

УДК 551.34:536.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ ТРУБОПРОВОДОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ХЛАДОСНАБЖЕНИЯ С МЕРЗЛЫМ ГРУНТОМ

Малышев А.В., Васильев С.С., Пермяков П.П., Большев К.Н.

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова
ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр» Сибирского отделения Российской академии наук,
Якутск, e-mail: a.vmalyshev@yandex.ru*

В работе приводится математическая модель теплового взаимодействия двух трубопроводов центрального хладоснабжения с массивом грунта. Модель включает в себя посуточное изменение параметров теплообмена окружающей среды. Учет фазового перехода поровой воды при промерзании и оттаивании песчаного грунта, проводится через функцию количества незамерзшей воды. Теплофизические свойства влажного песчаного грунта являются непостоянными в модели и функционально связаны с функцией количества незамерзшей воды. Граничное условие теплообмена на дневной поверхности песчаного грунта построено с учетом суммарного солнечного излучения, альбедо поверхности, скорости ветра. Данные характеристики построены на основе натуральных наблюдений в районе г. Якутска. Для численного интегрирования предложенной нами модели, применялась универсальная среда численного моделирования Comsol Multiphysics v.6.0. Основой среды является конечно-элементный метод для численного решения уравнений в частных производных. Довольно легко оказалось с помощью данной среды поставить граничные условия при вынужденной конвекции на внутренней стенке трубопровода с движущейся водой. Моделирование задачи о распространении тепла в массиве грунта рассмотрели в двумерной постановке. В качестве примера для расчета температурного поля была взята площадка в районе г. Якутска с однородным минералогическим составом близким к песчаному грунту. Результаты расчетов показывают, что температурный режим проложенных подземным путем трубопроводов центрального хладоснабжения, оказывает существенное влияние на температуру многолетнемерзлого массива грунта, т.е. приводит его к растеплению. Отсюда следует, что при такой схеме прокладки систем трубопроводов требуется провести ряд мероприятий по сохранению устойчивости и прочности многолетнемерзлого грунта.

Ключевые слова: моделирование, центральное хладоснабжение, функция незамерзшей воды, уравнение теплопроводности, солнечное тепlopоступление, массив грунта

MODELING OF THERMAL INTERACTION OF THE CENTRAL COOLING SUPPLY PIPELINE SYSTEM WITH FROZEN GROUND

Malyshev A.V., Vasilev S.S., Permyakov P.P., Bolshev K.N.

*V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: a.vmalyshev@yandex.ru*

The paper presents a mathematical model of the thermal interaction of two central cooling pipelines with an array of soil. The model includes a daily change in the parameters of the heat exchange of the environment. Accounting for the phase transition of pore water during freezing and thawing of sandy soil is carried out through the function of the amount of unfrozen water. The thermophysical properties of wet sandy soil are unstable in the model and are functionally related to the function of the amount of unfrozen water. The boundary condition of heat exchange on the daytime surface of sandy soil is constructed taking into account the total solar radiation, surface albedo, wind speed. These characteristics are based on field observations in the area of Yakutsk. For numerical integration of the model proposed by us, the universal numerical modeling environment Comsol Multiphysics v.6.0 was used. The basis of the medium is a finite element method for the numerical solution of partial differential equations. It turned out to be quite easy to use this medium to set boundary conditions for forced convection on the inner wall of a pipeline with moving water. Modeling of the problem of heat propagation in an array of soil was considered in a two-dimensional formulation. As an example, for calculating the temperature field, a site near Yakutsk with a homogeneous mineralogical composition close to sandy soil was taken. The calculation results show that the temperature regime of the central cooling supply pipelines laid underground has a significant effect on the temperature of the permafrost soil mass, i.e., leads it to thawing. It follows that with such a scheme of laying pipeline systems, a number of measures are required to preserve the stability and strength of permafrost soil.

Keywords: modeling, central cooling supply, function of the unfrozen water, thermal conductivity equation, solar heat supply, soil mass

Проектирование систем централизованного хладоснабжения в холодных регионах связано с прокладкой трубопроводов в многолетнемерзлых грунтах. Верхний деятельный сезонно-талый слой грунта в районе Якутска имеет мощность до 4 м. При подземной прокладке трубопроводов хладоснабжения, диаметры которых варьируются

от 0,1 до 0,6 м, велика вероятность их расположения в многолетнемерзлой толще. Мощность многолетнемерзлых толщ в средней полосе Республики Саха (Якутия) в отдельных местах достигает нескольких сотен метров. Температура многолетнемерзлых грунтов изменяется от 0 до -8 °С [1]. Работа системы централизованного хладоснабже-

ния с подземной прокладкой трубопроводных сетей от абсорбционной чиллерной станции до станции потребителей холода может нарушить сложившиеся до застройки мерзлотно-грунтовые, гидрогеологические и гидрологические условия. Такие нарушения приводят к проявлению опасных криогенных процессов в грунтах, таких как пучение, термопросадка, термоэрозия, подтопления и заболачивания территорий из-за нарушений поверхностного и подземного стока, что негативно воздействует на устойчивость и техническое состояние сооружений трубопроводной сети [2].

Проектирование трубопроводных сетей централизованного хладоснабжения в подземном исполнении в криолитозоне требует учета двух основных факторов.

Первый фактор – учет влияния опасных криогенных процессов на устойчивость и надежность трубопроводных систем. На этапе планирования необходимо провести мероприятия по инженерной защите мерзлых грунтов.

Второй фактор – учет теплообменных процессов, проходящих между теплоносителем центрального хладоснабжения и мерзлыми грунтами.

Целью работы является обоснование технической осуществимости подземной прокладки систем трубопроводов центрального хладоснабжения в условиях многолетне-

мерзлых грунтов на основе предложенного авторами математического моделирования теплообмена между окружающей средой, массивом грунта и трубопроводами.

Материалы и методы исследования

Математическая модель теплопереноса в промерзающем и протаивающем грунте с учетом фазовых переходов поровой влаги описывается нелинейным уравнением теплопроводности [3]:

$$C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(T) \nabla T). \quad (1)$$

В уравнении (1) коэффициенты объемной теплоемкости и теплопроводности зависят от температуры через функцию количества незамерзшей воды. Объемная теплоемкость влажного грунта в мерзлом и талом состояниях определяется согласно формулам [4]:

$$C(T) = \begin{cases} (c_s + (c_i + 8,7T)W_0)\gamma, & T < T_1 \\ (c_s + c_w W_0)\gamma, & T > T_2 \end{cases} \quad (2)$$

где c_s , c_i , c_w – удельные теплоемкости скелета грунта, льда и воды Дж/(кг×°С); W_0 – влажность грунта, %; γ – плотность сухого грунта, кг/м³; T – температура грунта, °С.

При фазовых превращениях поровой воды в лед объемная теплоемкость становится эффективной величиной и рассчитывается по следующей формуле [4]:

$$C(T) = \left[c_s + c_w W_u(T) + c_i (W_0 - W_u(T)) + L \frac{dW_u(T)}{dT} \right], \quad (3)$$

где L – скрытая теплота фазового перехода, Дж/кг; $W_u(T)$ – функция количества незамерзшей воды, ед. дол.

Теплопроводность влажного грунта в талом и мерзлом состояниях рассчитывается по предложенной А.В. Павловым формуле [3]:

$$\lambda_{th,f} = 1,163 \left[m_{th,f} (0,001\gamma + 0,1W_0 - 1,1) - 0,1W_0 \right], \quad (4)$$

где $m_{th,f}$ – параметр, определяющий тип грунта, для песчаных грунтов в талом состоянии равен 1,5, в мерзлом – 1,7.

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_{th}, & T < T_1 \\ \lambda_f, & T > T_2 \end{cases}. \quad (5)$$

В области фазовых переходов поровой влаги в лед теплопроводность рассчитывается по формуле [3]:

$$\lambda(T) = \lambda_f + \frac{(\lambda_{th} - \lambda_f)(W_u(T) - W_c)}{W_0 - W_c}, \quad (6)$$

где W_c – прочносвязанная вода, ед. дол.

Функция количества незамерзшей воды описывается кусочно-линейной зависимостью вида [3]:

$$W_u(T) = \begin{cases} W_c, & T < T_1 \\ d + \frac{W_c}{|T - 273,15|^b}, & T_1 \leq T \leq T_2 \\ A_w + \frac{(T - T_2)(W_0 - A_w)}{T_3 - T_2}, & T_2 \leq T \leq T_3 \\ W_0, & T \geq T_3 \end{cases} \quad (7)$$

где d , a , b , A_w – эмпирические коэффициенты, определяемые путем аппроксимации экспериментальных данных количества незамерзшей воды для определенного типа грунта.

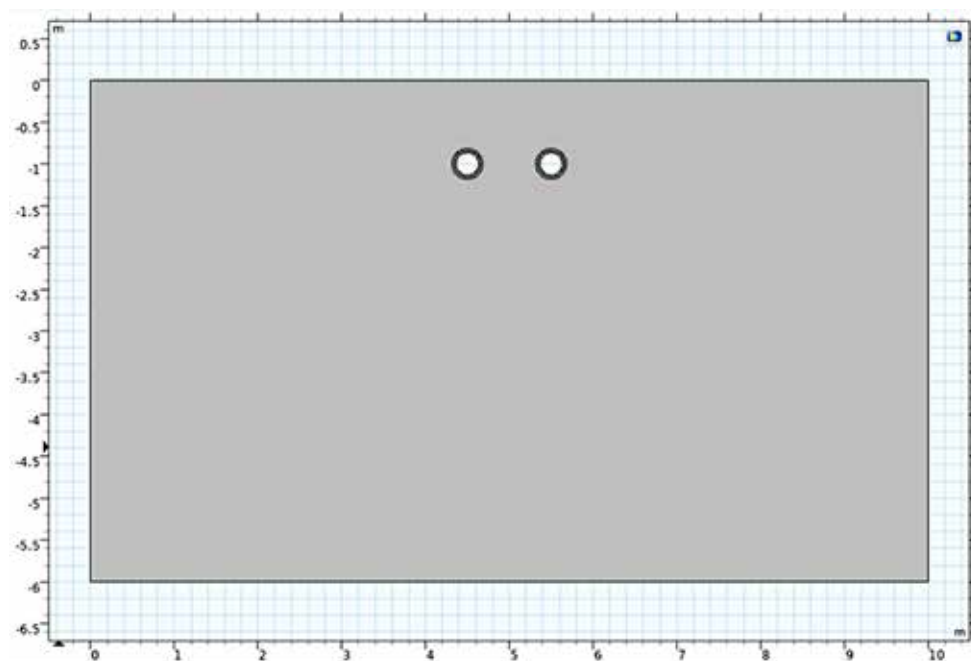


Рис. 1. Расчетная область модели

Распространение тепла в стенках обоих трубопроводов и их теплоизоляция от нагретой воды описывается системой линейных дифференциальных уравнений теплопроводности в цилиндрической системе координат [5]:

$$\begin{cases} (c\gamma)_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ (c\gamma)_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \end{cases}, \quad (8)$$

где индексами 1 и 2 обозначены зоны распространения тепла соответственно в пенополипропилене и полистироле, так как трубопровод покрыт теплоизоляционной оболочкой. Температурной зависимостью теплофизиче-

ских свойств данных материалов пренебрегаем и считаем их постоянными.

Задачу о распространении тепла в массиве грунта при наличии труб центрального хладоснабжения будем рассматривать в двумерной постановке.

Расчетная область (рис. 1) представляет собой поперечный срез массива грунта шириной 10 и глубиной 6 м с проложенными на глубине 1 м параллельно друг другу трубопроводами. Межтрубное расстояние составляет 1 м.

Для полного описания распространения тепла в массиве грунта требуется задать начальное распределение температур по глубине массива, а также определить граничные условия на дневной поверхности грунта и на двух границах внутренняя стенка – движущаяся среда (вода).

На поверхности грунта задается условие конвективного теплообмена с учетом поступления тепла от солнечного излучения [6]:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{y=0} = \alpha(t) \left[T_a(t) + \frac{Q_s(t)(1-A(t))}{\alpha_a(t)} - T(0, y, t) \right], \quad (9)$$

где $\alpha(t)$ – приведенный коэффициент теплообмена, определяемый выражением

$$\alpha(t) = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a(t)} + \frac{h_s}{\lambda_s}}, \quad (10)$$

где h_s, λ_s – толщина слоя снежного покрова и его коэффициент теплопроводности.

Таблица 1

Распределение начальной температуры по глубине грунта

$T_0, ^\circ\text{C}$	12,8	6,37	-1,26	-2,61	-3,27	-3,62	-3,66	-3,42	-3,16
$h, \text{м}$	0	-0,15	0,95	1,75	2,55	3,35	4,15	4,95	5,75

Таблица 2

Эмпирические параметры функции незамерзшей воды песчаного грунта

d	a	b	A_w	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$
0,0	4,1	7,3	0,068	-7,06	-0,65	0,0

Для проведения расчетов была использована зависимость истинной теплопроводности (без учета массообмена) снежного покрова λ_s , Вт/(м·°C) от плотности ρ_s , (г/см³) [6]:

$$\lambda_s = 1,163(0,03 + 0,303\rho_s - 0,177\rho_s^2 + 2,25\rho_s^3), \quad (11)$$

Коэффициент теплоотдачи со стороны атмосферного воздуха изменяется в зависимости от климатических условий и определяется формулой [6]:

$$\alpha_a(t) = 15,12\sqrt{v_a(t)}, \quad (12)$$

где v_a – среднемесячная скорость ветра, м/с.

На остальных границах расчетной области задаются условия отсутствия теплового потока или теплоизоляции.

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{y=H} = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{x=0} = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{x=L} = 0. \quad (13)$$

Внутри трубопровода температурное поле движущейся воды не рассчитывается, а вместо этого на внутренней стенке трубопровода задается условие вынужденной конвекции, когда движущаяся жидкость (вода) омывает внутреннюю стенку трубы с учетом скорости ее потока.

В качестве массива грунта рассматривается однородный песчаный грунт, имеющий влажность 0,15 ед. дол и соответственно плотность 1560 кг/м³. Начальное распределение

температур по глубине взято по данным замеров в районе г. Якутска на 1 июня (табл. 1).

Данные об эмпирических параметрах функции количества незамерзшей воды песчаного грунта и температурных интервалов приведены в табл. 2.

Значения температуры окружающего воздуха, скорости ветра, альбедо поверхности и суммарной солнечной радиации усреднялись по месяцам для условий г. Якутска, приведены в табл. 3.

Геометрические параметры трубопроводов: внутренний диаметр трубопроводов и толщина стенок соответственно равны 268,6 и 23,2 мм. Трубопроводы покрыты теплоизоляционной оболочкой толщиной 25,4 мм. Источником теплоты является нагретая вода, текущая в трубопроводе в прямом и обратном направлениях. Температура воды в прямом направлении составляет 5 °C, а в обратном – 15 °C. Скорость потока воды в трубопроводах задавалась равной 1,06 м/с. Теплофизические свойства для полипропиленовой трубы и теплоизоляционной оболочки взяты из [7, 8].

Таблица 3

Среднемесячные значения температуры воздуха, скорости ветра, суммарной солнечной радиации и альbedo поверхности A

Параметр	Месяцы					
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
$T_a, ^\circ C$	-42,6	-35,9	-22,2	-7,2	5,8	15,4
$v_a, м/с$	1,4	1,5	2,0	2,8	3,4	3,3
$Q_s, Вт / м^2$	14,188	48,363	120,594	192,515	211,320	244,213
A	0,763	0,821	0,805	0,563	0,163	0,179
	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
$T_a, ^\circ C$	18,7	14,9	6,2	-8,0	-28,3	-39,5
$v_a, м/с$	3,0	2,8	2,6	2,5	2,0	1,3
$Q_s, Вт / м^2$	225,134	165,771	106,867	51,523	21,219	7,841
A	0,181	0,189	0,199	0,514	0,836	0,809

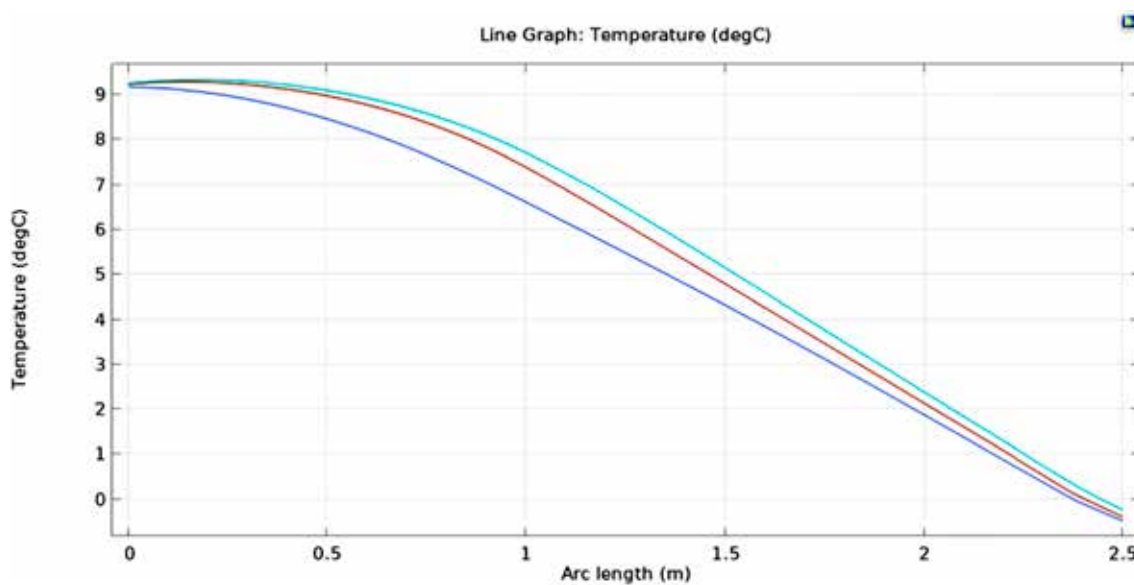


Рис. 2. Распределение температур в трех контрольных колонках в грунтовом массиве на момент времени 92 суток

Результаты исследования и их обсуждение

Расчет по поставленной модели процесса переноса тепла в массиве грунта, включающего в себя два трубопровода, проводили в программном пакете COMSOL Multiphysics 6.0 [9]. Расчеты проводились в период летнего сезона, когда активно работает система хладоснабжения, т.е. с начала июня по конец августа. Данные расчета температурного распределения по глубине массива грунта на конец августа приведены для трех контрольных колонок (рис. 2). Первая колонка (синяя кривая) расположена

слева на расстоянии 0,5 м от центра трубопровода с поступающей водой ($T_{in} = 5 ^\circ C$), вторая (красная кривая) между двумя трубопроводами на дистанции 0,5 м от центра, наконец, третья (бирюзовая кривая) находится справа от трубопровода с обратной водой ($T_{out} = 15 ^\circ C$).

Как видно из полученных расчетов, при данных температурных режимах течение воды в трубопроводах, а также геометрических параметрах и применяемой теплоизоляции для трубопроводов оказывает существенное влияние на растепление массива грунта. Так, сравнение начального распределения температур по глубине и получен-

ного в момент времени, равного 92 суткам, показывает, что температура на глубине 2,5 м поднялась с -3,2 до -0,47 °С. Причем увеличение слоя теплоизоляции до 5 см снижает растепление массива всего на 6%.

Заключение

Разработана математическая модель теплового взаимодействия окружающей среды, грунтового массива, включающего трубопроводы хладоснабжения. В модели учтены фазовые переходы «вода – лед» в грунтовом массиве при знакопеременной внешней температуре окружающей среды. В граничном условии на дневной поверхности грунта учтены среднемесячные изменения значений температуры окружающего воздуха, солнечного теплопоступления, а также альбедо дневной поверхности и скорости ветра.

Построенная математическая модель реализована в программном комплексе COMSOL Multiphysics 6.0. Расчет температурного поля массива грунта проведен в период времени, когда работает система охлаждения от чиллеров. Результаты расчетов показали, существенное влияние температуры трубопроводов хладоснабжения на растепление массива грунта: так, на границе сезонно-талого слоя и многолетней мерзлоты (глубина 2,5 м) на момент времени (92 суток) температура увеличилась на 2,7 °С.

Отсюда можно сделать следующий вывод: если планируется прокладывать сети трубопроводных систем центрального хладоснабжения подземным путем, то необходимо провести перед этим ряд мер по обеспечению сохранности температурного режима мерзлого песчаного массива грунта за счет обустройства траншей для

укладки трубопроводов лотками с эффективной теплоизоляцией или ввода в работу сезонно-действующих охлаждающих устройств.

В дальнейшем можно провести расчеты с годовыми циклами влияния окружающей среды с учетом снежного покрова и сезонной работы системы охлаждения. В модели можно учесть поступление осадков в летнее время, неравномерность влагосодержания и плотности по глубине, а также послойный состав грунта.

Список литературы

1. Павлов А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск: Якутское книжное издательство, 1975. 304 с.
2. Степанов А.В., Попенко Ф.Е., Рожин И.И. Основы инженерной защиты объектов строительства в криолитозоне. Новосибирск: Наука, 2014. 443 с.
3. Permyakov P.P., Zhirkov A.F., Zheleznyak M.N. Account for the Process of Underground Condensation in Modeling Heat and Moisture Exchange in Frozen Soils. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. September 2021. Vol. 94 (5). P. 1232–1241. DOI: 10.1007/s10891-021-02404-8.
4. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1998. 280 с.
5. Крайнов А.Ю. Основы теплопередачи. Теплопередача через слой вещества: учебное пособие. Томск: STT, 2016. 48 с.
6. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 280 с.
7. Полипропилен (ГОСТ 26996–86). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.interlens.ru/gost3.html> (дата обращения: 20.03.2022).
8. Теплопроводность строительных материалов, их плотность и теплоемкость. [Электронный ресурс]. URL: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/strojmaterialy/teplopriovodnost-stroitelnyh-materialov-ih-plotnost-i-teploemkost> (дата обращения: 20.03.2022).
9. Буркова Е.Н., Кондрашов А.Н., Рыбкин К.А. Система автоматизированных расчетов Comsol: учебное пособие. Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь, 2019. 133 с.