

ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ ПВП ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Авторский коллектив: Корнилова З.Г., Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Корнилова В.В. – отдел № 20 Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

Актуальность: Трубопроводы Северных территорий эксплуатируются в экстремальных климатических и инженерно-геологических условиях. В результате сезонного таяния и замерзания окружающих грунтов, подземный трубопровод, проложенный в области вечномерзлых грунтов, испытывает двукратные изменения своего вертикального положения в течение года. На некоторых участках возникают сложные деформации, проявляющиеся в виде нескольких арок и без интервалов переходящие одна в другую. Представлено уравнение, описывающее вертикальное положение подземного трубопровода, в зависимости от веса грунта сверху и реакции грунта снизу. В уравнении нет необходимости явно указывать продольные усилия, что значительно упрощает полевые работы при сборе данных.

Ключевые слова: подземный трубопровод, плано-высотное положение, морозные пучения, сложные деформации трубопровода, вечномерзлый грунт.

Основные результаты работы, разработки и предложения:

В условиях распространения многолетнемерзлых грунтов подземный трубопровод дважды в год меняет свое положение в моменты замерзания и оттаивания, и это вызывает деформацию трубопровода [1]. Морозное пучение способно приводить к сильным изгибам трубопроводов, провисанию отдельных участков, перемещениям, могут возникнуть повышенное напряженно-деформированное состояние. Такие участки определяются расчетным путем [2, 3].

Актуальным вопросом в эксплуатации подземных трубопроводов, проложенных на территории Республики Саха (Якутия), является воздействие морозных пучений, которое является малоизученной проблемой. Авторы, исследовавшие это явление, ограничиваются моделью воздействия морозного пучения в ограниченном участке [4-8]. В результате рассматривается случай, когда трубопровод получает деформацию в виде арки – одиночной выпуклости. Расчетную схему взаимодействия трубопровода с грунтом принимают как на рисунке 1.

Но в отличие от исследуемых случаев, реальная картина деформации трубопровода является сложной – на участке воздействия морозных пучений деформации получают в виде нескольких выпуклостей и вогнутостей, следующих друг за другом без интервалов. Многолетний мониторинг пространственного положения береговой части магистрального трубопровода выявил участок на протоке Табагинская, в котором дважды в год происходят интенсивные деформации, в моменты замерзания и оттаивания многолетнемерзлых грунтов.

На рисунке 2 показаны результаты измерения плано-высотных положений (ПВП) подземного трубопровода в ряд последовательных сезонов на участке интенсивных деформаций. Измерения проводились в апреле, когда трубопровод находится в мерзлом грунте, и в октябре (ноябре), когда грунт вокруг трубопровода талый. На рисунке сплошной линией показано положение трубопровода во время измерения, пунктирной линией показано положение трубопровода на предыдущий сезон, тонкой линией показан уровень дневной поверхности грунта. Как видно, величина смещения трубопровода в отдельных точках за полгода составляет почти 2 м. Вид, который приобретает трубопровод, не одиночная арка, а ряд выпуклостей и вогнутостей, идущих друг за другом.

Сезонные деформации наблюдаются только на участке входа в протоку со стороны берега. Трубопровод в участках – пойменном, дне протоки, выходе из протоки к острову и на острове, существенно меняющихся от сезона к сезону – деформаций не испытывает. Несмотря на большие смещения трубопровода, уровень дневной поверхности грунта в изучаемом участке меняется незначительно от сезона к сезону, что указывает на наличие фактора, отличного от пучений и значительно влияющего на сдвиг трубопровода. Нами выдвинута гипотеза, что таким фактором является предварительное напряжение в трубопроводе. Для прохода через протоку, трубопровод был уложен методом упругого изгиба, значит, получил начальное механическое напряжение, поэтому нагрузки от малых пучений вызывают большие сдвиги.

Для проверки выдвинутой гипотезы, смоделировали следующую задачу. Для смены уровня трубопровода задаем радиусы изгиба. Потом задаем точечные нагрузки по величине равные морозным пучениям. Ищем решения, когда сдвиг в точке приложения нагрузки малый, а по соседству происходят большие сдвиги. Расчетная схема задачи показана на рисунке 3. В нашей задаче точки укрепления трубопровода могут находиться достаточно далеко от изучаемого участка. Чтобы применить устоявшиеся математические модели необходимо будет измерить очень длинные участки. Также и при численном решении потребуются очень большие вычислительные ресурсы. По этой причине нами получено уравнение подземного трубопровода, в котором нет явной зависимости от продольных усилий [9].

$$EI \frac{d^4 Z}{dx^4} - \frac{D \rho_n g}{2} \cdot \frac{d^2 Z}{dx^2} + p - q + \rho_n g = 0, \quad (1)$$

где: E – модуль упругости; I – момент инерции сечения; D – диаметр трубопровода; ρ_n – линейная плотность трубы; q – реакция грунта; p – вертикальная распределенная нагрузка; Z – вертикальное положение оси трубы; g – ускорение свободного падения.

Алгоритм вычисления следующий. Задается начальная линия, по которой трубопровод лежит в талом грунте. В нижней части склона фиксируется положение трубопровода, сдвиг из-за пучений задается на верхней границе склона и в средней части склона решается уравнение (1). В прямом решении уравнения проблему создают реакции грунта p и q , поскольку они не постоянные, а зависят от перемещения трубопровода Z . Чтобы обойти этот момент, сдвиг разделяем на множество мелких сдвигов, так, чтобы при мелком сдвиге трубопровода, реакции грунта p и q не сильно изменились, в момент решения уравнения их можно было считать постоянной величиной. В уравнении (1) существенное отличие – отсутствие явного задания продольных усилий.

Выводы. По результатам измерений плано-высотного состояния ППМТ на береговом участке протоки Хатасская выявлен участок с большими сезонными деформациями. Величины деформаций превышают сдвиги грунта от морозных пучений.

Предложена гипотеза, что большие деформации связаны с предварительными напряжениями трубопровода, полученными во время строительства, заложенными в проект для перехода через пересеченные места с малым перепадом уровней.

Разработана математическая модель подземного трубопровода и итерационный алгоритм оценки напряжений в деформированной трубе по точечным измерениям плано-высотного положения подземного трубопровода.



Рисунок 1 – Расчетная схема силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом

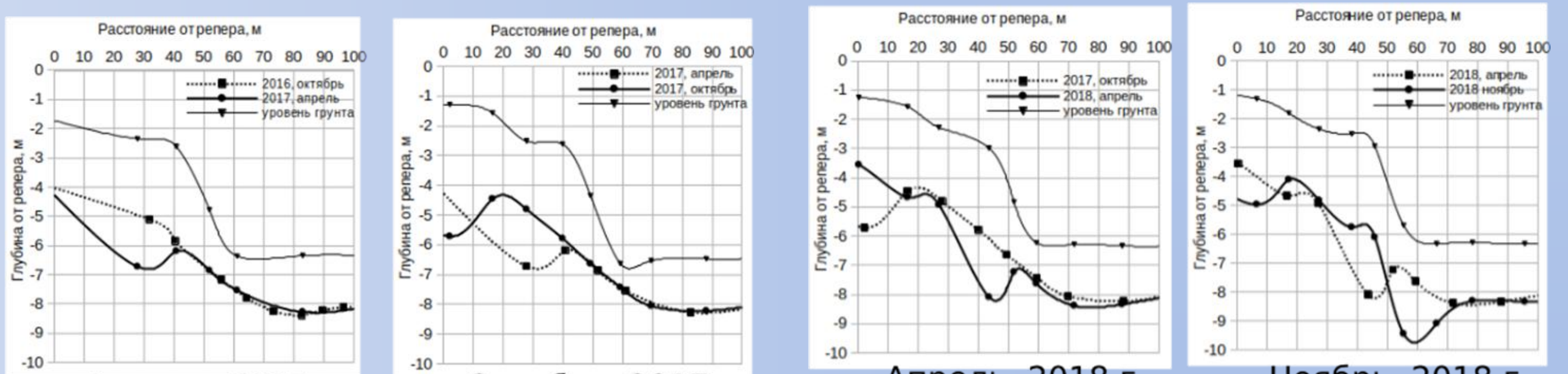


Рисунок 2 – Положение трубопровода на входе протоки «Табагинская» в течение ряда последовательных сезонов



Рисунок 3 – Расчетная схема для модельной задачи

Список литературы

1. Лебедев М.П., Пермяков П.П., Иванов Дж.С., Яковлев Ю.А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния трубопровода при пучении грунта. // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. Arctic and Subarctic Natural Resources. – Якутск, 2018, Т. 5, № 3. С. 114-120.
2. Бурков П.В., Буркова С.П., Тимофеев В.Ю., Ащелуова А.А., Ключ О.В. Анализ напряженно-деформированного состояния трубопровода в условиях вечной мерзлоты // Геотехнология. 2013. № 6 (100). С. 77-79.
3. Лисин Ю.В., Александров А.А., Ларионов В.И., Козлов М.А. Оценка плано-высотного положения трубопровода на участках с многолетнемерзлыми грунтами // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. № 3. С. 68-79.
4. Айбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость: справочное пособие // Москва: Недра, 1991. - 287 с.
5. Бородавкин П.П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве // Москва: Недра, 1986. - 224 с.
6. Горковенко А.И. Основы теории расчета пространственного положения подземного трубопровода под влиянием сезонных процессов: 25.00.19: дис. док. техн. наук / ТюмГНГУ. - Тюмень, 2006. - 305 с.
7. Иванов И.А. Эксплуатационная надежность магистральных трубопроводов в районах глубокого сезонного промерзания пучинистых грунтов: 25.00.19: дис. док. техн. наук / ТюмГНГУ. - Тюмень, 2002. - 267 с.
8. Марков Е.В. Обеспечение проектного положения магистральных трубопроводов в условиях пучинистых грунтов : 25.00.19: дис. канд. техн. наук / ТИУ. - Тюмень, 2020. - 133 с.
9. Иванов Дж.С., Аммосов Г.С., Корнилова З.Г. Вывод уравнения подземного трубопровода для применения в расчетах напряженно-деформированного состояния при воздействии неравномерных морозных пучений // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2022. № 1 (81). С. 27-30.