

ЗАЩИТА ГАЗОПРОВОДОВ ПОДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКИ ОТ ДЕЙСТВИЯ СИЛ КРИОГЕННОГО ПУЧЕНИЯ В РАЙОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ НЕСЛИВАЮЩЕГОСЯ ТИПА

С.Е. Гречищев, С.П. Дмитриева, Н.Б. Кутвицкая, М.А. Магомедгаджиева, М.А. Минкин, А.В. Рязанов
ФГУП ГПИ «Фундаментпроект»

PROTECTION OF THE BURIED CHILLED GAS PIPELINE AGAINST FROST HEAVING IN AREAS OF DISTRIBUTION NONANCHORED FROST SOILS

S.E. Grechishev, S.P. Dmitriyeva, N.B. Kutvitskay, M.A. Magomedgadzhieva, M.A. Minkin, A.V. Rayzanov
State Engineering Designing Research Institute "Fundamentproject"

It is well known that frost heaving occur on the sites with thawed and nonanchored frost soils under the action of buried chilled gas pipeline. This event connected to the specific stress-strained state in the freezing soils.

Developed in SEDRI "Fundamentproject" the method is allowed to estimate a maximally possible linear load of heaving and to prove engineering actions for keeping of gas pipeline from the frost heaving.

Известно, что при использовании холодного подземного газопровода на участках трассы, проходящих в зонах распространения талых грунтов (под озерами, реками, болотами) и вечномерзлыми грунтами несливающегося типа, происходит промерзание талых грунтов вокруг трубы, сопровождающееся развитием криогенного пучения, что часто приводит к выталкиванию участков газопровода на поверхность.

На сегодняшний день в существующих нормативных документах отсутствуют расчетные методики по определению сил пучения, действующих на «холодный» газопровод подземной прокладки при промерзании талых грунтов в его основании. Поэтому применяемые на практике мероприятия по обеспечению проектного положения газопроводов, разработанные на основе регламентированных в нормативной литературе расчетных методик, которые учитывают только воздействие на трубопроводы выталкивающих сил, обуславливающих их всплытие, малоэффективны. Известно много случаев, когда баллаستировка газо- и конденсаторов кольцевыми утяжелителями, рассчитанная в соответствии с нормативными источниками, была вытолкнута на поверхность за счет сил пучения, действующих на трубопровод.

Первое приближенное теоретическое рассмотрение криогенного выпучивания холодных труб из немерзлых грунтов было предложено в [1]. Экспериментальное изучение на моделях в натуральную величину проводилось во Франции [2] и на Аляске [3, 4].

Разработанная в ФГУП «Фундаментпроект» методика расчета [5] позволила оценить величины нормальных сил пучения, действующих на трубу газопровода или удерживающей силы, которые необходимо приложить к трубе для обеспечения ее устойчивости. Для реализации методики необходимо совместное выполнение теплотехнических расчетов с расчетами на действие сил морозного пучения

Для численного решения уравнений модели разработана программа, составленная в программном пакете Mathcad 2001. Входные параметры (промерзание над трубой, промерзание под трубой, максимальная в году скорость промерзания под трубой), необходимые для расчета по данной методике, определяются из решения

теплофизической задачи по разработанной в ФГУП «Фундаментпроект» программе PROGISTO (модификации программы PROGNOZ) [6]. Математическое моделирование в этой программе осуществляется энтальпийным конечно-разностным методом на явной двухслойной сетке. Расчетная схема двумерная.

Расчет нормальных сил криогенного пучения, действующих на холодный газопровод, производится со следующими предположениями.

На цилиндрической границе вокруг трубы происходит промерзание грунта со скоростью f_v , определяемой из теплофизической задачи, и одновременно – увеличение его объёма со скоростью

$$\delta = \alpha \cdot w \cdot f_v,$$

где w – объёмная влажность талого грунта, $\alpha = 0,09$ – относительное увеличение объёма при замерзании воды.

Скорость увеличения избыточного объёма δ компенсируется потоками воды и минеральных частиц талого грунта в сторону от мёрзлого цилиндра, в связи с чем на границе промерзания возникают напряжения в скелете грунта и давление в поровой влаге. И те и другие распределены по контуру промерзания неравномерно (внизу больше, вверху меньше), из-за чего мерзлый цилиндр стремится переместиться вверх (криогенное пучение). Требуется рассчитать погонную нагрузку на мерзлый цилиндр, которая должна быть воспринята анкерами, устраиваемыми с целью исключения возможности криогенного выпучивания мерзлого цилиндра вместе с трубой.

В виду медленности процесс продвижения цилиндрической границы промерзания радиуса R рассматривается как квазистационарный, для которого справедливо уравнение фазового равновесия на фронте промерзания в пористой среде [1]

$$\frac{L \cdot |\Delta t|}{T_0} - v_i \cdot \sigma_n - (v_i - v_w) \cdot p = 0,$$

где L – теплота фазового превращения лёд–вода;

Δt – температура фронта промерзания, °С;

$T_0 = 273K$ – нормальная температура фазового равновесия;

v_i, v_w – удельные объёмы льда и воды;

σ_n – эффективные напряжения в скелете грунта нормальные к фронту промерзания;

p – давление в поровой влаге.

Величина Δt трудно вычисляема, но может быть выражена через скорость промерзания, если воспользоваться экспериментальными данными из работы [7], которые, как показывает анализ, аппроксимируются выражением

$$|\Delta t| = b_2 \cdot \sqrt{f_v},$$

где f_v – скорость промерзания, м/сек; b_2 – эмпирический коэффициент, $\frac{K \cdot c^{\frac{1}{2}}}{m^{\frac{1}{2}}}$.

Ориентировочные значения b_2 , полученные по данным работы [3], приводятся в таблице 1.

Подставив последнее выражение в уравнение фазового равновесия получим условие промерзания:

$$\sigma_n + \alpha \cdot p_{\max} = \Delta T,$$

где $\Delta T = b_3 \cdot \sqrt{f_v}$,

$$b_3 = \frac{L \cdot b_2}{v_i \cdot T_0}.$$

Величины b_3 указаны в таблице 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов b_2 и b_3

материал	$b_2, \frac{K \cdot c^{\frac{1}{2}}}{m^{\frac{1}{2}}}$	$b_3, \frac{H}{m^2} \cdot \left(\frac{c}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$
вода	30	$33 \cdot 10^6$
ямальский суглинок	60	$66 \cdot 10^6$
салехардский суглинок	85	$93 \cdot 10^6$
кудиновская глина	170	$186 \cdot 10^6$

Последнее выражение рассматривается как граничное условие задачи фильтрационной консолидации для области талого грунта, окружающего промерзающую цилиндрическую зону.

Силы, выталкивающие мерзлый цилиндр и с ним трубу вверх, возникают за счет разности образующихся вследствие промерзания напряжений в скелете и давлений в поровой влаге в талом грунте над верхней и под нижней точками мерзлого цилиндра.

Погонная выталкивающая нагрузка разности полных напряжений $\Delta\sigma$ вычисляется по формуле:

$$Q = \int_{-\pi}^{+\pi} \Delta\sigma \cdot \cos\varphi \cdot R \cdot d\varphi,$$

Что будет являться погонной выталкивающей нагрузкой от пучения в целом.

Таким образом, если принято проектное решение об использовании противопучинных анкеров, то Q является для них расчётной нагрузкой на выдёргивание.

Расчеты нормальных сил криогенного пучения действующих на холодный газопровод позволяют обосновать инженерные мероприятия по обеспечению его устойчивости.

В качестве примера, ниже приведены результаты расчетов основания холодного подземного газопровода для условий Ямала. Рассмотрены вечномерзлые грунты несдвигающегося типа с погружением кровли 10 м и со среднегодовой температурой на глубине годовых нулевых амплитуд минус 0,2 °С при транспортировке газа с температурой минус 2 °С.

Диаметр трубы 1400 мм. Центр трубы на глубине 1,5 м. Рассмотрены варианты: труба без теплоизоляции; труба с теплоизоляцией с термическим сопротивлением теплопередаче 2,8 и 4,2 Вт/м²°С.

Грунт – суглинок, плотность скелета $1,63 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}$, объёмная влажность $w = 0,33$, коэффициент фильтрации $Kf = 10^{-9}$ или $10^{-10} \frac{м}{сек}$, модуль деформации $340 \cdot 10^5 \cdot Па$.

Как следует из анализа результатов (рис. 1), существенное влияние на величину погонной нагрузки от пучения (Q) оказывает коэффициент фильтрации (Kf). Величина погонной нагрузки возрастает по мере его уменьшения. Например, при $Kf = 10^{-10} м/сек$ максимальное значение Q равно 7 т/м, а при $Kf = 10^{-9} м/сек$ максимальное значение Q равно 2 т/м.

Также, по мере увеличения скорости промерзания грунта увеличивается и предельная погонная нагрузка от пучения.

При применении теплозащитного экрана с термическим сопротивлением теплопередаче ($R_{из}$) 2,8 Вт/м²°С (рис. 1) промерзания под трубой в первые три года не

происходит, соответственно предотвращается и выпучивание газопровода. В последующие годы под трубой начинается небольшое промерзание и погонная нагрузка от пучения достигает 0,4 т/м при $Kf = 10^{-9}$ м/сек на седьмой год.

При укладке теплозащитного экрана с термическим сопротивлением теплопередаче 4,2 Вт/м²°С промерзания под трубой не происходит. То есть можно подобрать такую толщину теплоизоляции, при которой криогенного выпучивания газопровода не будет происходить.

Таким образом, применение теплоизоляции является эффективным методом борьбы с криогенным выпучиванием подземных холодных газопроводов.

Величины нормальных сил морозного пучения, подтвержденные расчетным путем, делают неэффективным применение в качестве балластировки кольцевых и других видов утяжелителей. В связи с этим, и на основе имеющихся расчетов, в качестве одного из технических решений по обеспечению проектного положения газопроводов при воздействии сил морозного пучения в ФГУП «Фундаментпроект» разработано анкерное устройство с использованием составных винтовых анкеров.

Расчетная нагрузка, передаваемая на анкер, в зависимости от коэффициента фильтрации и шага анкеров представлена в таблице 2.

Таблица 2

Расчетные нагрузки, необходимые для предотвращения криогенного выпучивания трубы.

Коэффициент фильтрации Kf , м/сек	Теплозащитный экран под трубой, $R_{из}=2,8$ Вт/м ² °С.	Нагрузка, передаваемая на анкер (тс) при шаге анкеров (м)		
		6	12	20
10^{-9}	нет	9,0	18,0	30,0
	есть	1,0	2,1	3,4
10^{-10}	нет	31,8	63,6	106
	есть	2,4	4,8	8,0

В случае необходимости, несущая способность анкеров обеспечивается искусственным упрочнением грунтового массива путем интенсивного промораживания или химического закрепления.

Выводы

На основании результатов расчетов нормальных сил морозного пучения для холодных газопроводов подземной прокладки разработаны ряд технических мероприятий, достаточных для стабилизации их проектного положения:

- Применение теплозащитного экрана, толщина которого должна быть определена расчетом;
- Устройство льдогрунтовых опор или опор из химически закрепленных грунтов с расположенными в них составными винтовыми анкерами, к которым специальными силовыми поясами крепится труба газопровода;
- Пуск холодного газа предложено осуществлять не ранее января, когда полностью сформируется слой сезонного промерзания над трубой, препятствующий выпучиванию трубы.

Разработанные технические решения заложены в проект магистрального газопровода Ямал-Центр диаметром 1400 мм.

Литература

1. S.E. Grechishchev. *Evaluation of Interaction of Buried Chilled Pipeline with Soils in Taliks Using thermodynamic model*. "Cold Regions Engineering. Proceedings 7-th International Cold Regions Engineering specialty conference March 7-9 1994, Edmonton", printed in Canada, Canadian Society for civil Engineering, pp.805-814.
2. P. Williams/ *Pipelines and Permafrost*, 129 (1986, 1989).
3. С. Акагава , К.Ким , С. Хуанг, Кание, М. Фукуда . *Прогнозирование морозного пучения охлажденного газового трубопровода на талых участках области прерывистой мерзлоты. Материалы междунар. Конф. Криосфера нефтегазоносных провинций*, Тюмень, 2004, с.46.
4. Ш. Кание , С.Акагава , М. Сато , Т. Миками. *Оценка взаимодействия между охлажденным газопроводом и мерзлым грунтом для строительного проектирования. Матер. Междунар. Конф. «Криосфера нефтегазоносных провинций»*, Тюмень, 2004, с.57.
5. С.Е.. Гречищев. *Оценка сил криогенного выпучивания холодных подземных трубопроводов. Матер. Междунар. Конф. «Криосфера нефтегазоносных провинций»*, Тюмень, 2004, с.133.
6. РСН 67-87. *Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима грунтов численными методами*.
7. С.Е. Гречищев, Арк.В.Павлов В.В.Пономарев. *Кинетика замерзания воды в дисперсных грунтах (эксперимент, теория)*. "Материалы первой конференции геокриологов России. Кн.2", Изд. МГУ, Москва, 1996, сс. 19-31.