

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОРЕОЛА ОТТАИВАНИЯ ВОКРУГ ТРУБОПРОВОДА НА УЧАСТКАХ С МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ

П.А. Новиков, А.А. Александров, В.И. Ларионов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: novikov-p-a@bmstu.ru; rector@bmstu.ru; lar@esrc.ru

Рассмотрена прогнозная модель формирования ореола оттаивания вокруг трубопровода при его тепловом взаимодействии с многолетнемерзлыми грунтами, проанализирована достоверность ее результатов в условиях дефицита исходных данных путем сравнения с результатами натурных обследований подземного магистрального нефтепровода.

Ключевые слова: трубопровод, многолетнемерзлые грунты, ореол оттаивания, просадка, напряженно-деформированное состояние.

ESTIMATION OF FORECASTING RESULTS OF THAWING HALO AROUND THE PIPELINE IN THE PERMAFROST AREAS

P.A. Novikov, A.A. Aleksandrov, V.I. Larionov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

e-mail: novikov-p-a@bmstu.ru; rector@bmstu.ru; lar@esrc.ru

The predictability model of thawing halo formation around the pipeline during thermal interaction with permafrost soils is described, reliability of the results is estimated by comparing with the experimental field measurements of underground main pipeline under the lack of initial data.

Keywords: pipeline, permafrost, thawing halo, subsidence, stress-strain state.

Среди факторов, формирующих напряженно-деформированное состояние (НДС) трубопроводов, взаимодействие последних с многолетнемерзлыми грунтами (ММГ) является одним из наиболее важных в связи со способностью ММГ давать значительные осадки при оттаивании. Оттаивание в процессе эксплуатации трубопровода грунтового массива на участках прокладки с многолетнемерзлыми грунтами может приводить к неравномерной просадке грунта и, как следствие, к чрезмерному изгибу трубопровода. По этой причине прокладка трубопроводов в мерзлых грунтах требует принятия специальных мер для снижения теплового воздействия трубопровода на окружающие грунты: тепловая изоляция трубопровода, установка сезонно действующих охлаждающих устройств, организация фундамента, стабилизация проектного положения трубопровода с использованием свайных опор, в редких случаях — замена подземного способа прокладки наземным или надземным.

Взаимодействие трубопроводов с ММГ на сегодняшний день остается недостаточно изученной проблемой, несмотря на существование различных методов расчета ореола оттаивания и осадки грунта

под трубопроводом. Интенсивность теплового воздействия трубопровода на грунт зависит от ряда причин, в числе которых изменение природно-климатических условий в полосе строительства трубопровода, режимы его эксплуатации, состояние грунта.

При наличии инструмента прогнозирования процесса оттаивания грунта, важным параметром которого является ореол оттаивания вокруг трубопровода, уже на этапе проектирования на ряде участков прокладки трубопровода возможно избежать применения дополнительных мероприятий без ущерба для безопасности будущей эксплуатации трубопровода. Для действующих трубопроводов указанный инструмент позволит своевременно принимать меры и разрабатывать технические решения, направленные на стабилизацию проектного положения и повышение надежности трубопровода.

Выбор инструмента прогнозирования процесса оттаивания вокруг трубопровода представляет собой серьезную задачу. Это обусловлено сложностью получения и обработки исходных данных, а также необходимостью создания прогнозной модели, адекватной особенностям трубопроводов и исходным данным для расчета, обеспечивающей приемлемую точность и предоставляющей информацию о динамике процесса оттаивания вокруг трубопровода на протяжении значительного интервала времени.

Исходные данные. Вследствие того что тепловое взаимодействие трубопровода и ММГ определяется большим количеством факторов, таких как параметры трубопровода, условия его эксплуатации, свойства грунтового массива, климатические условия и др., при прогнозировании ореола оттаивания важно определить наиболее значимые из них. Предлагаемый перечень исходных данных, необходимых и достаточных для приемлемой точности рассматриваемой модели, представлен в табл. 1.

Моделирование теплового взаимодействия системы “атмосфера–грунт–трубопровод–транспортируемый продукт”. Вмещающий трубопровод грунтовой массив представляет собой сложную неравновесную термодинамическую систему, температурный режим которой зависит не только от теплового взаимодействия трубопровода с ММГ, но и от теплообмена на поверхности грунта, который включает в себя радиационный теплообмен, кондуктивный и конвективный теплообмен между грунтом и воздухом, а также теплообмен фазовых превращений поровой влаги [1]. Помимо этого на размеры ореола оттаивания грунта вокруг трубопровода оказывает влияние множество факторов, которые в ряде случаев носят случайный характер, в их числе наличие на поверхности растительного и снежного покровов.

Перечень исходных данных для расчета ореола оттаивания

Параметры трубопровода

Температура стенки трубопровода
 Диаметр трубопровода в расчетном сечении участка (без учета слоя теплоизоляции)
 Толщина стенки трубопровода
 Толщина теплоизоляционного покрытия
 Коэффициент теплопроводности теплоизоляционного покрытия
 Геометрические параметры траншеи

Свойства грунтов на участке, свойства насыпного грунта

Мощность слоя
 Коэффициент теплопроводности талого грунта
 Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта
 Теплоемкость талого грунта
 Степень влажности грунта
 Плотность грунта
 Пористость
 Температура фазового перехода
 Тип грунта
 Коэффициент оттаивания грунта
 Коэффициент сжимаемости грунта
 Удельный вес грунта

Параметры ММГ

Мощность слоя вечной мерзлоты
 Среднегодовая температура мерзлой толщи

Климатические данные

Среднемесячная температура воздуха
 Среднемесячная скорость ветра
 Среднемесячная высота снежного покрова
 Плотность теплового потока солнечной радиации
 Коэффициент теплоотдачи от поверхности грунта к воздуху
 Альbedo (отражательная способность) поверхности

Тепловое взаимодействие трубопровода с грунтом (процесс кондуктивной теплопередачи) достаточно рассматривать в отдельных, перпендикулярных оси трубопровода сечениях грунта, что справедливо в предположении¹ плавного изменения свойств геологического профиля вдоль трубопровода. Этот процесс описывается уравнением Фурье [2]

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

где $(C\rho)_{\text{гр}}$ — объемная теплоемкость грунта; $T_{\text{гр}}$ — температура грунта;

¹Предполагается отсутствие в грунтовом массиве неоднородностей, сравнимых по размеру с диаметром трубопровода.

t — время; $\lambda_{\text{гр}}$ — коэффициент теплопроводности грунта; координатная ось x лежит в горизонтальной плоскости и перпендикулярна оси трубопровода; координатная ось y направлена вертикально.

Для грунтов, находящихся при температуре ниже температуры замедления свободной воды, уравнение теплопроводности имеет вид [3]

$$(C\rho)_{\text{гр}} \frac{\partial T_{\text{гр}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T_{\text{гр}}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\text{гр}} \frac{\partial T_{\text{гр}}}{\partial y} \right) + \rho_{\text{л}} n b L \frac{\partial R}{\partial t}; \quad (2)$$

здесь $\rho_{\text{л}}$ — плотность льда; n — пористость грунта; b — степень льдистости (влажности) грунта; L — удельная теплота плавления льда; R — относительная льдистость. Последнее слагаемое в уравнении (2) описывает выделение или поглощение теплоты при фазовых превращениях поровой влаги в грунте.

Коэффициент теплопроводности грунта определяется по формуле

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

где $\lambda_{\text{т}}$, $\lambda_{\text{м}}$ — коэффициенты теплопроводности грунта, находящегося соответственно в талом и мерзлом состояниях.

Для объемной теплоемкости справедливо соотношение

$$(C\rho)_{\text{гр}} = (C\rho)_{\text{т}} - [(C\rho)_{\text{т}} - (C\rho)_{\text{л}}] R n b, \quad (4)$$

где $(C\rho)_{\text{т}}$, $(C\rho)_{\text{л}}$ — объемные теплоемкости талого грунта и порового льда.

При прогнозировании ореола оттаивания размеры расчетной области вмещающего трубопровод грунтового массива назначаются таким образом, чтобы тепловое влияние трубопровода на вертикальных (боковых) и нижней горизонтальной границах отсутствовало. За верхнюю границу расчетной области принимается граница раздела грунта и атмосферы (дневная поверхность).

Температурный режим грунтового массива определяется не только большим количеством натуральных данных, но и наличием внешних и внутренних границ в расчетной области, что влияет на достоверность результатов расчета и значительно осложняет назначение начальных и граничных условий.

Начальное распределение температуры в грунтовом массиве принимается по данным натуральных наблюдений (данные измерений в термоскважинах при их наличии на участке) или по данным геофондов региона, в котором проложен трубопровод.

На границах расчетной области устанавливаются следующие условия теплообмена: на боковых и нижней границах — условие отсутствия теплообмена; для дневной поверхности вмещающего трубопровод грунтового массива и на внешней поверхности трубопровода при наличии теплоизоляционного слоя — граничное условие третьего рода.

На боковых и нижней границах расчетной области по условию отсутствия теплообмена

$$\frac{\partial T_{\text{гр}}}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T_{\text{гр}}}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

Для дневной поверхности вмещающего трубопровод грунтового массива принимается граничное условие третьего рода:

$$-\lambda_{\text{гр}} \left(\left. \frac{\partial T_{\text{гр}}}{\partial x} \right|_{B_1} \cos \alpha_1 + \left. \frac{\partial T_{\text{гр}}}{\partial y} \right|_{B_1} \cos \beta_1 \right) = S_p + S_k, \quad (6)$$

где 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 теплопритоки к поверхности грунта соответственно.

Радиационный теплоприток определяется по формуле

$$S_p = \frac{Q_0 k (1 - A)}{t}, \quad (7)$$

где Q_0 — плотность теплового потока суммарной (прямой и рассеянной) солнечной радиации при действительных условиях облачности; t — время; k — коэффициент пересчета для поверхностей различного наклона и разной ориентации [4]; A — альбедо дневной поверхности.

Конвективный теплоприток вычисляется по формуле

$$S_k = \alpha (T_{\text{п}} - T_{\text{а}}); \quad (8)$$

здесь α — коэффициент теплоотдачи от атмосферного воздуха к грунту; $T_{\text{п}}$ — температура грунта у дневной поверхности; $T_{\text{а}}$ — температура атмосферного воздуха.

Коэффициент конвективного теплообмена α в отсутствие снежного покрова принимается равным [5]

$$\alpha_k = 0,93 \sqrt{U} \left(6 + \frac{6,2}{U^2} \right), \quad (9)$$

где U — средняя за рассматриваемый период времени скорость ветра над поверхностью земли.

Коэффициент конвективного теплообмена α при наличии снежного покрова (эффективный) определяется из соотношения [6]

$$\alpha_{\text{эф}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_{\text{сн}}} + \frac{\delta_{\text{сн}}}{\lambda_{\text{сн}}} \right)}, \quad (10)$$

где $\alpha_{\text{сн}}$ — коэффициент теплообмена атмосферного воздуха с поверхностью снежного покрова; $\delta_{\text{сн}}$ — толщина снежного покрова; $\lambda_{\text{сн}}$ — коэффициент теплопроводности снега.

Коэффициент теплообмена атмосферного воздуха с поверхностью снежного покрова определяется по формуле Юргенса [7]

$$\alpha_{\text{сн}} = 6,47U^{0,78}. \quad (11)$$

Коэффициент теплопроводности снега для зимних месяцев вычисляется в зависимости от плотности и глубины снежного покрова:

$$\lambda_{\text{сн}} = 0,0005 + 0,0019\rho_{\text{сн}} + 0,006\rho_{\text{сн}}^2; \quad (12)$$

здесь $\rho_{\text{сн}}$ — плотность снега, определяемая по формуле Абе [7]

$$\rho_{\text{сн}} = 185,4 \cdot 10^{0,545\delta_{\text{сн}}}. \quad (13)$$

На внешней поверхности трубопровода при наличии теплоизоляции принимается условие третьего рода:

$$\lambda_{\text{гр}} \left(\frac{\partial T_{\text{гр}}}{\partial x} (B_2) \cos \alpha_2 + \frac{\partial T_{\text{гр}}}{\partial y} (B_2) \cos \beta_2 \right) = \alpha_{\text{эф}} (T_{\text{п}} - T_{\text{тр}}), \quad (14)$$

где B_2 — точка грунта у поверхности трубопровода; α_2, β_2 — углы между нормалью к поверхности трубопровода и осями 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.

Эффективный коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности металла трубы к грунту определяется по формуле

$$\alpha_{\text{эф}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{н}}} + \frac{\delta_{\text{ти}}}{\lambda_{\text{ти}}}}, \quad (15)$$

где $\delta_{\text{ти}}$ — толщина теплоизоляционного покрытия; $\lambda_{\text{ти}}$ — коэффициент теплопроводности теплоизоляционного покрытия; $\alpha_{\text{н}}$ — коэффициент теплообмена металла трубы с внутренней поверхностью теплоизоляционного покрытия.

Таким образом, тепловое взаимодействие системы “атмосфера–грунт–трубопровод–транспортируемый продукт” описывается дифференциальными уравнениями (1), (2) с учетом граничных условий (5), (6), (14). Метод конечных разностей позволяет с приемлемой точностью решать такие уравнения при наличии числовых значений всех исходных данных (см. табл. 1).

Сравнение результатов расчетов размеров ореола оттаивания вокруг трубопровода с данными натурных обследований. Рассмотрим формирование ореола оттаивания вокруг подземного магистрального нефтепровода с наружным диаметром 1220 мм на двух участках²

²Выбранные участки расположены на участках трассы трубопровода с термокарстом.

с ММГ. Продолжительность эксплуатации трубопровода составляет 3 года.

Оценку достоверности и точности результатов прогнозирования развития ореола оттаивания, полученных при помощи изложенной методики, а также обоснованности и достаточности перечня исходных данных проведем путем сравнения результатов моделирования теплового взаимодействия трубопровода и грунта с результатами натуральных обследований.

Натурное обследование каждого из выбранных участков трассы трубопровода включало обустройство шурфа, измерение температуры грунта в контрольных точках, определение границы талых и мерзлых грунтов и проводилось в два этапа — в периоды максимального промерзания и максимального оттаивания грунтовых пород³ (в июне и октябре соответственно) [8]. Результаты измерений ореола оттаивания представлены на рис. 1.

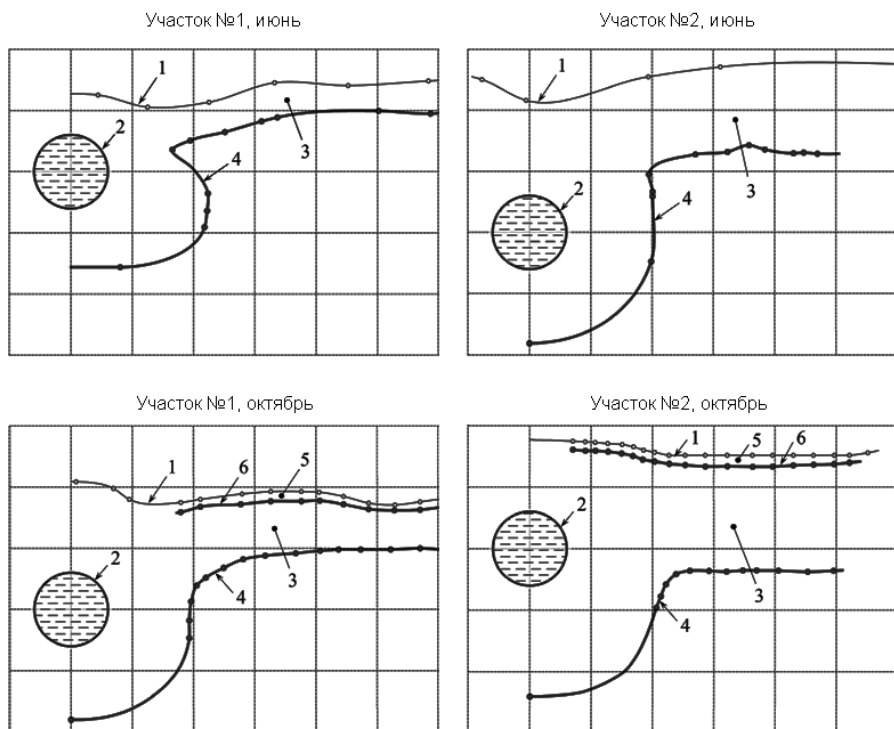


Рис. 1. Результаты измерений ореола оттаивания:

1 — дневная поверхность; 2 — трубопровод; 3 — сезонно-талый слой; 4 — граница ореола оттаивания; 5 — сезонно-мерзлый слой; 6 — граница сезонно-мерзлого слоя. Размер ячеек сетки 1 × 1 м

³Летние и осенние обследования проводились в шурфах, расположенных в однородных ландшафтных условиях, но отстоящих друг от друга на расстояние около 50 м.

Как следует из рис. 2 (4-я полоса обложки) и табл. 2, основные расчетные параметры ореолов оттаивания вокруг трубопровода, а также мерзлых массивов грунтов хорошо совпадают с результатами, полученными в процессе измерений.

Таблица 2

Сравнение расчетного и измеренного положений границы ореола оттаивания

Этап	Участок	Источник данных	Положение границы ореола оттаивания, м			
			Глубина от дневной поверхности	Расстояние от оси на уровне боковой образующей трубопровода	Глубина сезонно-талого слоя	Сезонно-мерзлый слой
I (июнь)	1	Расчет	2,90	2,60	0,90	–
		Измерение	2,84	2,12	0,52	–
		Разность	0,06	0,48	0,38	–
	2	Расчет	3,93	2,23	1,43	–
		Измерение	3,96	2,01	1,50	–
		Разность	0,03	0,22	0,07	–
II (октябрь)	1	Расчет	3,98	2,15	1,60	0,18
		Измерение	3,89	1,94	0,97	0,13
		Разность	0,09	0,21	0,63	0,05
	2	Расчет	3,48	2,20	1,87	0,18
		Измерение	3,95	2,22	1,90	0,15
		Разность	0,47	0,02	0,03	0,03

Вывод. Сопоставление фактического состояния грунтов, выявленного при натурном обследовании трубопровода, с результатами расчетов развития ореола оттаивания показало их совпадение с приемлемой точностью. Таким образом, представленная в статье методика прогнозирования развития ореола оттаивания вокруг трубопровода на участках с многолетнемерзлыми грунтами может быть рекомендована для использования при определении планово-высотного положения и оценке напряженно-деформированного состояния трубопровода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 13.G25.31.0053 от 7 сентября 2010 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лисин Ю. В., Александров А. А., Ларионов В. И., Козлов М. А. Оценка планово-высотного положения трубопровода на участках с многолетнемерзлыми грунтами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 68–79.

2. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
3. Февралев А. В. Исследование термического режима плотин на вечномёрзлых грунтах при фильтрации воды. Автореф. дис... канд. техн. наук. – Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1981. – 20 с.
4. Справочное пособие к СНиП 23-01-99. Строительная климатология / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2003. – 75 с.
5. Павлов А. В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. – Якутск: ЯКН, 1975. – 304 с.
6. Павлов А. В. Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы. – Новосибирск: Наука, 1980. – 240 с.
7. Беховых Л. А., Макарычев С. В., Шорина И. В. Основы гидрофизики. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2008. – 172 с.
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. – 2013. Сер. Естественные науки. – № 4. – С. 109–116.

Статья поступила в редакцию 10.01.2012

Новиков Павел Александрович — научный сотрудник Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных работ в области промышленной безопасности и эксплуатации опасных производственных объектов.

P.A. Novikov — researcher of the Scientific and Educational Center of Study of Extreme Situations of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 10 publications in the field of industrial safety and exploitation of dangerous industrial objects.

Александров Анатолий Александрович — д-р техн. наук, профессор. Ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 100 научных работ в области теории рисков, механики разрушения, промышленной безопасности и эксплуатации опасных производственных объектов.

A.A. Aleksandrov — D. Sc. (Eng.), professor, rector of the Bauman Moscow State Technical University. Author of about 100 publications in the field of theory of risks, fracture mechanics, industrial safety and exploitation of dangerous industrial objects.

Ларионов Валерий Иванович — д-р техн. наук, профессор, зам. директора по научной работе Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области теории рисков и промышленной безопасности потенциально опасных объектов.

V.I. Larionov — D. Sc. (Eng.), professor, deputy director for scientific work of the Scientific and Educational Center of Study of Extreme Situations of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of theory of risks and industrial safety of potentially dangerous objects.