

УДК 622.692.4

ТЕПЛОВОЕ ВЛИЯНИЕ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА НА ОКРУЖАЮЩИЕ МЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ

Капитонова Т.А., Стручкова Г.П., Николаева М.В., Слепцов О.И.

ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова» СО РАН, Якутск,
e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru, g.p.struchkova@iptpn.ysn.ru, nikolaevamv@gmail.com,
o.i.sleptsov@iptpn.ysn.ru

При эксплуатации нефтегазопроводов в условиях криолитозоны происходит взаимодействие трубопровода с многолетнемерзлыми грунтами и, как следствие, активизация процессов, связанных с деградацией многолетней мерзлоты и проявлением комплекса природных и техногенных воздействий, отрицательно влияющих как на трубопроводные системы так и на экологию региона. Как правило, это криогенные пучения грунтов, наледеобразование, процессы эрозии и термоэрозии, солифлюкция, проседание поверхности и заболачивание местности. При этом происходит изменение пространственного положения, деформация трубопровода, что повышает вероятность возникновения аварийной ситуации. На основе математической модели представлены расчеты ореола протаивания грунта вокруг трубопровода для различного вида грунтов, полученные методом конечных элементов. Полученные результаты позволяют оценить глубину протаивания грунта вокруг трубопровода. Приводится сравнительный анализ результатов мониторинга по определению пространственного положения трубопровода на участках с развитием термокарста.

Ключевые слова: нефтегазопроводы, мониторинг, многолетнемерзлые грунты, термокарст, математическая модель, метод конечных элементов

THERMAL INFLUENCE OF UNDERGROUND PIPELINES TO THE SURROUNDING FROZEN SOIL

Kapitonova T.A., Struchkova G.P., Nikolaeva M.V., Sleptsov O.I.

The Institution of Russian Academy of Sciences the V.P. Larionov's Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru,
g.p.struchkova@iptpn.ysn.ru, nikolaevamv@gmail.com, o.i.sleptsov@iptpn.ysn.ru

During oil and gas pipelines exploitation in the permafrost zone conditions the interaction between permafrost and pipeline takes place and as a result activation of the processes associated with the degradation of permafrost and a manifestation of the complex natural and anthropogenic impacts negatively affecting both the piping systems and the ecology of the region. Typically, these are cryogenic heaving soils, icing, erosion and thermal erosion, solifluction, surface subsidence and water logging areas. Thus there is a change in the spatial position, the deformation of the pipeline, which enhances the probability of an emergency. On the basis of a mathematical model provides estimates of the halo around the pipe thawing for different types of soil obtained by finite element method. The results obtained allow to estimate the depth of thawing of the soil around the pipeline. The comparative analysis of the results monitoring to determine the spatial position of the pipeline in areas of thermokarst development is contained.

Keywords: oil and gas pipelines, monitoring, permafrost, thermokarst, mathematical model, finite element method

В условиях криолитозоны эксплуатация нефтегазопроводов осуществляется в крайне контрастных условиях и природных средах с активным проявлением комплекса сложных природно-климатических и геологических процессов, воздействующих на трубопроводы: резкий перепад температур в зимние и летние периоды, осадки, деградация вечномерзлых грунтов, неоднородность рельефа, лесные пожары, переходы через реки и ручьи, болотистые места.

В настоящее время на территории Якутии ведется интенсивное строительство третьей нитки газопровода Мастаах-Берге-Якутск, железной дороги Беркакит-Якутск-Магадан, эксплуатация нефтепровода ВСТО.

Главной опасностью при возникновении аварий на данных объектах являются выбросы в атмосферу химических веществ, пожары, причинение вреда населению

и экологии региона, нарушение теплоснабжения, особенно, если аварийные ситуации возникнут в зимний период времени.

Анализ возможных сценариев развития аварийных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса Республики Саха (Якутия) с учетом факторов риска, последствий аварий, на основе анализа отказов оборудования, воздействия поражающих факторов и размеров зон поражения, а также возможные сценарии развития аварийных ситуаций описаны в [4].

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 [2,3]: криогенное пучение грунтов; наледеобразование; процессы эрозии

и термоэрозии; солифлюкция и оползнеобразование; термокарст который образуется в связи с оттаиванием льдонасыщенных грунтов и вытаяиванием подземных льдов, приводящий к проседанию поверхности земли, возникновению отрицательных форм рельефа и их заболачиванию.

Опасные геологические процессы, вызванные техногенным влиянием отличаются от природных расположением непосредственно связанным с инженерным сооружением, большой интенсивностью проявления, более быстрым протеканием во времени; направлением отличным от свойственного аналогичным природным явлениям в данной местности, а часто и противоположным ему.

При этом происходит взаимовлияние системы подземных трубопроводов и окружающих многолетнемерзлых пород, что предполагает изменение пространственного положения, деформацию трубопровода и высокую вероятность возникновения аварийной ситуации, вследствие постоянной трансформации мерзлых грунтов.

В качестве примера оценки влияния сезонных изменений метеоусловий трубопровода и окружающего его грунта приводится сравнительный анализ результатов четырех

полевых этапов мониторинга по определению пространственного положения трубопровода на участках с развитием термокарста (рисунок). На данном участке максимальная величина просадки за летний период первого года составила 20 см, при этом поверхность земли просела максимум на 15 см, максимальная величина выпучивания трубы за зимний период составила 16 см, за второй год максимальная величина просадки за летний период первого года 8 см, при этом поверхность земли просела максимум на 6 см.

Причиной уменьшения площади обводненных и заболоченных участков может быть либо стабилизация термокарстовых процессов, либо уменьшение количества осадков. Проверка на основе метеорологических данных показала, что в августе 2014 году было зафиксировано значительно меньшее по сравнению с августом 2010 года количества осадков, при этом средние температуры августа 2014 выше средних температур в сравнении с многолетними наблюдениями для этого времени года. Немаловажный вклад в уменьшение площади обводненных участков внесла, видимо, и проведенная на данном участке организация стока поверхностных вод.

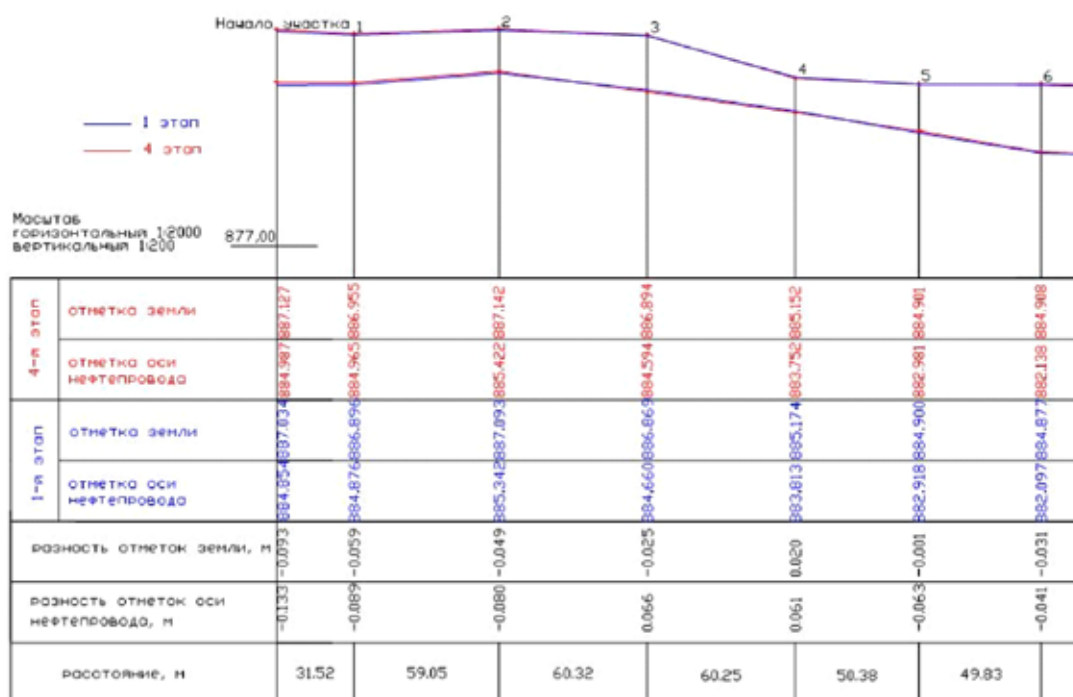


Рис. 1. Результаты сравнения первого и четвертого этапов мониторинга пространственного положения трубопровода на участках с развитием термокарста

Общую последовательность развития разрушения трубопровода можно представить следующим образом. В результате циклических напряжений, созданных опасными геологическими экзогенными процессами, перепадами температуры окружающей среды и колебаниями рабочего давления за время эксплуатации трубопровода около дефектов (пор, непроваров, шлаковых включений и т.д.) накапливаются повреждения, которые служат зародышем магистральной трещины. При механическом нагружении конструкции размеры уже имеющихся в металле начальных дефектов увеличиваются, а также зарождаются и развиваются трещины около других дефектов. Агрессивная среда также существенно ускоряет развитие трещин под механическим напряжением [1].

Температурное взаимодействие трубопровода с многолетнемерзлым грунтом влияет на состояние грунта, а следовательно, на несущую способность и надежность подземного трубопровода.

Наиболее эффективным инструментом оценки взаимовлияния и взаимодействия составляющих геотехнической системы служит моделирование на основе сочетания детерминированных и вероятностных подходов.

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

Анализом теплового взаимодействия подземных трубопроводов с грунтами занимались Г.В. Порхаев, Б.П. Поршаков, Э.А. Бондарев, М.М. Дубина, Б.А. Красовицкий, А.Л. Ястребов, Б.Л. Кривошеин, А.Ф. Клементьев, П.И. Тугунов, Р.П. Бикчентай, Ю.С. Даниэлян и др.

Исследованиям термодинамических процессов в мерзлых грунтах при наличии миграции влаги и механизма мерзлого пучения грунтов посвящены работы В.О. Орлова, Э.Д. Ершова, В.Г. Чеверева, П.Ф. Швецова, О.Р. Голли, Л.Т. Роман, И.А. Комарова, Л.В. Чистотина, Б.И. Далматова, В.И. Аксенова, Ю.Я. Велли, М.Ф. Киселева, В.А. Королева.

Изучением свойств мерзлых грунтов занимались С.С. Вялов, Н.А. Цытович, С.Е. Гречищев, Я.А. Кроник, Ю.К. Зарецкий, И.А. Золотарь, А.А. Коновалов, Р.В. Максима, Н.К. Пекарская, А.М. Пчелинцев, С.Б. Ухов и др.

По результатам данных исследований можно сделать следующий вывод:

– временное и предельно-длительное сопротивление мерзлых грунтов сжатию и растяжению зависят от величины отрицательной температуры и влажности грунта, при этом значения сопротивлений грунтов растяжению в несколько раз меньше соответствующих значений сопротивлений при сжатии;

– коэффициент Пуассона резко зависит от температуры грунта.

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

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;

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

Исходные данные необходимые 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 вводились применительно к природно-климатическим условиям Центральной Якутии. Среднемесячная температура окружающей среды представлена в табл. 1.

Таблица 1

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

Таблица 2

Тип грунта	Глубина протаивания, м		
	через 1 год	через 3 года	через 5 лет
Суглинок	3,0	3,8	4,3
Песок	2,8	3,2	3,7

Граничные условия

Начальное распределение температуры в грунтовом 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:

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

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

На внешней поверхности трубопровода применяется следующее граничное условие:

$$\lambda_{cp} \frac{\partial T_{cpn}}{\partial l} = \alpha_{mp} (T_{cpn} - T_n) \quad (2)$$

λ_{cp} – коэффициент теплопроводности грунта; T_{cpn} – температура грунта на внешней поверхности трубопровода; T_n – температура транспортируемого продукта; α_{mp} – коэффициент теплопередачи от внешней поверхности трубопровода к грунту; l – нормаль к поверхности трубы.

Процесс распространения тепла в массиве с учетом фазовых переходов описывается следующим уравнением [5]:

$$(C(T_{cp}) + W \cdot \delta(T_{cp} - T_f)) \frac{\partial T_{cp}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial l} \left(\lambda(T_{cp}) \frac{\partial T_{cp}}{\partial l} \right); \quad (3)$$

где $\delta(T_{cp} - T_f)$ – дельта-функция Дирака, W – влажность грунта, T_{cp} – температура грунта, T_f – температура фазового перехода грунта.

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 табл. 2 представлены результаты расчетов ореолов оттаивания вокруг 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 медленнее. Эксплуатация трубопровода с положительной температурой усиливает процесс осадки трубопроводной системы.

Для расчета ореола оттаивания, обеспечивающего приемлемую точность, необходимо учитывать изменения значения льдистости.

Список литературы

1. Большаков А.М. Хладостойкость трубопроводов и резервуаров Севера после длительной эксплуатации: Автореф. ... дис. докт. техн. наук. – М., 2009. – 36 с.
2. Геокриология СССР. Западная Сибирь. / Под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989, 453 с.: ил., карт. 27 см.
3. Николаева М.В., Стручкова Г.П., Капитонова Т.А., Ефремов П.В. Геоэкологические риски трубопроводов в условиях Севера // Современные тенденции в науке и образовании: сб. ст. Международной научно-практической конференции: В 6 частях. ООО «Ар-Консалт». – М., 2014. – С. 38-39.
4. Слепцов О.И., Левин А.И., Капитонова Т.А., Стручкова Г.П., Большаков А.М. Надежность и безопасность газопроводного транспорта в условиях Крайнего Севера // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2007. – № 4. – С. 95-103.
5. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.