

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Корнилова З.Г., Антонов А.А.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

E-mail: [ivanovds@gmail.com](mailto:ivanovds@gmail.com), [ammosov.g@mail.ru](mailto:ammosov.g@mail.ru), [zoya\\_korn@mail.ru](mailto:zoya_korn@mail.ru), [santaz7@rambler.ru](mailto:santaz7@rambler.ru)

**Аннотация.** Трубопроводы Северных регионов эксплуатируются в экстремальных климатических и инженерно-геологических условиях. Одним из факторов, влияющих на износ трубопроводов в таких условиях обусловлен влиянием вечномерзлых грунтов на их эксплуатационную надежность. Морозное пучение, как одно из наиболее опасных процессов, способно приводить к сильным изгибам трубопроводов, провисанию отдельных участков, перемещениям, иногда с потерей устойчивости.

В данной статье представлена методика оценки напряжений, возникающих в трубопроводе на таких участках. Получено уравнение, описывающее вертикальное положение подземного трубопровода, в зависимости от веса грунта сверху и реакции грунта снизу. Предлагается методика определения реакции мерзлого грунта под сложно-деформированным трубопроводом, позволяющая эффективно определять неизвестные реакции. Определение реакции грунта проведено методом подбора, а для коррекции реакции грунта применили метод градиентного спуска.

**Ключевые слова:** сложные деформации трубопровода, планово-высотное положение, подземный трубопровод, морозные пучения, вечномерзлый грунт, метод градиентного спуска.

### Введение

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].

В статье представлены результаты измерений планово-высотных положений трубопровода на участке входа в протоку «Хатасская» с интервалом полгода. Многолетний мониторинг подземного газопровода показал, что имеются участки, где подземный трубопровод, проложенный в вечномерзлом грунте, дважды в год деформируется разным образом, и изменения высотного положения за полгода достигают до двух метров [4]. Как видно на рис. 1, сдвиги трубопровода за полгода достигают больших значений, например на участке 180-200 метров до 2 м, и угрожают нормальной эксплуатации.

При деформации трубопровода, из данных планово-высотных измерений выясняют стрелу прогиба, из чего вычисляют радиус изгиба и оценивают возникшее напряжение [5-8]. Но в измеренном участке прогибы идут без интервалов – выпуклость сменяется вогнутостью, которая переходит в выпуклость и т. д. В данной работе поставлена цель – из точечных планово-высотных данных восстановить функцию пространственного положения трубопровода, получить радиус изгиба и оценить напряжения.

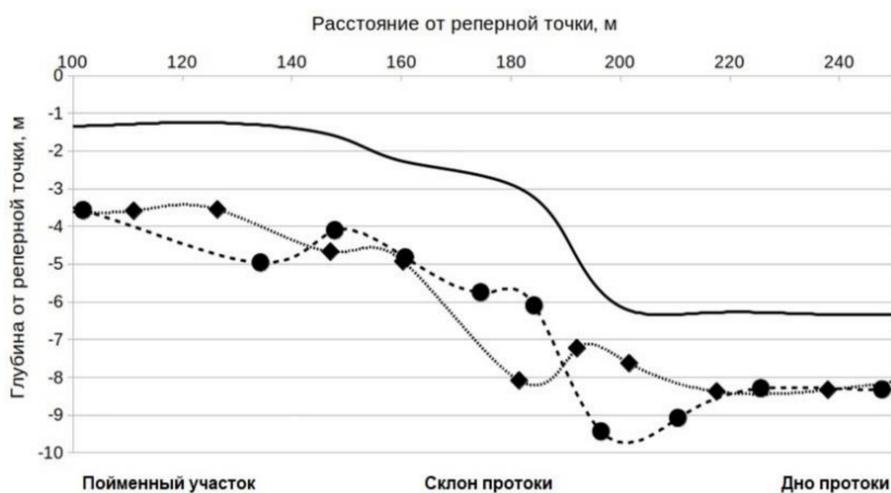


Рис. 1. Изменение положения трубопровода за полгода: — — дневная поверхность грунта, —◆— — измеренные положения подземного трубопровода в апреле 2018 г. (труба находится в мерзлом грунте), —●— — в ноябре 2018 г. (труба находится в оттаявшем грунте), — — — — интерполированное положение трубопровода.

### Уравнение подземного трубопровода

Выбор модели подземного трубопровода и вывод уравнения, независимого явным образом от продольных усилий, и учитывающего непостоянность глубины залегания, неравномерность реакций грунта, представлен в работе [4]. Момент сил изогнутой балки выражается по формуле [10]

$$M = \frac{EI}{r} = EI \frac{d^2 Z}{dx^2}, \quad (3)$$

где:  $M$  – изгибающие моменты,  $E$  – модуль упругости,  $I$  – момент инерции сечения,  $r$  – радиус изгиба (при малых деформациях обратно пропорционален второй производной).

Полученное в [4] уравнение функции вертикального положения трубопровода по форме совпадает с уравнениями, приведенными в [5, 8, 9], но не требует явного задания продольных усилий и упрощает решение. Распределенную нагрузку сверху  $r$  вычисляем как вес грунта над трубой, зависящую от глубины трубы.

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

где:  $E$  – модуль упругости;  $I$  – момент инерции сечения;  $D$  – диаметр трубопровода;  $\rho_l$  – линейная плотность трубы;  $q$  – реакция грунта;  $p$  – вертикальная распределенная нагрузка;  $Z$  – вертикальное положение оси трубы.

### Обсуждение

В магистральном подземном газопроводе использованы трубы марки 13Г1СУ, предел текучести которой 390 МПа. Но в проведенных оценках, на участках 120-150 м, присутствуют значения, превышающие этот предел (рис. 3). Это можно объяснить тем, что при выводе уравнения (4) трубопровод был рассмотрен как сплошная балка, а не принята во внимание его тонкостенная структура. Когда изгиб достигает уровня, при котором сплошная балка испытывает пластические деформации, тонкостенная цилиндрическая балка будет иметь овальное сечение и функционировать в упругой области. При превышении некоторого порога напряжений, зависимость момента сил от радиуса изгиба для тонкостенной трубы будет отличаться от уравнения (3). Предложенный метод оценки напряжений неприменим при напряжениях близких к пределу текучести.

### Выводы

Разработана методика оценки напряжений в трубопроводе, подвергающемся сложной деформации в виде нескольких подряд идущих арок, на основе данных, полученных из планово-высотных измерений. Существующие методики могут быть использованы только в случае деформации в виде одиночной арки [5, 6, 8, 9];

Предложенная методика оценки сталкивается со значительными погрешностями при напряжениях, близких к пределу текучести. Это связано с тем, что трубопровод моделируется как балка сплошного сечения. В настоящее время ведется работа по разработке уравнения, позволяющего моделировать подземный трубопровод как тонкостенную цилиндрическую балку, что позволит уменьшить погрешности и повысить точность оценки напряжений;

Проводятся работы по экспериментальной оценке напряжений в деформированном подземном трубопроводе, что позволит проверить разработанную нами методику.

### Литература

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., Ащеулова 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 планово-высотного положения трубопровода на участках с многолетнемерзлыми грунтами // Вестник ИГТУ им Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2012. № 3. С. 68-79.
4. Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Корнилова З.Г. Вывод уравнения подземного трубопровода для применения в расчетах напряженно-деформированного состояния при воздействии неравномерных морозных пучений // Трубопроводной транспорт: теория и практика. 2022. № 1 (81). С. 27-30.
5. Айнбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. – М.: Недра, 1982. – 340 с.
6. Горковенко А.И. Влияние некоторых закономерностей морозного пучения грунтов на высотное положение подземного трубопровода и его напряженно-деформированное состояние // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2006. № 1. URL: <http://ogbus.ru/article/view/vliyaniye-nekotorykh-zakonozernostej-moroznogo-pucheniya-gruntov-na-vysotnoe-polozheniye-podzemnogo-truboprovoda-i-ego-napryazhenno-deformirovannoe-sostoyaniye> (дата обращения: 22.03.2021)
7. Икрин В.А. Сопоставление материалов с элементами теории упругости и пластичности. – М.: Изд. АСВ, 2004. – 424 с.
8. Ясин Э.М., Черников В.И. Устойчивость подземных трубопроводов. – М.: Недра, 1967. – 119 с.
9. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-географических условиях / А.М. Шаммазов, Р.М. Зарипов, В.А. Чичелов и др. – М.: Интер, 2005. Т. 1, 706 с.
10. Ivanov D.S., Ammosov G.S., Kornilova Z.G. Influence of natural climatic conditions on the spatial position of the underwater gas pipelines on the Lena floodplain // Procedia Structural Integrity 20 (2019). P. 242-247. Published: 2019 in IGF Workshop Fracture and Structural Integrity. DOI: [10.1016/j.prostr.2019.12.146](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.12.146)