Прогнозирование теплового взаимодействия участка подземного трубопровода с льдистыми грунтами

М.В. Николаева¹, Г.П. Стручкова²

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова

²Институт физико-технических проблем Севера СО РАН

В статье выполнен прогнозный расчет теплового взаимодействия подземного трубопровода с льдистыми и сильнольдистыми грунтами. Для описания теплового взаимодействия трубопровода с многолетнемерзлыми грунтами выбрана энтальпийная модель Кроника. Результаты расчета глубины протаивания и тепловой осадки показали, что значение осадки трубопровода зависит от ореола протаивания и льдистости грунта, при этом необходимо учитывать изменение типов грунтов вдоль трубопровода.

Ключевые слова: подземный трубопровод, многолетнемерзлые грунты, термомеханическая модель, льдистость.

Forecasting the thermal interaction of underground pipeline with ice grounds

M.V. Nikolaeva¹, G.P. Struchkova²

¹North-East Federal University. M.K. Ammosov

²Institute of Physical and Technical Problems of the North of the SB RAS

In the article a predictive calculation of underground pipeline with icy and strongly-hardy soils thermal interaction was carried out. To describe the thermal interaction of the pipeline with permafrost soils the enthalpy Kronik model was chosen. The results of calculating the depth of thawing and thermal deposition have shown that the value of the pipeline sludge depends on the thawing and iceiness of the soil, while the change in soil types along the pipeline must be taken into account.

Key words: underground pipeline, permafrost soils, thermomechanical model, ice content.

Изменение температурного поля многолетнемерзлых грунтов является главным фактором активизации негативных геокриологических процессов, которые влияют на прочность сооружений, в особенности на прочность протяженных линейных объектов. Прогноз взаимодействия подземных трубопроводов с многолетнемерзлыми грунтами является актуальной задачей для обеспечения безопасности и надежности функционирования трубопроводных систем.

Процесс распространения тепла в грунтовом массиве с учетом фазовых переходов описывается уравнением:

$$\rho_d(C_{th(f)} + L_0 \frac{\partial W_w}{\partial T}) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{th(f)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_v \quad (1)$$

где ρ_d – плотность сухого грунта, $C_{th(f)}$ - удельная теплоемкость грунта (талого или мерзлого), L_0 - теплота фазовых превращений вода-лед, W_w - влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды, T – температура, t - время, $\lambda_{th(f)}$ – теплопроводность грунта (талого или мерзлого), x, y - координаты, q_v – мощность внутренних источников тепла.

Для описания теплового взаимодействия трубопровода с многолетнемерзлыми грунтами выбрана энтальпийная модель Кроника [1], учитывающая переменность характеристик грунтов в зависимости от изменения их температуры, изменение тепловой энергии, сохраненной в грунте в процессе промерзания-протаивания с изменения температуры грунта. Величина энтальпии является непрерывной функцией во всем спектре температур и включает тепловой эффект фазовых переходов.

Рис.1. Термомеханическая модель грунта Я.А. Кроника.

T_{bf} соответствует температуре начала замерзания грунта.

$T_{z.c.}$ соответствует температуре начала замерзания связанной воды.

Предложенная термомеханическая модель грунта описывает зависимость изменения теплоемкости, теплопроводности и энтальпии от температуры следующим образом:

I - зона талого грунта

Теплоемкость и теплопроводность талого грунта принимаются постоянными при $T_{th} > T_{bf}$:

$$C_I = C_{th} = const \quad (2)$$

$$\lambda_I = \lambda_{th} = const \quad (3)$$

II – зона фазовых переходов в промерзающих-оттаивающих грунтах

Теплоемкость и теплопроводность грунта в этой зоне принимаются зависящими от температуры грунта $T_{bf} \leq T \leq T_{3.c}$.

$$C_{II} = C_{th} - \frac{(C_{th}-C_f)(T_{bf}-T)}{(T_{bf}-T_f)} + \frac{L\rho_d(w-w_H)}{T_{bf}-T_{3.c}} \quad (4)$$

где

$$\lambda_{II} = \lambda_{th} - \frac{(\lambda_{th}-\lambda_f)(T_{bf}-T)}{(T_{bf}-T_f)} \quad (5)$$

III – зона промерзающего-оттаивающего грунта, при этом количество незамерзшей воды близко к количеству прочносвязанной воды

Теплоемкость и теплопроводность грунта в этой зоне принимаются также зависящими от температуры грунта $T_{3.c.} \leq T \leq T_f$.

$$C_{III} = C_f + \frac{(C_{th}-C_f)(T-T_f)}{(T_{bf}-T_f)} + \frac{L\rho_d dw}{dT} \quad (6)$$

где

$$\lambda_{III} = \lambda_f + \frac{(\lambda_{th}-\lambda_f)(T-T_f)}{(T_{bf}-T_f)} \quad (7)$$

IV – зона мерзлого грунта с температурой от T_f и ниже.

В этой зоне теплоемкость и теплопроводность мерзлого грунта принимаются постоянными:

$$C_{IV} = C_f = const \quad (8)$$

$$\lambda_{IV} = \lambda_f = const \quad (9)$$

На основе экспериментальных исследований определены расчетные температуры замерзания грунтов, °C(табл. 1) [2-4].

Таблица 1. Расчетные температуры замерзания грунтов

Грунт	Температура				
	начала замерзания грунта			начала заморозания связанной воды	практически мерзлого состояния
	переувлажненного, рыхлого, (плотность $\gamma_{ск} = 1,0 - 1,49 \text{ г/см}^3$)	средней влажности, плотного (плотность $\gamma_{ск} = 1,50 - 1,79 \text{ г/см}^3$)	маловлажного, переуплотненного, (плотность $\gamma_{ск} \geq 1,80 \text{ г/см}^3$)		
				окончания интенсивных фазовых переходов	

Пески мелкие и пылеватые, супеси, крупнообломочные с супесчаным заполнителем	-0,05	-0,10	-0,15	-0,40	-3,0	-5,0
Суглинки, крупнообломочные с суглинистым заполнителем	-0,10	-0,20	-0,30	-0,50	-5,0	-7,0

Исходные параметры определены применительно к природно-климатическим условиям Якутии. Среднемесячная температура окружающей среды представлена в табл. 2.

Таблица 2

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-38,6	-33,8	-20,1	-4,8	7,5	16,4	19,5	15,2	6,1	-7,8	-27	-37,6

За начало эксплуатации был принят сентябрь, продолжительность эксплуатации – 10 лет.

В тепловом расчете численно решалась задача по определению ореола оттаивания вокруг подземного нефтепровода в поперечном сечении в двумерной постановке.

Процесс распространения тепла в грунтовом массиве с учетом фазовых переходов описывается уравнением (1).

Задача рассматривается в прямоугольной области, на границах которого задаются граничные условия:

1. На боковых и нижней границах отсутствует теплообмен:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0; \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

2. На верхней границе учитывается влияние атмосферного воздуха.

Конвективный коэффициент атмосферного воздуха с дневной поверхностью грунтового массива определяется по следующей формуле [5]:

$$\alpha_k = 0,93\sqrt{U} \left(6 + \frac{6,2}{U^2}\right) \quad (11)$$

где α_k - конвективный коэффициент, U - средняя скорость ветра над поверхностью земли, за рассматриваемый промежуток времени.

Коэффициент теплообмена атмосферного воздуха с поверхностью грунтового массива определяется по формуле [6]:

$$\alpha_{эф} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_{сн}} + \frac{\delta_{сн}}{\lambda_{сн}}\right)} \quad (12)$$

где $\alpha_{\text{эф}}$ - коэффициент теплообмена, $\delta_{\text{сн}}$ - высота снежного покрова на поверхности грунтового массива.

Коэффициент теплопроводности снега определяется по следующей формуле [7]:

$$\lambda_{\text{сн}} = 0,0005 + 0,0019\rho_s + 0,006\rho_s^2 \quad (13)$$

где $\lambda_{\text{сн}}$ - коэффициент теплопроводности снега, ρ_s - плотность снега, рассчитываемая по формуле Абе [8]:

$$\rho_s = 185,4 \cdot 10^{0,545z} \quad (14)$$

где z - средняя за месяц высота снежного покрова.

Коэффициент теплообмена атмосферного воздуха с поверхностью снежного покрова определяется по формуле Юргенса [8]:

$$\alpha_{\text{сн}} = 6,47 \cdot U^{0,78} \quad (15)$$

Расчеты производятся с учетом температуры нефти по длине трубопровода, физико-механических характеристик и температуры вмещающих грунтовых массивов и региональных природно-климатических характеристик. Задача решается методом конечных элементов, размер расчетной области – 80х20 м, размер шагов сетки – 0,1 м. Для обеспечения достаточной точности решения шаг расчета по времени составляет 10 дней.

При расчете температура нефти принята постоянной (температура 10°C), теплоизоляция трубопровода отсутствует.

Физико-механические и теплофизические свойства грунтов принимаются по СНиП [9].

По результатам теплового расчета ведется расчет тепловой осадки мерзлого грунта с учетом глубины протаивания, сжимаемости и нагрузки на мерзлый грунт [10]:

$$s_{th} = k_0\xi + \alpha(P_{\text{гр}} + 0,5\rho_{\text{ск}}(1 + w)\xi)\xi \quad (16)$$

где s_{th} - значение тепловой оадки, k_0 - коэффициент оттаивания мерзлых грунтов, α - коэффициент сжимаемости, ξ – ореол оттаивания грунта в основании трубопровода, $P_{\text{гр}}$ – давление на оттаявший грунт, $\rho_{\text{ск}}$ - плотность грунта, w – льдистость грунта.

Рассмотрены два типа грунтов (суглинок и супесь) с различными значениями льдистости (льдистые и сильнольдистые).

Тип грунта - суглинок плотностью 1400 кг/м³; теплопроводностью талого грунта 0,46 Вт/м*°C; теплопроводностью мерзлого грунта 1,39 Вт/м*°C; объемной теплоемкостью талого грунта 1,6*10⁶ Дж/м³*°C; объемной теплоемкостью мерзлого грунта 1,47*10⁶ Дж/м³*°C; температура начала замерзания грунта -0,1 °C; температура начала замерзания связанной воды -0,5 °C; теплота фазовых превращений вода-лед 335000 кДж/м³.

Термомеханическая модель суглинка при льдистости $i=0,2$, описывающая изменения теплоемкости c , теплопроводности λ и энтальпии H от температуры выглядит следующим образом:

Рис.2. Термомеханическая модель суглинка при льдистости $i=0,2$.

Термомеханическая модель суглинка при льдистости $i=0,4$, описывающая изменения теплоемкости c , теплопроводности λ и энтальпии H от температуры:

Рис.3. Термомеханическая модель суглинка при льдистости $i=0,4$.

Результаты расчета глубины протаивания и осадки суглинка при значениях льдистости $i=0,2$ и $i=0,4$ приведены в таблице 3.

Таблица 3. Глубина протаивания и осадка суглинка при значениях льдистости

Продолжительность эксплуатации, лет	Глубина протаивания, м		Тепловая осадка, м	
	$i=0,2$	$i=0,4$	$i=0,2$	$i=0,4$
5	2,6	2,0	0,31	0,35
10	3,1	2,7	0,37	0,45

Тип грунта – супесь плотностью 1400 кг/м^3 ; теплопроводностью талого грунта $0,93 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$; теплопроводностью мерзлого грунта $1,05 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$; объемной теплоемкостью талого грунта $1,89 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$; объемной теплоемкостью мерзлого грунта $1,74 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$; температура начала замерзания грунта $-0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$; температура начала замерзания связанной воды $-0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$; теплота фазовых превращений вода-лед 335000 кДж/м^3 .

Термомеханическая модель супеси при льдистости $i=0,2$, описывающая изменения теплоемкости c , теплопроводности λ и энтальпии H от температуры:

Рис.4. Термомеханическая модель супеси при льдистости $i=0,2$.

Термомеханическая модель супеси при льдистости $i=0,4$, описывающая изменения теплоемкости c , теплопроводности λ и энтальпии H от температуры:

Рис.5. Термомеханическая модель супеси при льдистости $i=0,4$.

Результаты расчета глубины протаивания и осадки супеси при значениях льдистости $i=0,2$ и $i=0,4$ приведены в таблице 4.

Таблица 4. Глубина протаивания и осадка супеси при различных значениях льдистости

Продолжительность эксплуатации, лет	Глубина протаивания, м		Тепловая осадка, м	
	$i=0,2$	$i=0,4$	$i=0,2$	$i=0,4$
5	3,6	3,0	0,32	0,44
10	4,5	4,0	0,41	0,60

Значение осадки трубопровода зависит от ореола протаивания и льдистости грунта.

При решении задач теплового взаимодействия подземного трубопровода с многолетнемерзлыми грунтами необходимо обратить особое внимание на определение теплофизических параметров мерзлого и талого грунта, свойства которого сильно зависят от значения льдистости и температуры. В сильнольдистых грунтах расчетное значение глубины протаивания наименьшее, поскольку значительная часть тепла от трубопровода затрачивается на фазовое превращение «вода-лед», однако протаивание сильнольдистых грунтов приводит к наибольшей осадке.

Результаты расчета глубины протаивания и тепловой осадки показывают, что необходимо учитывать изменение типов грунтов вдоль трубопровода. При этом расчет режимов работы трубопровода не может производиться по средним параметрам грунта, а должен выполняться для каждого участка с учетом смены типа грунтов и их состояния.

Список использованной литературы

1. Кроник Я.А. Термомеханические модели мерзлых грунтов и криогенных процессов. В сб.: Реология грунтов и инженерное мерзлотоведение. АН СССР. М. «Наука», 1982, с.200-212.
2. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973.
3. Цытович Н.А., Нерсесова З.А. Фазовый состав воды в мерзлых грунтах. – В кн. Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1957, сб.3, с.14-20.
4. Ершов Э.Д., Акимов Ю.П., Чеверев В.Г. и др. Фазовый состав влаги в мерзлых грунтах. М.: Изд-во МГУ, 1979.
5. Павлов А. В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР / А. В. Павлов. – Якутск: ЯКН, 1975. – 304 с.
6. Павлов, А. В. Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы / А. В. Павлов. – Новосибирск: Наука, 1980. – 240 с.
7. Жекамухов, М. К. Основы механики снега / М. К. Жекамухов, И. М. Жекамухова – Нальчик: КБУ, 2003. – 247 с.
8. Беховых, Л. А. Основы гидрофизики. / Л. А. Беховых, С. В. Макарычев, И. В. Шорина. – Барнаул: АГАУ, 2008. – 172 с.
9. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.
10. Пермяков П.П., Аммосов А.П., Попов Г.Г. Оценка величины пучения и осадка линейных сооружений в мерзлых грунтах. - Минск: 14-й Минский международный форум по тепломассообмену. ГНУ «ИТМО им. А.В. Лыкова», 2012.

Авторы

Николаева Мария Валентиновна - старший преподаватель кафедры нефтегазового дела, ФГАОУ ВО "Северо-Восточный федеральный университет имени М.К.Аммосова", г. Якутск, Россия

e-mail: mnikolaeva1990@gmail.com

(подпись)

Стручкова Галина Прокопьевна - ведущий научный сотрудник ФГБУН "Институт физико-технических проблем Севера", г. Якутск, Россия

e-mail: g.p.struchkova@iptpn.ysn.ru

(подпись)