



УДК 621.6: 624.139

Е. Н. ГОРОХОВ, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой оснований и фундаментов¹, вед. научн. сотр.²; В. И. ЛОГИНОВ³, канд. техн. наук, доц. кафедры информатики и автоматизации производственных процессов; М. А. КОЗЛОВ², канд. техн. наук, нач. отдела моделирования и программирования; А. А. МАЛЕНОВ¹, аспирант, асс. кафедры оснований и фундаментов

**МЕТОДИКА И ПРОГРАММА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ВМЕЩАЮЩЕГО НЕФТЕПРОВОД
ГРУНТОВОГО МАССИВА ДЛЯ УСЛОВИЙ КРИОЛИТОЗОНЫ**

¹ ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-94;

эл. почта: nlg@nngasu.ru

² Научно-образовательный центр исследования экстремальных ситуаций (НОЦ ИЭС) Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

³ ФБОУ ВПО «Волжская государственная академия водного транспорта» Россия, 603600, г. Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 5.

Ключевые слова: нефтепровод, вмещающий грунтовый массив, температурный режим, методика моделирования, программа, алгоритм.

Key words: oil pipeline, containing soil stratum, conditions of temperature, modeling technique, program, algorithms.

Приводится описание методики, алгоритма и программы компьютерного моделирования температурного режима в поперечных сечениях вмещающего нефтепровод грунтового массива в криолитозоне. Сообщается о проведенных исследованиях для транспортной системы «Восточная Сибирь – Тихий океан-1» на участке Тайшет–Сковородино.

The article offers methods, an algorithm and software for a computer simulation of temperature conditions in cross-sections of a soil massive containing an oil pipeline in a permafrost zone. The researches carried out for the transport system «Eastern Siberia–Pacific Ocean-1 oil pipeline» on the Taishet–Skovorodino section are described.

Сведения, публикуемые в данной статье, являются дополнением и продолжением материала, опубликованного ранее в [18].

Во вмещающем нефтепровод грунтовом массиве процесс теплопередачи осуществляется всеми видами теплообмена: кондуктивным, конвективным и лучистым (излучением).

Для упрощения физико-математической модели теплопередачи рассматривается только кондуктивный теплообмен как преобладающий, который может быть описан уравнением теплопроводности Фурье [1, 2]:

$$(C\rho)_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где $(C\rho)_{\text{гр}}$ – объемная теплоемкость грунта; ϑ – температура грунта; $\lambda_{\text{гр}}$ – коэффициент теплопроводности грунта; t – время; x и y – Декартовы координаты.

Для грунтов, находящихся в пределах фронта замерзания – таяния поровой влаги, уравнение теплопроводности может быть записано в виде [4]:

$$(Cp)_{гр} \frac{\partial \vartheta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{гр} \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{гр} \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \rho_{л} n L \frac{\partial R}{\partial t} b, \quad (2)$$

где $\rho_{л}$ – плотность льда; n – пористость грунта; L – удельная скрытая теплота плавления льда (замерзания воды); b – степень влажности (льдистости) грунта; R – относительная льдистость грунта.

Система дифференциальных уравнений (1) и (2) дополняется зависимостями для входящих в уравнения коэффициентов:

– для коэффициента теплопроводности [4]:

$$\lambda_{гр} = \lambda_{г} + R(\lambda_{м} - \lambda_{г}), \quad (3)$$

где $\lambda_{г}$ – коэффициент теплопроводности грунта, находящегося в талом состоянии; $\lambda_{м}$ – коэффициент теплопроводности грунта, находящегося в твердомерзлом состоянии;

– для объемной теплоемкости [5]:

$$(Cp)_{гр} = (Cp)_{г} - [1 - (Cp)_{л}] \cdot R \cdot n \cdot b, \quad (4)$$

где $(Cp)_{г}$ и $(Cp)_{л}$ – объемная теплоемкость талого грунта и порового льда.

Начальное распределение температуры во вмещающем грунтовом массиве принимается по данным натурных наблюдений (данные измерений в термоскважинах) или по данным геофондов криолитозоны.

Для расчетов температурных полей и ореолов оттаивания вокруг трубопровода назначается расчетная область (рис. 1).

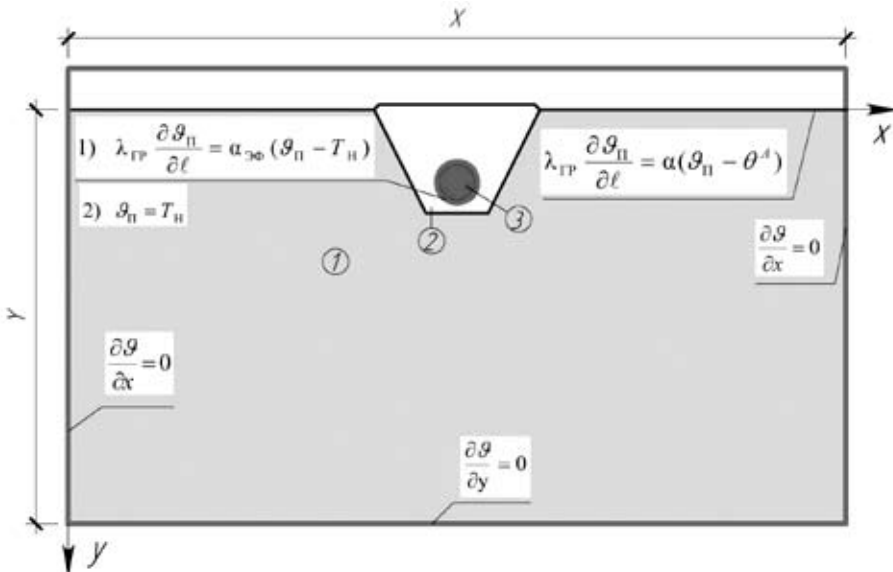


Рис. 1. Граничные условия в расчетной области вмещающего грунтового массива: 1 – вмещающий грунтовой массив; 2 – засыпка; 3 – нефтепровод

Условия теплообмена на границах расчетной области задаются следующим образом:

I. Для дневной поверхности принимается граничное условие III рода [6, 7]:



$$-\lambda_{\text{гр}} \left(\frac{\partial \vartheta_{\text{п}}}{\partial l} \right) = S_{\text{р}} + S_{\text{к}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{р}} + S_{\text{к}}$ – радиационный и конвективный теплоприток извне к поверхности грунта; $\vartheta_{\text{п}}$ – температура поверхности грунтового массива; l – расчетная глубина от этой поверхности.

Конвективный теплоприток определяется следующим образом:

$$S_{\text{к}} = \alpha (\vartheta_{\text{п}} - \theta^{\text{А}}), \quad (6)$$

где α – эффективный (когда поверхности покрыты снегом) или конвективный (когда снега нет) коэффициент теплоотдачи от атмосферного воздуха с температурой $\theta^{\text{А}}$ к поверхности грунтового массива с температурой $\vartheta_{\text{п}}$.

Конвективный коэффициент теплообмена атмосферного воздуха с дневной поверхностью вмещающего грунтового массива определяется по зависимости [8]:

$$\alpha_{\text{к}} = 0,93 \sqrt{U_1} \left(6 + \frac{6,2}{U_1^2} \right), \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}), \quad (7)$$

где U_1 – средняя за рассматриваемый период времени скорость ветра над поверхностью земли, м/с.

Эффективный коэффициент теплообмена атмосферного воздуха с дневной поверхностью вмещающего грунтового массива через слой снежного покрова определяется по формуле [9]:

$$\alpha_{\text{эф}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_{\text{сн}}} + \frac{\delta_{\text{сн}}}{\lambda_{\text{сн}}} \right)}, \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}), \quad (8)$$

где $\delta_{\text{сн}}$ – толщина снежного покрова на открытой поверхности грунта.

Коэффициент теплопроводности снега для каждого зимнего месяца определяется по зависимости [10]:

$$\lambda_{\text{сн}} = 0,0005 + 0,0019\rho_s + 0,006\rho_s^2, \text{ кал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}), \quad (9)$$

где ρ_s – плотность снега, г/см³, которая может быть определена по формуле Абэ [11]:

$$\rho_s = 185,4 \cdot 10^{0,545z}, \text{ кг}/\text{м}^3, \quad (10)$$

где z – средняя за месяц глубина снежного покрова.

Коэффициент теплообмена атмосферного воздуха с поверхностью снежного покрова $\alpha_{\text{сн}}$ при средней за Δt скорости ветра над поверхностью земли U_1 определяется по формуле Юргенса [11]:

$$\alpha_{\text{сн}} = 6,47 \cdot U_1^{0,78}, \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}). \quad (11)$$

Радиационный теплоприток определяется по формуле:

$$S_{\text{р}}' = 23,81 \cdot 10^{-5} \cdot Q_0 \cdot k(1 - A) / t, \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (12)$$

где Q_0 – суммарная за месяц (прямая и рассеянная) солнечная радиация на горизонтальную поверхность при действительных условиях облачности, Дж/м² [12, прил. 5, табл. 1]; t – продолжительность расчетного месяца, ч; k – коэффициент пересчета для поверхностей различного наклона и различной ориентации [12, табл. 5]; A – альbedo поверхности (принимается в зависимости от сезона года и

типа поверхности суши вдоль трассы нефтепровода (для примера в табл. 1 приведены значения A для трассы нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан – 1» [18]).

Т а б л и ц а 1

Альbedo поверхности для различных сезонов года ТС ВСТО-1

Сезон года		Тип поверхности	Альbedo, доли ед.
Зима		Устойчивый снежный покров на открытом пространстве	0,7
		Лес при устойчивом снежном покрове	0,45
Весна	ранняя	Неустойчивый снежный покров на открытом пространстве	0,38
		Лес при неустойчивом снежном покрове	0,25
	поздняя	В период между сходом снежного покрова и переходом средней суточной температуры воздуха через 10 °С	0,13
Лето		Открытое пространство, лиственный лес в период от весеннего перехода средней суточной температуры воздуха через 10 °С до появления снежного покрова	0,18
		Хвойный лес в период от весеннего перехода средней суточной температуры воздуха через 10°С до появления снежного покрова	0,14
Осень		Неустойчивый снежный покров на открытом пространстве	0,5
		Лес при неустойчивом снежном покрове	0,25

Примечание: альbedo поверхности по [13, табл. 114]. Тип поверхности принимается по данным аэровизуальных обследований коридора трассы ТС ВСТО-1.

II. На боковых и нижней границах расчетной области – по условию отсутствия теплообмена по направлению соответствующих осей координат (рис. 1):

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial y} = 0. \quad (13)$$

III. На внешней поверхности трубы при наличии антикоррозионного или теплоизолирующего покрытия – по условию III рода:

$$\lambda_{гр} \frac{\partial \vartheta_{п}}{\partial l} = \alpha_{эф} (\vartheta_{п} - T_{н}), \quad (14)$$

где $\lambda_{гр}$ – коэффициент теплопроводности окружающего грунта; $\vartheta_{п}$ – температура грунта на внешней поверхности покрытия; $\alpha_{эф}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи от поверхности трубы к грунту через слой покрытия (среднее значение за месяц); $T_{н} = f(t)$ – температура нефти внутри трубы (средняя за месяц) [19]; l – нормаль к поверхности трубы.



Эффективный коэффициент теплоотдачи от нефти к грунту через слой покрытия определяется по следующей формуле:

$$\alpha_{\text{эф}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_{\text{ти}}}{\lambda_{\text{ти}}} \right)}, \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}), \quad (15)$$

где $\delta_{\text{ти}}$ – толщина антикоррозионного покрытия, м; $\lambda_{\text{ти}}$ – коэффициент теплопроводности покрытия, ккал/(м·ч·град); $\alpha_{\text{эф}}$ – коэффициент теплообмена от нефти к стенке трубы.

При гидродинамически и термически стабилизированном течении капельной жидкости, какой является нефть, теплоотдача определяется следующим образом: $Nu_d = 4,36$ (т. е. критерий Нуссельта есть величина постоянная), также справедливо соотношение [7]:

$$\frac{\lambda_n}{\alpha_n d} = \frac{1}{Nu_d}, \quad (16)$$

где λ_n – коэффициент теплопроводности нефти; d – внутренний диаметр нефтепровода; α_n – коэффициент теплоотдачи от нефти к стенке нефтепровода.

Из соотношения (16):

$$\alpha_n = 4,36 \cdot \lambda_n / d, \quad (17)$$

а величина λ_n может быть найдена по формуле [7]:

$$\alpha_n = 0,121 - 0,065 \cdot 10^{-3} \cdot T_n, \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}), \quad (18)$$

где $T_n = f(t)$ – температура нефти внутри трубопровода в расчетном сечении, град (определяется расчетом, например как в [19]).

Для решения краевой задачи теплопроводности в поперечных сечениях расчетной области нефтепровода используется метод конечных разностей – метод сеток [13, 14, 15]. Коэффициенты $\lambda_{\text{гр}}$ задаются для каждого узла сетки, поэтому для получения уравнений (1) и (2) в разностном описании используется метод баланса [13, 16]. Для представлений вторых производных в уравнениях (1) и (2) используется неявная разностная схема [13, 14], а для записи производной по времени – двухслойная временная схема [17]. Конечно-разностный аналог уравнения теплопроводности Фурье (1) представляется в виде [4] (рис. 2):

$$\vartheta_{i,j}^{K+1} = \frac{\vartheta_{i,j}^K + \frac{\Delta t}{(Cp)_{i,j}} (A \cdot \vartheta_{i,j-1}^{K+1} + E \cdot \vartheta_{i,j+1}^{K+1} + B \cdot \vartheta_{i-1,j}^{K+1} + F \cdot \vartheta_{i+1,j}^{K+1})}{1 + \frac{\Delta t}{(Cp)_{i,j}} (A + E + B + F)}, \quad (19)$$

где $(Cp)_{i,j}$ – объемная теплоемкость грунта в узле i, j ; $\vartheta_{i,j}^{K+1}$ и $\vartheta_{i,j}^K$ – значения температуры в узле i, j во временных слоях $k + 1$ и k , отстоящих друг от друга на интервал времени Δt ; Δx и Δy – размеры ячеек сетки по направлению соответствующих осей координат; сеточные коэффициенты A, E, B и F представлены в табл. 2.

Таблица 2

 Коэффициенты A, E, B, F в уравнениях (19), (24) и (26)

A	$\frac{4\lambda_{i,j-1} \cdot \lambda_{i,j}}{\lambda_{i,j-1} + \lambda_{i,j}} \cdot \frac{1}{\Delta x_j (\Delta x_j + \Delta x_{j+1})}$
E	$\frac{4\lambda_{i,j+1} \cdot \lambda_{i,j}}{\lambda_{i,j+1} + \lambda_{i,j}} \cdot \frac{1}{\Delta x_{j+1} (\Delta x_j + \Delta x_{j+1})}$
B	$\frac{4\lambda_{i-1,j} \cdot \lambda_{i,j}}{\lambda_{i-1,j} + \lambda_{i,j}} \cdot \frac{1}{\Delta y_i (\Delta y_i + \Delta y_{i+1})}$
F	$\frac{4\lambda_{i+1,j} \cdot \lambda_{i,j}}{\lambda_{i+1,j} + \lambda_{i,j}} \cdot \frac{1}{\Delta y_{i+1} (\Delta y_i + \Delta y_{i+1})}$
Примечание: $\lambda = \lambda_{тр}$.	

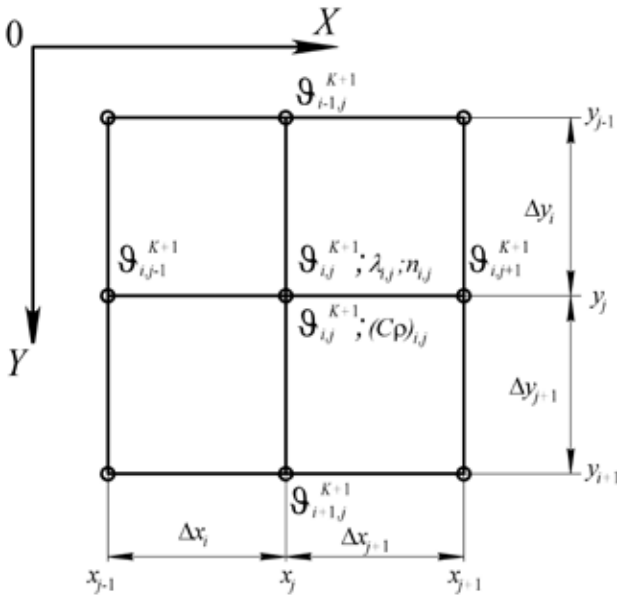


Рис. 2. Фрагмент конечно-разностной сетки

Таким образом, определение значений температуры грунта на различные моменты времени по неявной схеме сводится к решению на каждом временном шаге системы линейных уравнений (19). Для решения этой системы используется итерационный метод Зейделя [15].

При численном решении краевой задачи теплопроводности во вмещающем грунтовом массиве применяется метод сквозного счета (в одной сетке – и для талых, и для мерзлых зон массива) без явного выделения границ фазовых превращений поровой влаги.

Для учета фазовых превращений поровой влаги предполагается, что вся влага замерзает или тает при постоянной температуре, равной температуре начала замерзания (таяния) грунта ϑ_{ϕ} . Этим предположением исключается зависи-



мость льдистости грунта от температуры. Тогда уравнение (2) будет описывать процессы замерзания – таяния поровой влаги на границе между талой и мерзлой средами, и входящая в это уравнение льдистость принимает значение от нуля (для полностью оттаявшего грунта) до единицы (для полностью промерзшего грунта).

В конечных разностях уравнение (2) может представиться в следующей форме:

$$(C\rho)_{i,j} \frac{\vartheta_{i,j}^{K+1} - \vartheta_{i,j}^K}{\Delta t} = \Lambda \vartheta^{K+1} + \rho_{\text{л}} Ln_{i,j} b_{i,j} \frac{R_{i,j}^{K+1} - R_{i,j}^K}{\Delta t}, \quad (20)$$

где $\Lambda \vartheta^{K+1}$ определяется выражением:

$$\Lambda \vartheta^{K+1} = \left(A \cdot \vartheta_{i,j-1}^{K+1} + E \cdot \vartheta_{i,j+1}^{K+1} + B \cdot \vartheta_{i-1,j}^{K+1} + F \cdot \vartheta_{i+1}^{K+1} \right) - (A + B + E + F) \cdot \vartheta_{i,j}^{K+1}. \quad (21)$$

В уравнении (20) содержатся две функции, которые требуется рассчитать: $\vartheta_{i,j}^{K+1}$ и $R_{i,j}^{K+1}$. Их значения могут быть определены по методу А. В. Февралева [4]: так как изменение льдистости происходит при постоянной температуре ϑ_{Φ} , то для узлов разностной сетки, температура грунта в которых достигла этого значения, записывается

$$\vartheta_{i,j}^{K+1} = \vartheta_{\Phi_{i,j}}, \quad (22)$$

т. е. температура в этих узлах принимается постоянной до тех пор, пока не завершатся процессы замерзания – таяния влаги.

Величиной, с помощью которой контролируются процессы замерзания – таяния поровой влаги в грунте, является льдистость. Изменения значений льдистости определяются из уравнения (20) как:

$$R_{i,j}^{K+1} = R_{i,j}^K + \frac{(\vartheta_{\Phi_{i,j}} - \vartheta_{i,j}^K) \cdot (C\rho)_{i,j}}{\rho_{\text{л}} Ln_{i,j} b_{i,j}} - \frac{\Delta t \left[A \vartheta_{i,j-1} + E \vartheta_{i,j+1} + B \vartheta_{i-1,j} + F \vartheta_{i+1,j} - (A + E + B + F) \vartheta_{\Phi_{i,j}} \right]}{\rho_{\text{л}} Ln_{i,j} b_{i,j}}. \quad (23)$$

Зависимость (24) справедлива до тех пор, пока льдистость не достигнет своих крайних значений: единицы (при замерзании воды) или нуля (при таянии льда). Как только это произойдет, температура в узле сетки может быть определена из уравнения (20) при постоянном значении льдистости как:

$$\vartheta_{i,j}^{K+1} = \frac{\vartheta_{\Phi_{i,j}} + \frac{\Delta t}{(C\rho)_{i,j}} \left(A \vartheta_{i,j-1}^{K+1} + E \vartheta_{i,j+1}^{K+1} + B \vartheta_{i-1,j}^{K+1} + F \vartheta_{i+1,j}^{K+1} \right)}{1 + \frac{\Delta t}{(C\rho)_{i,j}} (A + E + B + F)} + \frac{\rho_{i,j} Ln_{i,j} b_{i,j}}{(C\rho)_{i,j}} \left(R_{i,j}^{K+1} - R_{i,j}^K \right) \frac{\Delta t}{1 + \frac{\Delta t}{(C\rho)_{i,j}} (A + E + B + F)}, \quad (24)$$

где $R_{i,j}^{K+1} = 1$ – при замерзании или $R_{i,j}^{K+1} = 0$ – при оттаивании.

Значения льдистости R в узлах сетки при сквозном счете позволяют фиксировать во времени положение ореола оттаивания.

Описанная методика математического моделирования температурно-режима реализована в разработанной авторами компьютерной программе *Tube v.2.0*.

Основная задача программы *Tube v. 2.0* состоит в расчете температурных полей, определения ореолов оттаивания под нефтепроводом и вычисления его осадки в реальном времени. Программа интегрирована в геоинформационную систему мониторинга чрезвычайных ситуаций трубопроводной системы «Восточная Сибирь – Тихий океан». Данные для работы программы формируются средствами этой системы мониторинга. Взаимодействие с геоинформационной системой осуществляется через файловую систему компьютера.

Программа *Tube v.2.0* написана на языке программирования *Visual Basic v.6.0* фирмы *Microsoft* и функционирует под управлением 32-разрядной операционной системы *Windows*. Программа функционирует как процесс операционной системы *Windows*. Это обеспечивает также автономное использование этого программного продукта для решения других задач без привлечения средств геоинформационной системы. Для работы программы требуется компьютер класса IBM PC, совместимый с тактовой частотой процессора не ниже 1 500 МГц и оперативной памятью 1 Гб. Для работы программы требуется дисковое пространство не менее 10 Гб для размещения программы и данных для выполнения прогноза температурного режима. Монитор компьютера должен поддерживать разрешение не менее $1\,024 \times 768$ (наилучшие результаты при $1\,280 \times 1\,024$ и выше при размере экрана 19 дюймов).

Методика и программа моделирования температурного режима прошли тестирование путем сопоставления данных моделирования с данными натурных наблюдений в 18-ти створах трубопроводной системы ВСТО-1, оборудованных термометрическими скважинами. При этом была получена убедительная корреляция сопоставляемых данных.

В рамках совместного контракта ННГАСУ и НОЦ ИЭС МГТУ им. Н. Э. Баумана с АК «Транснефть» в 2011 г. авторами было выполнено моделирование температурного режима для 750 км ВСТО-1 на участках с многолетнемерзлыми грунтами с шагом расчетных сечений 100÷200 м на 30-летнюю перспективу эксплуатации магистрального нефтепровода для различных режимов прокачки нефти. Из-за ограничений объема публикуемого материала сведения по тестированию методики и программы компьютерного моделирования температурного режима, а также результаты прогнозных расчетов по определению размеров оттаивания и осадки трубопроводной системы ВСТО-1 (Тайшет – Сковородино) на участках распространения многолетнемерзлых грунтов будут опубликованы в последующих номерах издания «Приволжского научного журнала».

Работа, результаты которой использованы в данной публикации, выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богословский, П. А. Расчет многолетних изменений температуры земляных плотин, основанных на толще мерзлых грунтов / П. А. Богословский // Труды Горьковского инженерно-строительного института. – Горький, 1957. – Вып. 27. – С. 123–178.



2. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М. ; Л. : ГЭИ, 1963. – 535 с.
3. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967. – 600 с.
4. Февралев, А. В. Исследование термического режима плотин на вечномерзлых грунтах при фильтрации воды : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. В. Февралев ; ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – Л., 1981. – 20 с.
5. Достовалов, Б. Н. Общее мерзлотоведение / Б. Н. Достовалов, В. А. Кудрявцев. – М. : МГУ, 1967. – 403 с.
6. Голянд, М. М. Расчеты и испытания тепловой изоляции / М. М. Голянд. – Л. : Ростехиздат, 1961. – 346 с.
7. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергия, 1969. – 736 с.
8. Павлов, А. В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР / А. В. Павлов. – Якутск : ЯКН, 1975. – 304 с.
9. Павлов, А. В. Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы / А. В. Павлов. – Новосибирск : Наука, 1980. – 240 с.
10. Жекамухов, М. К. Основы механики снега / М. К. Жекамухов, И. М. Жекамухова – Нальчик : КБУ, 2003. – 247 с.: ил.
11. Беховых, Л. А. Основы гидрофизики. / Л. А. Беховых, С. В. Макарычев, И. В. Шорина. – Барнаул : АГАУ, 2008. – 172 с.
12. Справочное пособие к СНиП23-01-99 Строительная климатология. – М. : НИИ строительной физики РААСН, 2006.
13. Кондратьев, К. Я. Актинометрия / К. Я. Кондратьев. – Л. : Гидрометеоролог. изд-во, 1965. – 691 с.
14. Тихонов, А. Н. Уравнения математической функции / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Наука, 1977. – 736 с.
15. Волков, Е. А. Численные методы / Е. А. Волков. – М. : Наука, 1982. – 256 с.
16. Беляев, Н. М. Методы нестационарной теплопроводности / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. – М. : Высш. шк., 1987. – 328 с.
17. Коздоба, Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л. А. Коздоба. – М. : Наука, 1975. – 227 с.
18. Горохов, Е. Н. Обеспечение экологической безопасности нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» на участках, проложенных в многолетнемерзлых грунтах / Е. Н. Горохов, Е. В. Копосов, С. В. Соболев, В. И. Ларионов, М. А. Козлов, А. А. Маленов // Приволжский научный журнал / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород, 2011. – № 3. – С. 158–164.
19. Проведение тепло-гидравлических расчетов трубопровода ВСТО (участок «Тайшет-Сковородино») для производительности 15, 30 и 45 млн т/год : отчет по тепло-гидравлическим расчетам (Тайшет – Сковородино). – Уфа : Уфажидротрубопровод, 2009. – 53 с.
20. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах : строит. нормы и правила : утв. Госстрой СССР 21.12.88 : взамен СНиП II-18-76 : введ. в действие 01.01.90 / Госстрой России. – Изд. офиц. – М. : ГУП ЦПП, 2001. – 52 с. : ил.

© **Е. Н. Горохов, В. И. Логинов, М. А. Козлов, А. А. Маленов, 2011**

Получено: 29.10.2011 г.