

3. Земенков Ю. Д., Моисеев Б. В., Илюхин К. Н., Налобин Н. В. Математическая модель температурного режима трубопроводов в вечномёрзлых грунтах // Известия вузов. Нефть и газ. – Тюмень, 2012, № 4. – С. 96-99.

4. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. – М.: Госстрой, 2004. – 29 с.

5. СНиП 41-02-2003. Тепловые сети. – М.: 2004. – 39 с.

6. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. – М.: Госстрой России, 2000. – 62 с.

Сведения об авторах

Земенков Юрий Дмитриевич, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Транспорт углеводородных ресурсов», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)417025

Моисеев Борис Вениаминович, д. т. н., профессор, Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, г. Тюмень

Илюхин Константин Николаевич, к. т. н., доцент, Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, г. Тюмень

Налобин Никита Владимирович, к. т. н., Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, г. Тюмень

Zeemenkov Yu. D., Doctor of Technical Sciences, professor, head of the chair «Hydrocarbon resources transport», Tyumen State Oil and Gas University, phone: 7(3452)417025

Moiseev B. V., Doctor of Technical Sciences, professor, Tyumen State Architectural and Building University

Ilyukhin K. N., Candidate of Technical Sciences, associate professor, Tyumen State Architectural and Building University

Nalobin N. V., Candidate of Technical Sciences, Tyumen State Architectural and Building University

УДК 622.691.4:624.139.2

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ГАЗОПРОВОДА ОТ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТА GAS PIPELINE DEFORMATION CAUSED BY FROSTY HEAVING OF SOIL

А. С. Кузьбожев, И. Н. Бирилло, И. В. Шишкин

A. S. Kuzbozhev, I. N. Birillo, I. V. Shishkin

Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Ухта

Ключевые слова: мерзлые грунты, пучение, напряжения и деформации

Key words: frozen soil, heaving, tension and deformation

Морозное пучение грунта — увеличение объема влажного грунта при замерзании в нем воды, приводящее к подъему слоя промерзающего грунта.

При замерзании даже всей поровой воды в грунте увеличение его объема не превышает 3–4 % (закрытая система). В то же время в натуре объем грунта при его промерзании увеличивается на 10–50 и даже 100 %. Такое увеличение объема грунта при промерзании (пучении) происходит вследствие притока (миграции) воды к фронту промерзания из нижележащих слоев (открытая система).

Увеличение объема при промерзании пучинистых грунтов за счет перехода воды в лед создает давление на примыкающий к фронту промерзания талый грунт. Под действием этого давления грунт начинает перемещаться, однако возникающее давление не может продавить глубоко залегающие нижние плотные слои грунта, поэтому происходит выдавливание грунта вверх, а вместе с ним и находящихся в нем инженерных сооружений.

Промерзание грунта и движение фронта промерзания вглубь начинается при отрицательной температуре наружного воздуха. До тех пор, пока фронт промерзания будет расположен выше верха трубы, силы пучения, действующие на трубу, направлены вниз. Под действием сил пучения газопровод будет перемещаться вниз, то есть будет иметь место осадка трубы. Как показывают экспериментальные исследования [1], такие перемещения незначительны, и в практических расчетах

их можно не учитывать. Когда фронт промерзания грунта переместится ниже верхней образующей трубы, на газопровод будут действовать силы пучения направленные вверх, возрастаая с перемещением фронта промерзания грунта вниз. Когда фронт промерзания грунта переместится ниже нижней образующей трубы, нормальные силы пучения, действующие на всю нижнюю полуокружность трубы, определяются зависимостью [1]

$$q_{n.\max} = D_n [b + H_m \gamma_{zp} \operatorname{tg}^2 (45^\circ + \varphi_{zp} / 2) + 2c_{zp} \operatorname{tg} (45^\circ + \varphi_{zp} / 2)], \quad (1)$$

где D_n — наружный диаметр газопровода; b — прочность грунта на разрыв при 0°C , принимаемая для практических расчетов равной: для супеси $b = 0,03$ МПа, для суглинка и глины $b = 0,04$ МПа; H_m — расстояние от поверхности грунта до фронта промерзания; γ_{zp} — расчетное значение удельного веса талого грунта; φ_{zp} — расчетное значение угла внутреннего трения талого грунта; c_{zp} — расчетное значение сцепления талого грунта.

В процессе промерзания пучинистого грунта нормальные силы пучения стремятся переместить газопровод вверх. Очевидно, что равномерное поднятие грунта, вызванное морозным пучением, не повлияет на напряженно деформированное состояние стенки трубопровода на этом участке, однако в природных условиях, и особенно в процессе выполнения строительно-монтажных работ, вследствие неоднородности состава грунтов, распределения влаги, плотности, условий промерзания и ряда других факторов морозное пучение всегда бывает неравномерным. Неравномерные силы морозного пучения вызывают неравномерное деформирование инженерных сооружений, что может представлять опасность для их функционирования.

Расчетная схема силового взаимодействия газопровода с промерзающими грунтами приведена на рис. 1. Участок на пучинистых грунтах рассматриваем как жестко защемленную балку длиной ℓ . При этом максимальное перемещение $y_{\max}$ сечений газопровода ограничено значением свободного пучения грунта

$$y_{\max} \leq \bar{f} h_m, \quad (2)$$

где $\bar{f}$ — значение относительного пучения грунта на участке прокладки газопровода; h_m — толщина мерзлого грунта под газопроводом.

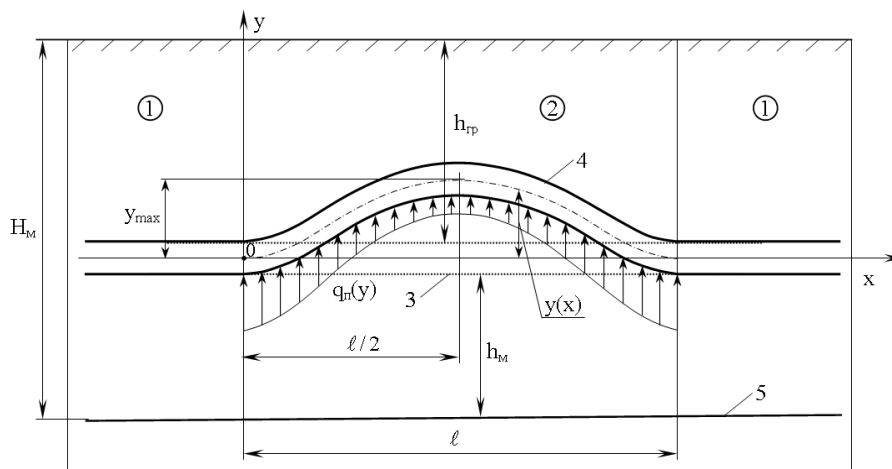


Рис. 1. Расчетная схема силового взаимодействия подземного газопровода с пучинистым грунтом: 1 — непучинистый грунт; 2 — пучинистый грунт; 3 — начальное положение газопровода; 4 — участок деформировавшегося газопровода; 5 — фронт промерзания грунта

Максимальный изгибающий момент на границе участка с пучинистыми грунтами может быть определен по следующим формулам

$$M_{\max} = M(0) = M(\ell) = \frac{q_{n.\max} \ell^2}{12}, \quad \text{при } \frac{q_{n.\max} \ell^4}{384EI} \leq \bar{f} h_m; \quad (3)$$

$$M_{\max} = M(0) = M(\ell) = \sqrt{2q_{n.\max} \bar{f} h_m EI}, \quad \text{при } \frac{q_{n.\max} \ell^4}{384EI} > \bar{f} h_m, \quad (4)$$

где ℓ — длина участка газопровода с пучинистыми грунтами; EI — изгибная жесткость участка газопровода.

В процессе деформирования участка газопровода происходит изменение погонной нагрузки сил морозного пучения в соответствии с зависимостью

$$q_n(y) = q_{n.\max} \left(1 - \frac{y}{\bar{f} h_m} \right), \quad (5)$$

где y — перемещение газопровода вверх от его первоначального положения в контрольном сечении.

В мерзлом грунте газопровод не имеет возможности продольного перемещения. В этом случае суммарные продольные напряжения определяют по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{пр}}^{\max} = 0,3\sigma_{\text{кц}} - \alpha_t E \Delta t \pm \frac{M_{\max}}{W}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{кц}}$ — кольцевые напряжения в стенках труб от расчетного значения внутреннего давления; α_t — коэффициент линейного расширения металла труб; E — модуль упругости материала труб; Δt — температурный перепад; W — момент сопротивления сечения трубы.

Опасность напряженного состояния определяют исходя из требований нормативных документов [2, 3].

Результаты расчетов, выполненных для участка МГ Бованенково — Ухта из труб с толщиной стенки 26,4 мм, проложенного в чрезмерно пучинистом ($\bar{f} = 0,15$) глинистом грунте ($\gamma_{\text{гр}} = 1810 \text{ кг/м}^3$, $\varphi_{\text{гр}} = 10^\circ$, $c_{\text{гр}} = 0,14 \text{ кгс/см}^2$) с заглублением верха трубы от дневной поверхности на 1,0 м, показали следующее.

Максимальная интенсивность поперечной нагрузки $q_{n.\max}$, обусловленная нормальными силами пучения при промерзании грунта на 0,1–0,7 м ниже нижней обрезающей трубы, весьма значительна и составляет от 193 до 215 кН/м, что в 12,4–13,9 раз больше, чем интенсивность поперечной нагрузки от выталкивающей силы воды на полностью погруженный в воду трубопровод.

Морозное пучение грунта вызывает деформирование газопровода и рост напряжений в стенках труб. До тех пор, пока деформации участка газопровода от пучения грунта не превысят его деформаций, с увеличением протяженности участка в стенках труб происходит рост значений механических напряжений.

После того как деформации участка газопровода от пучения грунта достигнут деформаций грунта, происходит стабилизация напряженно-деформированного состояния, то есть увеличение протяженности участка без изменения

толщины мерзлого слоя под трубой не будет вызывать рост механических напряжений (рис. 2).

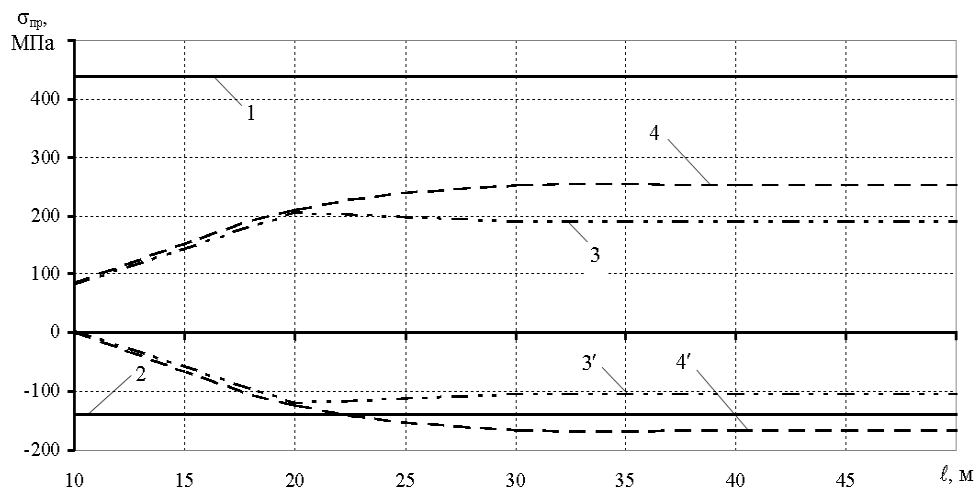


Рис. 2. Изменение максимальных продольных напряжений при морозном выпучивании участка магистрального газопровода 1420 × 26,4 мм:

- 1 — уровень допустимых растягивающих продольных напряжений;
 2 — уровень допустимых сжимающих продольных напряжений;
 3, 3' — значения максимальных продольных растягивающих и сжимающих напряжений при $h_m = 0,1$ м; 4, 4' — значения максимальных продольных растягивающих и сжимающих напряжений при $h_m = 0,2$ м

Допустимый уровень напряженного состояния в стенках газопровода на участке пучинистого грунта достигается при его промерзании под трубой на 0,15 м. При этом длина участка должна быть не менее 24 м, а опасный уровень напряжений наблюдается в сжатых зонах газопровода.

Без проведения мероприятий, направленных на снижение негативного влияния пучинистых грунтов на газопровод, возможно разрушение газопровода в процессе его эксплуатации на границе пучинистого и непучинистого грунта.

Список литературы

1. Айнбиндер А. Б., Камерштейн А. Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. — М.: Недра, 1982. — 341 с.
2. СНиП 2.05.06-85*. Магистральные трубопроводы // Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. — 52 с.
3. СТО Газпром 2-2.1-249-2008 Магистральные газопроводы. — М.: ООО ИРЦ Газпром, 2008.

Сведения об авторах

Кузьбожев Александр Сергеевич, д. т. н., начальник отдела, филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Ухта, тел. 8(8216)741095, e-mail: a.kuzbozhev@sng.vniigaz.gazprom.ru

Бирилло Игорь Николаевич, к. т. н. начальник лаборатории, филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Ухта, тел. 8(8216)752580, e-mail: i.birillo@sng.vniigaz.gazprom.ru

Шишкин Иван Владимирович, инженер, филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Ухта, тел. 8(8216)741095, e-mail: i.shishkin@sng.vniigaz.gazprom.ru

Kuzbozhev A. S., Doctor of Technical Sciences, head of department of Ukhta Branch Office of «Gazprom VNIIGAZ, LLC», phone: 8(8216)741095, e-mail: a.kuzbozhev@sng.vniigaz.gazprom.ru

Birillo I. N., Candidate of Technical Sciences, head of laboratory, Ukhta Branch Office of «Gazprom VNIIGAZ, LLC», phone: 8(8216)752580, e-mail: i.birillo@sng.vniigaz.gazprom.ru

Shishkin I. V., engineer of Ukhta Branch Office of «Gazprom VNIIGAZ, LLC», phone: 8(8216)741095, e-mail: i.shishkin@sng.vniigaz.gazprom.ru