

УДК 550.34:622.692.4:536.2:519.87

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ГРУНТА ВОКРУГ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА И ЕГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

П. А. Новиков¹, В. И. Ларионов¹, С. П. Суцев¹, В. Л. Якушев², И. С. Никитин²

¹ *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,*
novikov-p-a@bmstu.ru

² *Институт аналитического приборостроения РАН, yakushev@icad.org.ru*

Исследуется влияние ряда природных и техногенных факторов на протекание процесса теплового взаимодействия трубопровода с многолетнемерзлыми грунтами. Предложена математическая модель, описывающая температурный режим грунта, осадку оттаивающего грунта и планово-высотное положение трубопровода. Расчет температурного режима грунтового массива, окружающего трубопровод, основан на решении уравнения теплопроводности, учитывает тепловое взаимодействие трубопровода и многолетнемерзлых грунтов, теплообмен на поверхности грунта, теплообмен фазовых превращений поровой влаги. При моделировании изменения положения и напряженного состояния трубопровод рассматривается как упругая балка бесконечной длины, находящаяся под действием комплексных нагрузок.

Сделаны оценки погрешности расчетов теплового и механического взаимодействия трубопровода с грунтом при определении температурного поля окружающего грунта, положения границы ореола оттаивания и напряженного состояния нефтепровода. Погрешность оценивается на основе анализа данных, полученных расчетным и экспериментальным способами. Полученный уровень погрешности позволяет применять рассмотренную математическую модель на практике для оценки напряженного состояния трубопровода на участках многолетнемерзлых грунтов при долгосрочном прогнозировании. На основе математической модели возможно выявление опасных участков нефтепровода, проложенного в мерзлых грунтах, а также планирование объемов работ на разных отрезках трассы.

Ключевые слова: магистральный нефтепровод, многолетнемерзлые грунты, ореол оттаивания, математическое моделирование.

PERMAFROST OIL PIPELINE SOIL TEMPERATURE FIELD AND STRESS-STRAIN STATE ANALYSIS ERROR ESTIMATION

P. A. Novikov¹, V. I. Larionov¹, S. P. Sushchev¹, V. L. Yakushev², I. S. Nikitin²

¹ *Bauman State Technical University, novikov-p-a@bmstu.ru*

² *Institute for Analytical Instrumentation RAS, yakushev@icad.org.ru*

The effects of some natural and artificial factors on the thermal interaction between a pipeline and permafrost soil has been studied. A mathematical model describing the soil temperature profile, thawed soil subsidence and pipeline elevation has been proposed. A temperature profile of the soil around the pipeline has been determined through solving the heat conductivity equation. The analysis accounts for the thermal interaction between the pipeline and permafrost soil; soil surface heat exchange; and porous moisture phase transformation heat exchange. For displacement and stress-strain analysis a pipeline has been represented as an elastic endless beam exposed to complex loads.

The thermal and mechanical pipeline to soil interaction analysis accuracy has been estimated as the surrounding soil temperature field, the thaw halo border, and the pipeline stress-strain state is

determined. The error is estimated by analyzing the data obtained analytically and through experiments. The obtained accuracy is sufficient to apply the proposed model for long-term stress-strain state analysis of a pipeline in permafrost. The model can identify vulnerable permafrost pipeline sections, and forecast the scope of work for each pipeline segment.

Keywords: major pipeline, permafrost soil, thaw halo, mathematical modeling.

Введение

В целях повышения эффективности применения существующих способов обеспечения безопасности подземных нефтепроводов на участках прокладки с многолетнемерзлыми грунтами, часто проводится моделирование теплового и механического взаимодействия трубопровода с грунтом [1]. Современные программные средства моделирования прочности трубопровода на участках многолетнемерзлых грунтов (далее – ММГ), обеспечивают возможность долгосрочного прогнозирования ореола оттаивания [2] с учетом осадки грунта совместно, с оценкой напряженно-деформированного состояния линейной части протяженных участков. При этом, крайне важным практическим аспектом проведения таких долгосрочных прогнозных расчетов является понимание их точности. Это связано с тем, что интенсивность теплового воздействия трубопровода на грунт зависит от ряда факторов: изменение природно-климатических условий в полосе строительства трубопровода; характеристики трубопровода; режимы его эксплуатации; физико-механические и теплофизические свойства грунта; категория и параметры ММГ [3] и т. д. Их невозможно полноценно учесть на всей протяженности трубопровода. В работе [4] посредством проведения численных экспериментов исследовалось влияние ряда природных и техногенных факторов на протекание процесса теплового взаимодействия трубопровода с многолетнемерзлыми грунтами.

В данной работе сделана оценка погрешности расчетов теплового и механического взаимодействия трубопровода с грунтом в части определения температурного поля окружающего грунта, положения границы ореола оттаивания и напряженного состояния нефтепровода. Погрешность оценивается на основе анализа данных, полученных расчетным и экспериментальными способами.

Математическая модель

Для получения параметров ореола оттаивания и напряженного состояния нефтепровода в многолетнемерзлых грунтах была выбрана математическая модель долгосрочного прогнозирования ореола оттаивания на участках распространения многолетнемерзлых грунтов с учетом смещения источника тепла, основанная на совместном определении: температурного режима, вмещающего трубопровод грунтового массива, размеров ореола оттаивания, осадки грунта, изменения пространственного положения и напряженно-деформированного состояния нефтепровода [5]. Выбор такой модели связан с тем, что решение задачи теплового взаимодействия трубопровода с грунтом в двухмерной постановке позволяет увеличить скорость прогнозных расчетов. Математическая модель представляет собой систему уравнений, описывающую температурный режим грунта, осадку оттаивающего грунта и плано-высотное положение трубопровода.

Температурный режим грунта:

$$(C\rho)_{\text{тр}} \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{тр}} \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{тр}} \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial y} \right) + \rho_{\text{л}} n b L \frac{\partial R}{\partial t}$$

$$\frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial y} = 0$$

$$-\lambda_{\text{тр}} \left(\frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial x} (B_1) \cos \alpha_1 + \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial y} (B_1) \cos \beta_1 \right) = S_{\text{п}}(t) + S_{\text{к}}(t)$$

$$\lambda_{\text{тр}} \left(\frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial x} (B_2) \cos \alpha_2 + \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial y} (B_2) \cos \beta_2 \right) = \alpha_{\text{эф}} (T_{\text{п}} - T_{\text{тр}}(t))$$

Осадка оттаивающего грунта:

$$S(t) = S_{\text{th}}(t) + S_p(t)$$

$$S_{\text{th}}(t) = \sum_{i=1}^{n(t)} (A_{\text{th},i} + \delta_i \sigma_{\text{zg},i}) h_i$$

$$S_p(t) = p_0 b k_h \sum_{i=1}^{n(t)} \delta_i k_{\mu,i} (k_i - k_{i-1})$$

Плано-высотное положение трубопровода:

$$E J_y \frac{d^4 u}{dz^4} - N(z) \frac{d^2 u}{dz^2} = q_x(z, t)$$

$$E J_x \frac{d^4 v}{dz^4} - N(z) \frac{d^2 v}{dz^2} = q_y(z, t)$$

$$\frac{d^2 w}{dz^2} = - \frac{q_z(z)}{\pi D E \delta_{\text{т}}}$$

В этой системе уравнений приняты обозначения:

$(C_p)_{\text{гр}}$ – объемная теплоемкость грунта; $T_{\text{гр}}$ – температура грунта;

t – время; $\lambda_{\text{гр}}$ – коэффициент теплопроводности грунта;

$\rho_{\text{л}}$ – плотность льда; n – пористость грунта;

b – степень льдистости (влажности) грунта;

L – удельная теплота плавления льда; R – относительная льдистость;

B_1 – точка грунта у дневной поверхности;

α_1, β_1 – углы между нормалью к дневной поверхности и осями x, y ;

S_p, S_k – радиационный и конвективный теплоприток к поверхности грунта соответственно;

B_2 – точка грунта у поверхности трубопровода;

α_2, β_2 – углы между нормалью к поверхности трубопровода и x, y ;

$\alpha_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи от поверхности трубопровода к грунту через слой теплоизоляции;

$T_{\text{п}}$ – температура грунта у поверхности трубопровода;

$T_{\text{тр}} = f(t)$ – температура металла наружной поверхности трубопровода;

S_{th}, S_p – составляющие осадки грунта, обусловленные действием веса оттаивающего грунта и веса трубопровода;

$n(t)$ – число выделенных при расчете слоев грунта (зависит от глубины оттаивания под трубопроводом);

$A_{\text{th},i}$ – коэффициент оттаивания, безразм.;

– коэффициент сжимаемости, кПа^{-1} , i -го слоя оттаивающего грунта;

$\sigma_{\text{zg},i}$ – вертикальное напряжение от собственного веса грунта в середине i -го слоя грунта, кПа ;

h_i – толщина i -го слоя оттаивающего грунта, м;

p_0 – вертикальное давление на грунт под трубопроводом, кПа ;

b – ширина проекции трубопровода в плане (наружный диаметр трубопровода с учетом слоя антикоррозионного покрытия), м;
 k_h, k_i, k_{i-1} – коэффициенты, определяемые по СНиП 2.02.04-88;
 δ_i – коэффициент сжимаемости i -го слоя грунта, кПа^{-1} ;
 EJ – изгибная жесткость трубопровода;
 u, v, w – смещения трубопровода в направлении осей x, y, z соответственно;
 $N(z)$ – продольное усилие;
 $q_x(z, t), q_y(z, t), q_z(z, t)$ – проекции распределенной нагрузки на трубопровод (отпора грунта) на оси x, y, z ;
 D – наружный диаметр трубопровода;
 E – модуль упругости материала труб;
 δ_T – толщина стенки труб.

Расчет температурного режима, вмещающего трубопровод грунтового массива основан на решении уравнения теплопроводности Фурье, учитывает: тепловое взаимодействие трубопровода и ММГ; теплообмен на поверхности грунта; теплообмен фазовых превращений поровой влаги; граничные условия. К исходным данным относятся: параметры трубопровода; строение грунтового массива; физико-механические и теплофизические свойства грунтов; свойства насыпного грунта; параметры ММГ, климатические данные. Тепловое взаимодействие линейной части трубопровода с грунтом рассматривается в поперечных трубопроводу сечениях грунта, что справедливо в предположении плавного изменения строения и свойств грунтов вдоль трубопровода. Осадка оттаивающего грунта [6], определяется в процессе изменения глубины оттаивания грунта под трубопроводом с учетом постепенного перемещения источника тепла в ММГ, после запуска трубопровода в эксплуатацию. При моделировании изменения планово-высотного положения и напряженного состояния, трубопровод рассматривается как упругая балка бесконечной длины, находящаяся под действием комплексных нагрузок.

Численная реализация математической модели включает применение метода конечных разностей [7] для решения уравнений, описывающих тепловое взаимодействие трубопровода с грунтом, и метода конечных элементов для решения уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние трубопровода.

Результаты расчета и сравнение с натурными данными

При выполнении прогнозных расчетов используются данные о трубопроводе и свойствах грунтового массива вдоль трассы трубопровода, а также данные, полученные в ходе геологических обследований [8] и в результате многолетних метеорологических наблюдений [9]. Основными результатами расчета являются: глубина ореола оттаивания, планово-высотное положение трубопровода, радиус изгиба трубопровода и напряжения в трубопроводе.

В качестве экспериментальных данных о развитии ореола оттаивания были использованы результаты натурных исследований ореола оттаивания для верификации и калибровки прогнозных математических моделей [8]. В ходе исследований на двух участках, действующего магистрального нефтепровода, были проведены 4 эксперимента в периоды максимального промерзания (июнь) и оттаивания (октябрь) грунтов. Основными критериями выбора участков стали их репрезентативность и наличие признаков льда, и высокольдистых отложений.

Верификация математической модели долгосрочного прогнозирования взаимодействия подземного трубопровода с мерзлым грунтом проведена путем сопоставления натуральных данных по состоянию грунтов для двух участков с результатами расчетов (рис. 1).

На этом рисунке цифрами обозначены: 1 – дневная поверхность; 2 – исходное положение трубопровода; 3 – текущее положение трубопровода (с учетом просадки грунта); 4 – граница траншеи; 5 – сезонно-талый слой; 6 – измеренная граница ореола оттаивания; 9 –

расчетное положение границы ореола оттаивания; 10 – расчетная глубина оттаивания под трубопроводом. Размер ячеек сетки 11 м.

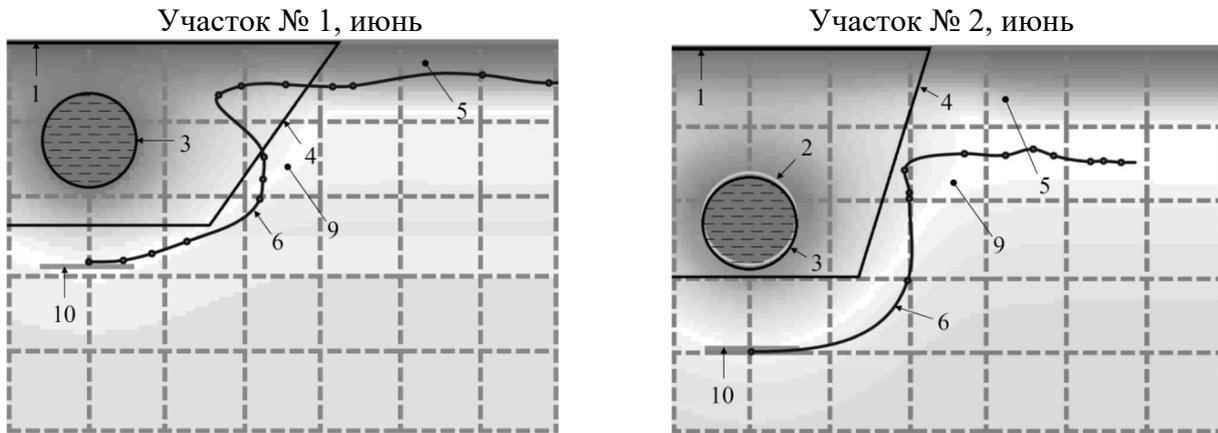


Рис. 1. Сравнение измеренного и расчетного ореолов оттаивания

Оценка погрешности расчетных значений температуры грунта в характерных точках ореола оттаивания проведена на основании выборки по данным 93 измерений температуры грунта. С надежностью 0,8, погрешность определения расчетной температуры грунта составляет $\Delta t = \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2).

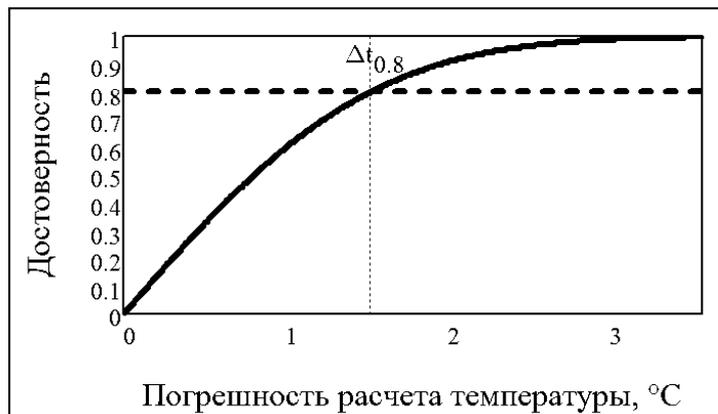


Рис. 2. Зависимость достоверности расчетных значений температуры грунта от заданной допустимой погрешности

Погрешность определения нижней границы ореола оттаивания составляет $\Delta h = \pm 9 \%$. Погрешность оценки напряжений (рис. 3), при долгосрочном прогнозировании взаимодействия трубопровода с грунтом, зависит от величины неравномерности просадки грунта [10]:

$$\Delta \sigma = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{Eq}{2J}} \frac{\Delta s_0}{\sqrt{s_0}},$$

где s_0 – неравномерность просадки, м;

Δs_0 – погрешность оценки просадки грунта, м;

J – момент инерции поперечного сечения труб, м⁴;

E – модуль упругости металла труб, Па;

q – распределенная нагрузка, действующая на трубопровод на зависшем (провисшем) участке, Н/м.

Распределенная нагрузка вычисляется согласно формуле:

$$q = \pi g \left(\rho_{cm} \delta (D - \delta) - \frac{1}{4} \rho_{np} (D - 2\delta)^2 \right)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

ρ_{cm} – плотность металла труб, кг/м³;

ρ_{np} – плотность транспортируемого продукта, кг/м³;

δ – толщина стенки труб, м;

D – наружный диаметр труб, м.

Для трубопровода с наружным диаметром 1220 мм погрешность варьируется от 42 МПа (при неравномерности просадки 0,25 м) до 17 МПа (при неравномерности просадки 1,5 м) (рис. 3).

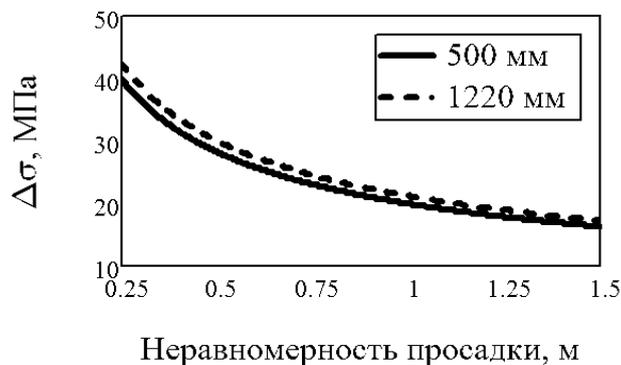


Рис. 3. Зависимость погрешности определения напряжений от прогнозируемой неравномерности осадки грунта

Выводы

Полученный уровень погрешности позволяет применять рассмотренную математическую модель на практике для оценки напряженного состояния трубопровода на участках многолетнемерзлых грунтов при долгосрочном прогнозировании. По итогам проведения анализа на основе математической модели возможно выявление и ранжирование опасных участков вдоль нефтепровода, проложенного в мерзлых грунтах, а также планирование объемов работ на разных отрезках трассы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Порхаев В. Г. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами. М. : Наука, 1970. 208 с.
2. Паздерин Д.С. Тепловое взаимодействие горячего подземного трубопровода с грунтом и сезонно-действующими охлаждающими устройствами // Нефтяное хозяйство, 2014. № 5. С. 102–104.
3. Основы геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокриология // под ред. Л. Н. Хрусталева, Э. Д. Ершова. М. : Изд-во МГУ, 1999. 518 с.
4. Novikov P., Makarycheva E., Larionov V. Model of Permafrost Thaw Halo Formation Around a Pipeline // Engineering Geology for Society and Territory / G. Lollino et al. (eds.). V. 6. Applied Geology for Major Engineering Projects. Turin : Springer, 2015. P. 405–408.

5. Новиков П. А., Александров А. А., Ларионов В. И. Оценка результатов прогнозирования ореола оттаивания вокруг трубопровода на участках с многолетнемерзлыми грунтами // Вест. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. 2013. № 1(48). С. 73–81.
6. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах: СНиП 2.02.04-88. Актуализированная редакция. Минрегион России. Введ. 01.01.2013. М. : 2012. 112 с.
7. Яницкий П. А. Расчет теплового взаимодействия коридоров коммуникаций с мерзлыми грунтами // Нефтепромысловое строительство. М. : ВНИИОЭНГ, 1981. С. 13–15.
8. Макарычева Е. М., Ларионов В. И., Новиков П. А. Экспериментальные исследования ореола оттаивания для верификации и калибровки прогнозных математических моделей // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. 2013. № 1(48). С. 109–116.
9. Савин В. К., Краснов М. И., Шубин И. Л. и др. Строительная климатология: Справочное пособие к СНиП 23-01-99* (под ред. В. К. Савина). М. : НИИ строительной физики РААСН, 2006. 258 с.
10. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы. М. : Энергия, 1978. 703 с.