

УДК 551.345

Оценка ореола оттаивания грунта вокруг трубопровода, проложенного в многолетнемерзлых породах

М.В. Николаева*, Г.П. Стручкова**, Т.А. Капитонова**,
Р.А. Атласов*, С.С. Бердыев*, А.Г. Иванов**

*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

**Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, г. Якутск

Описана методика оценки ореола оттаивания вокруг трубопровода при его тепловом взаимодействии с многолетнемерзлыми грунтами. Формирование температурного поля грунтового массива определяется сезонным изменением температуры наружного воздуха и тепловым воздействием транспортируемого продукта. Методом конечных элементов проанализирована динамика изменения температурного поля грунтового массива в течение 5 лет эксплуатации трубопровода для двух типов грунтов: суглинка и песка. Выявлено, что с течением времени глубина протаивания монотонно увеличивается, в песчаном грунте процесс оттаивания происходит интенсивнее. Эксплуатация трубопровода с положительной температурой усиливает процесс осадки трубопроводной системы.

Ключевые слова: трубопровод, ореол оттаивания, многолетнемерзлые грунты, температурное поле, геокриологические процессы.

Evaluation of a Thawing Halo Around Pipeline in Permafrost

M.V. Nikolaeva*, G.P. Struchkova**, T.A. Kapitonova**, R.A. Atlasov*, S.S. Berdyev*, A.G. Ivanov**

*Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk

**Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

This paper describes a method of estimating a thawing halo around pipeline at its thermal interaction with permafrost. Formation of a temperature field of soil mass is determined by seasonal changes of the ambient temperature and the effects of heat of a transported product. We used the finite element method to analyze the dynamics of the temperature field change of the soil mass within 5 years of the pipeline work for two types of soils – clay loam and sand. It is found that over the time the depth of thawing increases monotonically and that in sandy soil the thawing process goes faster. Operation of the pipeline with positive temperature enhances the process of ground subsidence under the pipeline system.

Key words: pipeline, halo thawing, permafrost, temperature field, permafrost processes.

Введение

Обеспечение устойчивости функционирования системы магистральных трубопроводов – важное условие для стабилизации и развития экономики страны. На территории России протяженность магистральных трубопроводов достигает 150 тыс. км, транспортировка продукта осуществляется под высокими эксплуатационными давлениями. Поскольку все трубопроводы

относятся к опасным производственным объектам, повышение надежности и безопасности их эксплуатации является одной из наиболее актуальных задач в нефтегазовой промышленности. Особую трудность представляет обеспечение надежности подземных трубопроводов, проложенных по территории с распространением многолетнемерзлых пород в специфических гидрогеологических и геологических условиях.

В процессе строительства и эксплуатации трубопроводов в результате взаимодействия и взаимовлияния инженерных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами происходит интенсификация и активизация опасных геокриологических процессов, наиболее распространенными из которых являются следующие [1]: криогенное пучение грунтов; наледеобразование; процессы эрозии и термоэрозии; солифлюкция и оползнеобразование; термокарст, который образуется в связи с оттаиванием

НИКОЛАЕВА Мария Валентиновна – зав. лаб., mnikolaeva1990@gmail.com; СТРУЧКОВА Галина Прокопьевна – к.т.н., в.н.с.; КАПИТОНОВА Тамара Афанасьевна – к.ф.-м.н., зав. отделом, kapitonova@iptrn.usn.ru; АТЛАСОВ Ринат Александрович – ст. преподаватель, atlasov.rinat@mail.ru; БЕРДЫЕВ Саид Сангинмуродович – ст. преподаватель, sidbersan@gmail.ru; ИВАНОВ Александр Геннадиевич – зав. лаб., iag-sakha@mail.ru.

льдонасыщенных грунтов и вытаиванием подземных льдов, приводящий к проседанию поверхности земли, возникновению отрицательных форм рельефа и их заболачиванием.

Термокарст – один из основных криогенных процессов, выражающийся в образовании провальных форм рельефа при вытаивании внутригрунтового (сегрегационного и залежеобразующего) льда под влиянием изменения условий теплообмена на поверхности. Последнее происходит вследствие естественного саморазвития рельефа: образования отрицательных микроформ рельефа с повышенным снегонакоплением, смены растительных ассоциаций, пучения и (или) накопления торфяников на окружающей территории и др.

Солифлюкция происходит в основном в супесчано-суглинистых образованиях в условиях их избыточного увлажнения, которое связано с широким развитием неглубоко залегающих надмерзлотных вод в пределах сезонно-талого слоя. Наиболее благоприятно солифлюкция развивается на склонах крутизной 5–20° при мощности талого слоя 0,4–1,0 м.

Сезонное пучение проявляется весьма широко в различных по составу породах (от глин до тонкозернистых песков). Процессами сезонного пучения обусловлено образование пятен-медальонов, мелкобугристого рельефа и сезонных бугров пучения.

Пространственная и временная изменчивость основных компонентов геокриологической обстановки приводит к тому, что интенсивность криогенного пучения изменяется от участка к участку в весьма больших пределах, а на отдельных однородных участках оно проявляется по площади не равномерно, а как случайный процесс.

Перечисленные криогенные процессы, связанные с изменением температурного поля грунта, зачастую приводят к следующим нежелательным последствиям: выпучивание трубопровода; всплытие трубопровода; провисание трубопровода; прямое деформационное механическое воздействие на трубопровод.

В результате изменяется напряженно-деформированное состояние трубопровода, что крайне негативно сказывается на его эксплуатационной надежности.

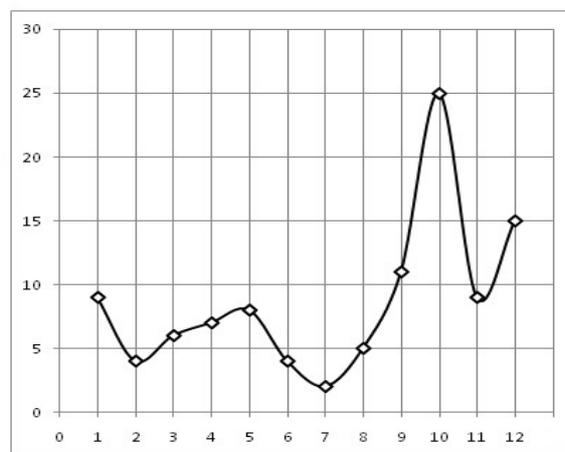
Изменение теплового режима многолетнемерзлых грунтов основания инженерных сооружений приводит к возникновению аварийных ситуаций с серьезными эконо-

мическими, материально-техническими, экологическими и социальными последствиями. Тепловое взаимодействие инженерных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами оказывает значительное влияние на состояние грунта, а следовательно, на их несущую способность и надежность.

На рисунке представлено распределение отказов трубопровода, проложенного в условиях многолетнемерзлых пород, в зависимости от времени года. По результатам натурных измерений [2] выявлено, что наибольшее число отказов приходится на весенне-осенний период. Это связано с возникновением неравномерного напряженно-деформированного состояния, которое вызвано рядом климатических факторов, в первую очередь, ярко выраженной сменой времени года.

В осенне-зимние месяцы (ноябрь–март) происходит промерзание деятельного слоя сверху, которое сопровождается миграцией поровой воды. При этом на минеральных частицах, покрытых тонким слоем пленочной воды, возникает поверхностная нереализованная энергия, благодаря которой вода подтягивается к тонкой прочносвязанной пленке воды из нижерасположенного влажного грунта. Процесс миграции пленочной и капиллярной воды играет основную роль в формировании морозного пучения. Величина пучения в течение зимы монотонно растет за счет миграции поровой влаги к фронту промерзания. В мае при поступлении снеговой воды наблюдается резкое увеличение объема верхних слоев грунта. В летние месяцы, когда идет интенсивное испарение влаги за счет высыхания этих слоев, происходит усадка деятельного слоя. Многогодичный цикл протаивания–промерзания усиливает процесс выпучивания трубопровода [3].

Количество отказов
трубопровода



Месяцы

Зависимость отказов трубопровода от времени года

Для оценки несущей способности подземных трубопроводов необходимо решить задачу теплового взаимодействия трубы и мерзлого грунта и на ее основе рассмотреть прочностную задачу.

В данной работе рассмотрено изменение температурного поля грунта в условиях сплошной мерзлоты под воздействием сезонных процессов. Поставленная задача решается методом конечных элементов.

Постановка задачи

Рассматривается массив мерзлого грунта, вмещающий трубопровод диаметром 1420 мм и толщиной стенки 24 мм.

Грунтовой массив с трубопроводом является сложной термодинамической системой, температурный режим которой зависит от множества факторов. В целях упрощения расчетов в данной работе тепловое взаимодействие трубопровода с грунтом рассмотрено в двухмерном сечении, расчетная область предполагается одномерной, однако учитываются: периодическое изменение температуры на поверхности и зависимость теплоемкости, теплопроводности грунта от его фазового состояния, теплота фазовых превращений воды.

Важнейшим из физико-химических процессов, определяющих особенности температурного поля грунтового массива, является переход содержащейся в грунте воды из жидкого состояния в твердое и обратно.

Формирование температурного поля грунтового массива определяется сезонным изменением температуры наружного воздуха и тепловым воздействием транспортируемого продукта.

Теплопередача от трубопровода к грунту и от грунта к наружному воздуху осуществляется в несколько этапов:

- теплота от транспортируемого продукта подводится к внутренней стенке трубопровода, которая за счет теплопроводности передается к наружной поверхности трубопровода;

- вследствие теплопроводности от наружной поверхности трубопровода теплота поступает в грунт, затем отбирается наружным воздухом путем конвекции.

Процесс распространения тепла в грунтовой массиве описывается уравнением [4]:

$$(C(T_{гр}) + W\delta(T_{гр} - T_f)) \frac{\partial T_{гр}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\lambda(T_{гр}) \frac{\partial T_{гр}}{\partial t} \right),$$

где $\delta(T_{гр} - T_f)$ – дельта-функция Дирака; W – влажность грунта; $T_{гр}$ – температура грунта; T_f – температура фазового перехода грунта; l – нормаль к поверхности трубы.

Исходные данные

Перечень исходных данных, необходимых для расчета температурного поля грунта: диаметр трубопровода; толщина стенки трубопровода; коэффициент теплопроводности материала трубы; температура транспортируемого продукта; мощность слоя мерзлого грунта; среднегодовая температура мерзлого грунта; коэффициент теплопроводности мерзлого грунта; коэффициент теплопроводности талого грунта; плотность грунта; теплоемкость грунта; температура фазового перехода; среднемесячная температура воздуха; коэффициент теплоотдачи от поверхности грунта к воздуху.

Исходные параметры определены применительно к природно-климатическим условиям Центральной Якутии. Среднемесячная температура окружающей среды (за период 2005–2016 гг.) составляет: январь – $-38,6^\circ\text{C}$, февраль – $-33,8^\circ\text{C}$, март – $-20,1^\circ\text{C}$, апрель – $-4,8^\circ\text{C}$, май – $7,5^\circ\text{C}$, июнь – $16,4^\circ\text{C}$, июль – $19,5^\circ\text{C}$, август – $15,2^\circ\text{C}$, сентябрь – $6,1^\circ\text{C}$, октябрь – $-7,8^\circ\text{C}$, ноябрь – $-27,0^\circ\text{C}$, декабрь – $-37,6^\circ\text{C}$.

Граничные условия

Начальное распределение температуры в грунтовой массиве в момент времени $t = 0$ принимается по данным натурных измерений.

На границах расчетной области задаются следующие условия:

На боковых и нижней границах теплообмен отсутствует, установлена постоянная температура.

На верхней границе происходит конвективный теплообмен с окружающей средой, имеющей температуру $T_{cp}(t)$. Плотность теплового потока определяется как:

$$J = \alpha(T_{cp}(t) - T_{г0}), \quad (1)$$

где J – плотность теплового потока; α – коэффициент теплоотдачи от окружающей среды к грунту; $T_{г0}$ – температура грунта на границе с окружающей средой.

На внешней поверхности трубопровода применяется следующее граничное условие:

$$\lambda_{гр.п} \frac{\partial T_{гр.п}}{\partial l} = \alpha(T_{гр.п} - T_{гн}), \quad (2)$$

где $\lambda_{гр}$ – коэффициент теплопроводности грунта; $T_{гр.п}$ – температура грунта на внешней поверхности трубопровода; $T_{гн}$ – температура транспортируемого продукта; $\alpha_{гр}$ – коэффициент теплопередачи от внешней поверхности трубопровода к грунту; l – нормаль к поверхности трубы.

**Результаты расчетов глубины ореола
оттаивания трубопровода**

Тип грунта	Глубина ореола оттаивания, м		
	через 1 год	через 3 года	через 5 лет
Суглинок	0,91	1,67	1,8
Песок	2,37	3,4	4,4

Методом конечных элементов проанализирована динамика изменения температурного поля грунтового массива в течение 5 лет эксплуатации трубопровода. Для обеспечения достаточной точности решения шаг расчета по времени составлял 10 дней.

В таблице представлены результаты расчетов глубины ореола оттаивания трубопровода для двух типов грунтов: суглинка и песка.

Заключение

Проведены расчеты ореола оттаивания грунтового основания трубопровода без учета теплоизоляции. Полученные результаты позволяют оценить степень опасности участков, определив глубину протаивания основания подземного трубопровода. С течением времени глубина протаивания монотонно увеличивается, в песчаном грунте процесс оттаивания происходит интенсивнее. Эксплуатация трубопровода с положительной температурой усиливает процесс осадки трубопроводной системы.

Сравнение итогов расчета с аналогичными результатами исследований ряда авторов [5,6]

показало достоверность полученных результатов прогнозирования развития ореола оттаивания. Для расчета ореола оттаивания, обеспечивающего приемлемую точность, необходимо учитывать изменения значения льдистости.

Литература

1. *Геокриология СССР. Западная Сибирь* / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1988.
2. *Левин А.И.* Хладостойкость и надежность трубопроводов Крайнего Севера: Дис. ... д-ра техн. наук. – Якутск, 2002.
3. *Пермяков П.П.* Влияние криолитозоны в основании подводного перехода газопровода через р. Лену // Газовая промышленность. – 2013. – №2. – С. 59–61.
4. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977.
5. *Fu Zaiguo, Yu Bo, Zhu Jie, Li Wang.* Thaw characteristics of soil around buried pipeline in permafrost regions based on numerical simulation of temperature fields // Journal of Thermal Science and Technology. 2012. V. 7, issue 1. – P. 322–333.
6. *Lin Lijun; Liu Jianjun; Pei Guihong.* Numerical Simulation of Soil Temperature Field Surrounding Underground Heat Pipe in Permafrost Region. International Symposium on Multi-field Coupling Theory of Rock and Soil Media and Its Applications. – 2010. – P. 471–476.

Поступила в редакцию 23.04. 2015 г.

УДК 553.981

**Исследование свойств гидратов природного газа, полученных
из растворов хлорида натрия**

Л.П. Калачева, А.Ф. Федорова

Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что минерализация растворов хлорида натрия влияет на процессы образования и разложения гидратов природного газа. В зависимости от концентрации растворов изменяются свойства образующихся гидратов: размеры, формы образцов, объемы газов, заключенных в клатратную фазу. Процесс диссоциации гидратов рассматривается как гетерогенная реакция на поверхности и может быть описан кинетикой топомехимических реакций. С увеличением минерализации растворов скорости разложения гидратов возрастают за исключением реакции диссоциации образца, полученного из 5% раствора.

Ключевые слова: гидраты природного газа, минерализация растворов, процессы образования и разложения гидратов.

КАЛАЧЕВА Людмила Петровна – к.х.н., в.н.с., lprko@mail.ru; ФЕДОРОВА Айталипа Федоровна – к.т.н., в.н.с., faitalina@mail.ru.