициентом теплоотдачи в зависимости от скорости ветра; дополнительно задается степень черноты поверхности грунта. Учет влияния снегового покрова на теплообмен поверхности грунта осуществляется путем задания изменения во времени толщины снежного покрова и его теплопроводности.

Нижняя граница области моделирования является граничным условием первого рода, на которой, согласно термометрическим данным, задана температура грунта на глубине нулевых годовых амплитуд.

Боковая поверхность области моделирования является граничным условием второго рода; на ней задается нулевой тепловой поток. При этом боковые границы области моделирования должны быть расположены достаточно далеко от рассматриваемого участка, чтобы они не оказывали влияние на расчет тепловых процессов.

При расчете принята двухмерная модель, которая представляет собой элементарные части материала с сосредоточенными параметрами. Рассматриваемая область разбита на отдельные элементы единичной длины в направлении оси OZ с поперечными размерами Δx и Δy .

Расчетная схема приведена на **рис. 1**.

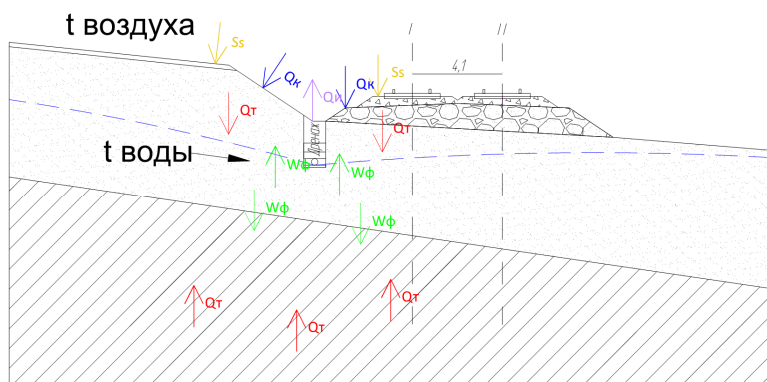


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез и условия, применяемые для расчетов

Общее поступление теплоты определяется по формуле:

$$Q = Q_m + Q_k + Q_u + S_s + W_\phi, \quad (1)$$

где

$Q_m = Q_m(x, y, \lambda, c)$ – функция, определяющая количество теплоты, поступившее за счет теплопроводности;

$Q_k = Q_k(x, y, T_{воз})$ – функция, определяющая количество теплоты, поступившее за счет конвекции;

$Q_u = Q_u(x, y, T_{воз})$ – функция, определяющая количество теплоты, отданное за счет излучения;

$S_s = S_s(\delta, \psi_s)$ – функция, определяющая количество теплоты, получаемое за счет солнечной радиации;

$W_\phi = W_\phi(x, y, T_{вод})$ – функция, определяющая количество теплоты, получаемое грунтом за счет фильтрации грунтовых вод;

$\lambda = \lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности грунта, Вт/м °С;

$c = c(T)$ – теплоемкость грунта, Дж/кг°С;

T – температура грунта, °С;

$T_{воз} = T_{воз}(t)$ – температура воздуха, °С;

$\delta = \delta(t)$ – склонение солнца, град.;

$\psi_s = \psi_s(t)$ – азимут солнца, град.;

$\tau = \tau(t)$ – часовой угол Солнца, град.;

$T_{вод}$ – температура подземных вод, °С;

t – время.

Согласно гипотезе Фурье, количество теплоты, проходящее через элемент изотермической поверхности за промежуток времени, пропорционально температурному градиенту:

$$dQ_\tau = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} dF, \quad (2)$$

где

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м°С;

T – температура, °С;

n – нормаль к поверхности;

F – площадь поверхности, м².

Количество теплоты (q), прошедшее в единицу времени через единицу изотермической поверхности определяется по формуле:

$$\bar{q} = -\lambda \bar{n} \frac{\partial T}{\partial n} . \quad (3)$$

Проекции вектора q на координатные оси соответственно:

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx} ; \quad (4)$$

$$q_y = -\lambda \frac{dT}{dy} . \quad (5)$$

Количество тепла, полученного каждым элементом извне за единицу времени, определяется по формуле:

$$Q_{i,j} = Q^{11}_{i,j}(x) + Q^{12}_{i,j}(y) , \quad (6)$$

где

$i = [1, \dots, m]$ и $j = [1, \dots, n]$, m и n количество элементов по оси X и Y соответственно;

$$dQ^{11}_{i,j}(x) = (q_{i-1} - q_{i+1})dx ; \quad (7)$$

$$dQ^{12}_{i,j}(y) = (q_{j-1} - q_{j+1})dy , \quad (8)$$

где

$Q_{i,j}$ – количество тепла, отданного или полученного извне (i, j) -м элементом за время Δt . Иначе это количество тепла можно определить по формуле:

$$dQ_{i,j} = c_{i,j} \rho_{i,j} (T_{i,j}(t) - T_{i,j}(t + \Delta t)) dF ; \quad (9)$$

q_{i-1} – поток тепла, проходящий через единицу площади от (i, j) -го к $(i-1, j)$ -му элементу в единицу времени:

$$q_{i-1} = \frac{T_{i-1,j}(t) - T_{i,j}(t)}{\frac{\delta_{i,j}}{\lambda_{i,j}}} ; \quad (10)$$

q_{i+1} – поток тепла, проходящий через единицу площади от (i, j) -го к $(i+1, j)$ -му элементу в единицу времени:

$$q_{i+1} = \frac{T_{i,j}(t) - T_{i+1,j}(t)}{\frac{\delta_{i,j}}{\lambda_{i,j}}} ; \quad (11)$$

q_{j-1} – поток тепла, проходящий через единицу площади от (i, j) -го к $(i, j-1)$ -му элементу в единицу времени:

$$q_{j-1} = \frac{T_{i,j-1}(t) - T_{i,j}(t)}{\frac{\delta_{i,j}}{\lambda_{i,j}}} ; \quad (12)$$

q_{j+1} – поток тепла, проходящий через единицу площади от (i, j) -го к $(i, j+1)$ -му элементу в единицу времени:

$$q_{j+1} = \frac{T_{i,j}(t) - T_{i,j+1}(t)}{\frac{\delta_{i,j}}{\lambda_{i,j}}} ; \quad (13)$$

$\delta_{i,j}$ – толщина слоя, м;

$\lambda_{i,j}$ – коэффициент теплопроводности, Вт/м°C.

В случае отсутствия данных о результатах изысканий по теплопроводности грунта руководствуются экспериментально установленными и обобщенными расчетными зависимостями [6,7].

Свойства снега задаются среднемесячными значениями соответствующих характеристик. Принимается во внимание, что плотность снега изменяется в течение холодного времени года, поэтому по данным многолетних наблюдений задается ежемесячное распределение толщины и плотности снега. Коэффициент теплопроводности снега, при отсутствии других данных, определяется по формуле Абельса для плотности снега менее 350 кг/м³:

$$\lambda_{\text{сн}} = 285 * 10^{-5} \rho_{\text{сн}}^2 . \quad (14)$$

Удельная теплоемкость снега ($c_{\text{сн}}$) определяется так же, как и для льда – по формуле Вейнберга:

$$c_{\text{сн}} = 2,12(1 + 0,0037T) . \quad (15)$$

Для учета теплоты фазового перехода воды необходимо определить количество теплоты, которое требуется сообщить элементу для фазового превращения ($Q_{\text{ф}}$). Данное количество теплоты учитывается в тот момент времени, когда температура элемента становится равной температуре фазового перехода воды, по следующей формуле:

$$dQ_{\text{ф}} = rw\rho_{\text{л}}dF , \quad (16)$$

где

r – удельная теплота плавления льда, Дж/кг;

$\rho_{\text{л}}$ – плотность воды, кг/м³;

w – влажность грунта в долях.

Поток тепла с поверхности грунта за счет конвективного теплопереноса, q_{i-1} , проходящий через единицу площади от (i, j)-го к ($i-1, j$)-му элементу в единицу времени, определяется по уравнению:

$$q_{\text{к}} = \frac{T_{i-1,j}(t) - T_{i,j}(t)}{\frac{1}{\alpha}} , \quad (17)$$

где

α – коэффициент теплоотдачи на поверхности, Вт/м²°С.

Мощность собственного теплового излучения поверхности, направленного в атмосферу, представляет собой разницу между тепловым излучением Земли и встречного излучения атмосферы (почти полностью поглощаемого атмосферой):

$$dQ_{\text{и}} = \delta(\sigma T_{\text{п}}^4 - \alpha_{\text{п}}\sigma T_1^4)dx , \quad (18)$$

где

$T_{\text{п}}^4$ – температура поверхности, °С;

T_1^4 – температура воздуха на высоте 2 м, °С;

σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²К⁴);

$\alpha_{\text{п}}$ – относительный коэффициент поглощения атмосферы;

δ – коэффициент относительной прозрачности атмосферы.

Количество теплоты, поступающей за счет инсоляции поверхности, изменяется в зависимости от широты, времени года, времени суток, погодных условий и т.д. Суммарное поступление прямой и рассеянной радиации равно:

$$dS = (S_s + I_s)dx , \quad (19)$$

где

S_s – величина прямой солнечной радиации, Вт;

I_s – величина рассеянной солнечной радиации, Вт;

$$S_s = rS_{\text{прям}} , \quad (20)$$

где

r – коэффициент поглощения поверхности;

$S_{\text{прям}}$ – поступления от прямой солнечной радиации, Вт.

Согласно методике К.Я. Кондратьева [8], поток прямой солнечной радиации на поверхность, расположенную под углом β к этому потоку, равен:

$$S_s = S_{\text{max}} \cos(\beta) K_{\text{вм}} , \quad (21)$$

где

S_{max} – максимальное значение солнечной радиации, Вт/м²;

$$\begin{aligned} \cos(\beta) = & \cos A (\sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\tau) + \\ & + \sin A (\cos\psi_s \left(\operatorname{tg}\varphi (\sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\tau) - \frac{\sin\delta}{\cos\varphi} \right) + \\ & + \sin\psi_s \cos\delta \sin\tau), \end{aligned} \quad (22)$$

где

A – угол наклона поверхности к горизонту;

φ – широта местности;

δ – склонение;

ψ_s – азимут;

τ – часовой угол Солнца.

Максимальное значение солнечной радиации равно 1362 Вт/м² и, если считать, что, примерно 30% солнечного излучения отражается в космос, то, по данным [9,10], оно равно 900 Вт/м². Для горизонтальной поверхности $A = 0$. Для вертикальной поверхности $A = \pi/2$.

Склонение солнца определяется по формуле [11]:

$$\delta = 23,5 \sin(2\pi d/365) \frac{2\pi}{360} , \quad (23)$$

где

d – день года.

Значение τ , часового угла Солнца, рад, определяют по формуле:

$$\tau = t2\pi/24 , \quad (24)$$

где

t – час дня.

Максимальное значение солнечной радиации существенно зависит от высоты солнца. Этот угол можно определить по формуле:

$$\sin h_c = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \tau . \quad (25)$$

Значение коэффициента, учитывающего поправку на воздушную массу $K_{\text{ВМ}}$, равно:

$$K_{\text{ВМ}} = 1,1254 - 0,1366 \frac{1}{\sin h_c} . \quad (26)$$

Дополнительно к прямой солнечной радиации на поверхность поступает и рассеянная радиация. На основании данных работы [4] рассеянную радиацию на горизонтальную поверхность можно рассчитать по формуле:

$$I_s = \left(137,1 - 14,82 \frac{1}{\sin h_c} \right) \left(1 - \frac{0,318}{\frac{A}{2}} \right) . \quad (27)$$

В данном случае процесс фильтрации и движение воды рассматриваются как параллельно-струйное ламинарное движение воды в пористой среде, которая обладает переменной пористостью и переменной водопроницаемостью.

Если поры грунта находятся в насыщенном состоянии, то процесс фильтрации моделируется на основе дифференциального уравнения Дарси:

$$dG = KIdF , \quad (28)$$

где

G – расход воды;

F – площадь поперечного сечения грунта, м^2 ;

K – коэффициент водопроницаемости или фильтрации, м/с;

I – гидравлический уклон или градиент, равный отношению потери напора к длине пути фильтрации;

$$I = \frac{H_2 - H_1}{l} , \quad (29)$$

где

$(H_2 - H_1)$ – потери напора, м;

l – длина пути фильтрации, м.

Количество тепла, отданное потоком воды, за счет измерения температуры определяется по формуле:

$$dQ_\phi = c(T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}})dG , \quad (30)$$

где

$T_{\text{ВХ}}$ и $T_{\text{ВЫХ}}$ – температура подземной воды на входе и выходе со-

ответственно, °С.

Количество теплоты, переданной за счет конвективного теплообмена подземных вод и водоупора, определяется по формуле:

$$q_{i-1} = \frac{T_{i-1,j}(t) - T_{i,j}(t)}{R_{кф}}, \quad (31)$$

где

$R_{кф}$ – термическое сопротивление;

$$R_{кф} = \frac{1}{\alpha_l}, \quad (32)$$

где

α_l – коэффициент теплоотдачи, между ламинарным потоком фильтрующейся воды и водоупором.

Коэффициент теплоотдачи в месте соприкосновения ламинарного потока подземных вод и водоупора определяется по формуле для невозмущенного режима течения [12]:

$$\alpha_l = Nu \frac{\lambda}{l}, \quad (33)$$

где

Nu – число Нуссельта:

$$Nu = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad (34)$$

где

Re – число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu}, \quad (35)$$

где

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

v – скорость свободного потока, м/с;

l – длина участка, м;

μ – динамическая вязкость жидкости, Н с/м²;

Pr – число Прандтля:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}, \quad (36)$$

где

c_p – удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг °С);

λ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м°С).

Конструкция дренажа представляет собой массив пеностекла мощностью 0,6 м, заполненного наполовину водой. Коэффициент фильтрации дренажа принят равным 20 м/сут. Характеристики грунтов для

расчета температурного поля приведены в **табл. 1**.

Расчет температурного поля дренажа произведен для условий Забайкалья, при различных значениях среднегодовых температур воздуха, которые соответствуют среднегодовым температурам воздуха в различных городах – от Читы до Ерофей Павловича. Прототипом расчета была одна из наледей в Сковородинском районе Амурской области, на которой производятся термометрические наблюдения. Наиболее характерные результаты распределения температурного поля приведены на **рис. 2-4**.

Таблица 1

*Характеристики грунтов и материалов
для расчета температурного поля*

<i>Наименование</i>	<i>Плотность, кг/м³</i>	<i>Влажность, д. ед.</i>	<i>Теплопроводность в талом (мерзлом) состоянии, Вт/м°С</i>	<i>Теплоемкость в талом (мерзлом) состоянии, Дж/кг°С</i>
<i>Существующий грунт (супесь)</i>	1800	0,2	1,7 (2,1)	1900 (1375)
<i>Пеностекло</i>	270	0,00	0,06 (0,06)	700 (700)
<i>Пеностекло в обводненном состоянии (теплофизические характеристики приведены для массива пеностекло-вода и пеностекло-лед)</i>	450	0,25	0,19 (0,5)	1250 (720)

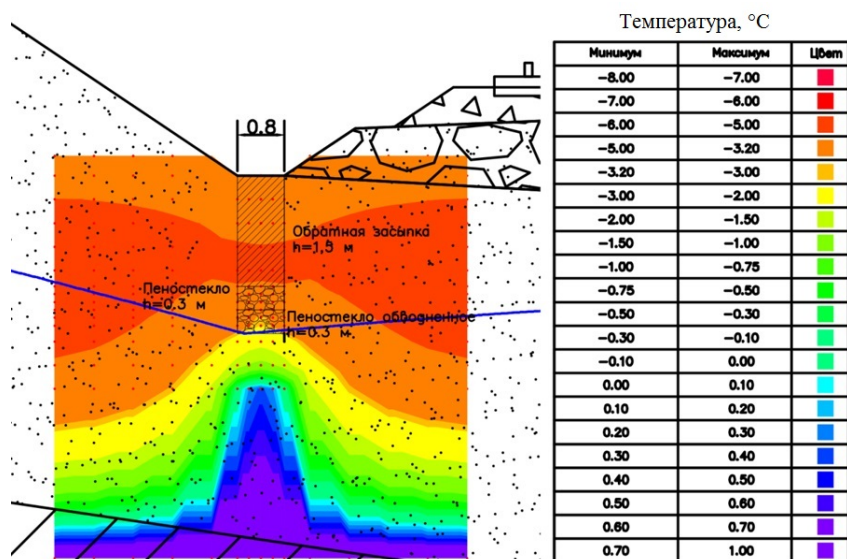


Рис. 2. Температурный режим грунтов на участке дренажа при среднегодовой температуре -7 °С

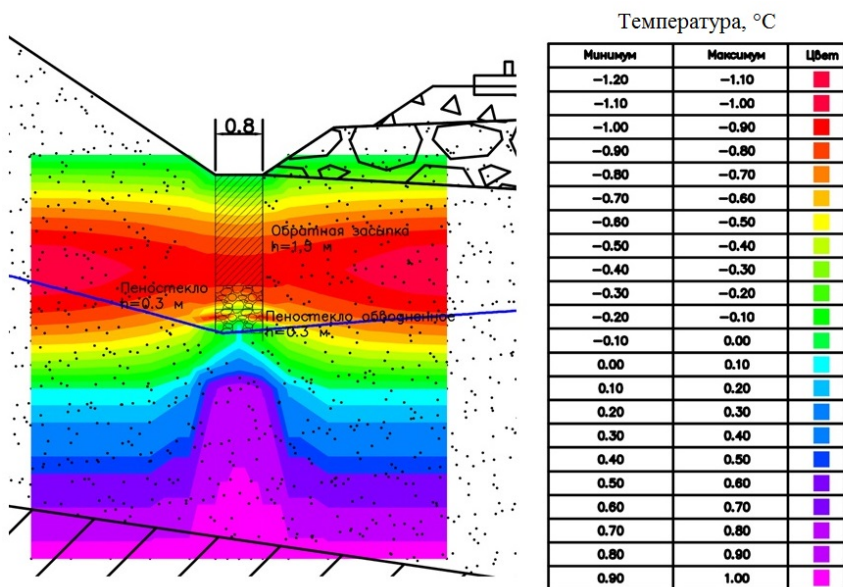


Рис. 3. Температурный режим грунтов на участке дренажа с пеностеклом при среднегодовой температуре -3 °С

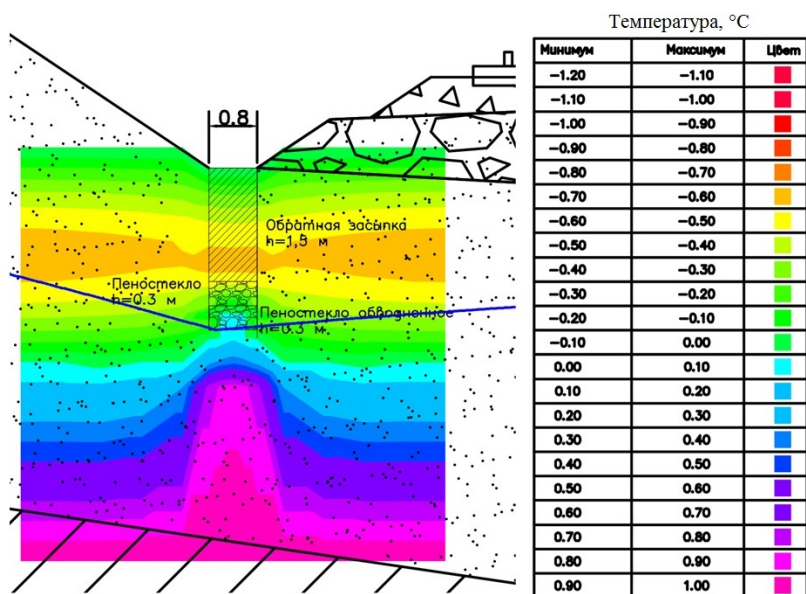


Рис. 4. Температурный режим грунтов на участке дренажа с пеностеклом при среднегодовой температуре -1 °С

Согласно результатам математического моделирования с указанными параметрами, применение утепленного дренажа мелкого заложения глубиной не менее двух метров возможно при значениях среднегодовой температуры воздуха до минус 3 °С. При более низких среднегодовых температурах и других грунтовых условиях требуется увеличение глубины заложения или изменение конструкции дренажа.

Предложенная методика расчетов позволяет определить основные зависимости теплотехнических параметров дренажей от свойств материала и конструктивных характеристик противоналедных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клочков Я.В. Способ регулирования подземных вод в основании дорог / Я.В. Клочков, Н.П. Сигачев // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2015. – № 8(123). – С. 12-19.
2. Кондратьев В.Г. Наледная опасность на территории Читинской области и возможные пути ее снижения / В.Г. Кондратьев, В.М. Пестов // Вестник МАНЭБ. – 2001. – № 10 (34). – С. 154-158.

3. Пат. № 2014139364/03 Российская Федерация, МПК E01D 19/08 (2006.01). Способ безналедного пропуска воды в подмостовых руслах малых мостов / Сигачев Н.П., Клочков Я.В, Непомнящих Е.В., Коновалова Н.А.; патентообладатель ООО "Транс-GeoЦентр". – № 2014139364/03; заявл. 29.09.2014; опубл. 10.07.2016. – Бюл. № 19. – 6 с.
4. Сигачев Н.П. Вспененные теплоизоляционные материалы на основе цеолитосодержащего сырья Забайкальского края / Н.П. Сигачев, Н.А. Коновалова, Е.В. Непомнящих. В кн.: Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Иркутск, 2014. – С. 177-182.
5. Клочков Я.В. Совершенствование методики расчета и регулирования температурного режима обводненных грунтовых оснований: дис.... канд. техн. наук: 05.23.11: защищена 05.03.2016 / Клочков Яков Владимирович. – Хабаровск: ТОГУ, 2015. – 125 с.
6. Носов В.П. Прогнозирование повреждений жестких слоев дорожных одежд на основе математического моделирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.11: защищена 06.03.1997 / Носов Владимир Петрович. – М.: МАДИ, 1997. – 412 с.
7. Рувинский В.И. Прогнозирование водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог для обоснования специальных методов его регулирования в районах с сезонным промерзанием: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.04 / Рувинский Владлен Изотович. – М.: МАДИ, 1987. – 490 с.
8. Кондратьев К.Я. Радиационный расчет наклонных поверхностей / К.Я. Кондратьев, З.И. Пивоварова, М.П. Федорова – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 216 с.
9. Бринкфорт Б. Дж. Солнечная энергия для человека / Пер. с англ. – М: Мир, 1976. – 291 с.
10. Кондратьев К.Я. Лучистая энергия Солнца / К.Я. Кондратьев. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 600 с.
11. Kazantsev V.V. Is the thermal regime of permafrost determined by solar rhythms // Cold Regions and Technology. – 1994. – November. – V. 23, Issue 1. – PP. 93-98.
12. Уонг. Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник / Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

L I T E R A T U R A

1. Klochkov Ja.V. Sposob regulirovanija podzemnyh vod v osnovanii dorog / Ja.V. Klochkov, N.P. Sigachev // Vestnik Zabajkal'skogo

- gosudarstvennogo universiteta. – 2015. – № 8 (123). – S. 12-19.
2. Kondrat'ev V.G. Nalednaja opasnost' na territorii Chitinskoj oblasti i vozmozhnye puti ee snizhenija / V.G. Kondrat'ev, V.M. Pestov // Vestnik MANJeB. – 2001. – № 10 (34). – S. 154-158.
 3. Pat. № 2014139364/03 Rossijskaja Federacija, MPK E01D 19/08 (2006.01). Sposob beznalednogo propuska vody v podmostovyh ruslah malyh mostov / Sigachev N.P., Klochkov Ja.V, Nepomnjashhij E.V., Konovalova N.A.; patentoobladatel' OOO "Trans-GeoCentr". – № 2014139364/03; zajavl. 29.09.2014; opubl. 10.07.2016. Bjul. № 19. – 6 s.
 4. Sigachev N.P. Vspenennye teploizoljacionnye materialy na osnove ceolitosoderzhashhego syr'ja Zabajkal'skogo kraja / N.P. Sigachev, N.A. Konovalova, E.V. Nepomnjashhij. V kn.: Zhiznennyj cikl konstrukcionnyh materialov (ot poluchenija do utilizacii): materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii. – Irkutsk, 2014. – S. 177-182.
 5. Klochkov Ja.V. Sovershenstvovanie metodiki rascheta i regulirovanija temperaturnogo rezhima obvodnennyh gruntovyh osnovanij: dis. kand. tehn. nauk: 05.23.11: zashhishhena 05.03.2016: / Klochkov Jakov Vladimirovich. – Habarovsk: TOGU, 2015. – 125 s.
 6. Nosov V.P. Prognozirovanie povrezhdenij zhestkih sloev dorozhnyh odezhd na osnove matematicheskogo modelirovanija: dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.23.11 : zashhishhena 06.03.1997 / Nosov Vladimir Petrovich. – M.: MADI, 1997. – 412 s.
 7. Ruvinskij V.I. Prognozirovanie vodno-teplovogo rezhima zemljanogo polotna avtomobil'nyh dorog dlja obosnovanija special'nyh metodov ego regulirovanija v rajonah s sezonnym promerzaniem: dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.23.04 / Ruvinskij Vladlen Izotovich. – M.: MADI, 1987. – 490 s.
 8. Kondrat'ev K.Ja. Radiacionnyj raschet naklonnyh poverhnostej / K.Ja. Kondrat'ev, Z.I. Pivovarova, M.P. Fedorova – L.: Gidrometeoizdat, 1978. – 216 s.
 9. Brinkfort B. Dzh. Solnechnaja jenergija dlja cheloveka / Per. s angl. – M.: Mir, 1976. – 291 s.
 10. Kondrat'ev K.Ja. Luchistaja jenergija Solnca / K.Ja. Kondrat'ev. – L.: Gidrometeoizdat, 1954. – 600 s.
 11. Kazantsev V.V. Is the thermal regime of permafrost determined by solar rhythms // Cold Regions and Technology. – 1994. – November. – V. 23, Issue 1. – PP. 93-98.
 12. Uong. H. Osnovnye formuly i dannye po teploobmenu dlja inzhenerov: cpravochnik / Per. s angl. – M.: Atomizdat, 1979. – 216 s.

**MATHEMATICAL MODELING OF HEAT AND MASS EXCHANGE
IN ANTI-ICING STRUCTURES**

Engineer E.V. Shehtman
(PII «Moszheldorproekt»),
Doctor of Engineering N.P. Sigachev,
Ph. D. (Tech.) Ya.V. Klochkov
(Institute of Natural Resources,
Ecology and Cryology, SB RAS),
Engineer Z.B. Dashinimaev
(«Zabajkalzheldorproekt»),
Engineer D.A. Grigoriev
(AO «Viljujavitodor»)
Contact information: (499) 262-51-10;
(3022) 20-61-97;
klochkov.zabirt@mail.ru

The method of ice-free water pass when underground watercourse freezing near road structures is reviewed. The mathematical model of the thermal processes in drainage systems filled with granulated foam glass is presented. Thermotechnical calculations of drainage systems in different climatic conditions are carried out. The assessment of drainage system capability to pass water depending on winter design temperatures is given.

Key words: *ice-free water pass, soil, foam glass, drainage, heat conductivity, thermotechnical calculations, mathematical modeling.*

Рецензент: д-р техн. наук А.М. Кулижников (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 23.03.2017 г.