

УДК: 622.692.4.076:662.998

## Моделирование промерзания и оттаивания мерзлых грунтов на участках арктических газопроводов при снижении функциональных показателей теплоизоляции труб

А.С. Кузьбожев<sup>1\*</sup>, Т.И. Работинская<sup>1</sup>, И.В. Шишкин<sup>1</sup>, И.Н. Бирилло<sup>1</sup>, П.А. Кузьбожев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, Российская Федерация, 169330, Республика Коми, г. Ухта, ул. Севастопольская, д. 1-а

\* E-mail: a.kuzbozhev@sng.vniigaz.gazprom.ru

**Тезисы.** Одним из ключевых условий долговременной и безаварийной работы газопровода Бованенково–Ухта на участке Бованенковское газоконденсатное месторождение–КС «Воркутинская» является снижение интенсивности растепления мерзлых грунтов, что достигается за счет обеспечения определенных температурных режимов транспорта газа, а также применения теплоизоляционных покрытий трассового нанесения. При эксплуатации газопровода функциональные характеристики теплоизоляционных покрытий могут ухудшаться с интенсификацией процессов растепления и снижением несущей способности мерзлых грунтов.

В статье определены особенности растепления мерзлых грунтов при повышении теплопроводности теплоизоляционных покрытий труб.

Магистральный газопровод (МГ) Бованенково – Ухта на участке от Бованенковского газоконденсатного месторождения до компрессорной станции «Воркутинская» эксплуатируется в сложных природно-климатических условиях с повсеместным распространением многолетнемерзлых грунтов. Для снижения отепляющего воздействия газопровода на мерзлые грунты проектом предусмотрено использование теплоизоляции трассового нанесения<sup>1</sup> [1], формируемой из сегментов, выполненных из пенополиуретана или пенополистирола. В ходе эксплуатации газопровода эксплуатационные характеристики теплоизоляции могут снижаться под влиянием ряда факторов, основным из которых является нарушение целостности теплоизоляционного слоя с формированием зон повышенной теплопроводности в местах стыковки сегментов (при заполнении зазоров грунтовой водой). Вследствие того, что теплоизоляция труб большого диаметра, как правило, включает много отдельных сегментов относительно малой ширины, количество зон повышенной теплопроводности на участке газопровода единичной длины может быть значительным. С ростом числа зон повышенной теплопроводности увеличивается и общая теплопроводность теплоизоляционного слоя.

Оценка особенностей растепления мерзлых грунтов при повышении теплопроводности теплоизоляционного слоя труб позволяет определить размеры ореолов оттаивания с последующим прогнозированием развития нарушений устойчивого положения участков МГ.

### Методика проведения исследований

Расчетное моделирование [2] выполняется с применением двумерной модели, представляющей собой поперечный разрез трассы подземного теплоизолированного газопровода. Используются следующие исходные данные:

- теплоизоляция трубы представляет собой цилиндрическую оболочку со стенкой 100-миллиметровой толщины. Плотность теплоизоляционного материала –  $45 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ,

<sup>1</sup> См. также СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов / утв. приказом Министерства регионального развития РФ № 608 от 27 декабря 2011 г. – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 67 с.

**Ключевые слова:** газопровод, мерзлый грунт, теплоизоляция, температура.

удельная теплоемкость –  $1450 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , теплопроводность –  $0,043 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;

- грунт – мерзлый суглинок плотностью  $2100 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , теплопроводность в мерзлом и талом состояниях – соответственно  $1,64$  и  $1,52 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , температура замерзания – минус  $0,15 \text{ }^\circ\text{C}$ , теплоемкость в мерзлом и талом состояниях – соответственно  $716$  и  $562 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;

- в расчете учитывается теплота фазовых переходов при промерзании и оттаивании грунта;

- температура транспортируемого газа составляет  $+3$  и  $+7 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- начальная температура мерзлого грунта – минус  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- температура воздуха для каждого месяца заданного временного интервала определяется в соответствии с СП 131.13330.2012<sup>2</sup>;

- температура грунта на нижней границе расчетной области составляет минус  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

- продолжительность расчетного интервала – 28 месяцев, начало расчетного периода – 1-е мая, завершение – 1-е сентября. Расчетный интервал включает три периода положительных среднесуточных температур воздуха и два периода отрицательных среднесуточных температур воздуха.

Расчетное моделирование теплового взаимодействия теплоизолированного газопровода с мерзлыми грунтами выполняется в следующей последовательности:

- определение особенностей процесса промерзания и оттаивания мерзлого грунта с ненарушенной структурой (газопровод в расчетной модели отсутствует);

- моделирование процесса сезонного промерзания и оттаивания грунта, окружающего подземный теплоизолированный газопровод, по которому не транспортируется газ;

- моделирование теплового взаимодействия теплоизолированного газопровода с мерзлым грунтом с учетом естественных отепляющих и охлаждающих факторов при различных значениях теплофизических характеристик материала теплоизоляции.

## Результаты

Результаты моделирования процесса сезонного промерзания и оттаивания мерзлого грунта с ненарушенной структурой показаны на рис. 1. Полученные расчетные данные соответствуют фактическим значениям температуры грунта на различных глубинах. Глубина сезонного оттаивания грунта составляет  $1,5 \dots 1,6 \text{ м}$ , что также соответствует фактическим данным.

Наличие в массиве грунта не введенного в эксплуатацию теплоизолированного газопровода способствует изменению температурных режимов окружающих газопровод грунтов (рис. 2). По завершении 1-го периода положительных среднесуточных температур воздуха (4-й месяц расчетного интервала) отмечается увеличение глубины оттаивания грунта над газопроводом на  $0,1 \dots 0,2 \text{ м}$  по сравнению с глубинами сезонного оттаивания грунтов с ненарушенной структурой. По завершении 1-го периода отрицательных температур воздуха (9-й месяц расчетного интервала) вокруг газопровода формируется замкнутая область, в пределах которой температура грунта на  $0,5 \dots 1 \text{ }^\circ\text{C}$  превышает температуру, характерную для глубин  $2,5 \dots 3,0 \text{ м}$  в грунтах с ненарушенной структурой.

Результаты расчетного моделирования теплового взаимодействия подземного теплоизолированного газопровода с мерзлым грунтом с учетом естественных отепляющих и охлаждающих факторов при различных значениях теплофизических характеристик материала теплоизоляции показывают следующее.

При значении коэффициента теплопроводности материала теплоизоляции труб  $0,043 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  и температуре транспортируемого газа  $+3 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение всего расчетного интервала грунт в основании МГ будет находиться в мерзлом состоянии (рис. 3, см. а). Наблюдаемые колебания температуры грунта связаны с отепляющим (охлаждающим) действием естественных факторов. Снижение амплитуд колебаний температуры грунта в большей степени связано с экранирующим действием газопровода, ограничивающим интенсивность промерзания грунта в основании МГ в зимние периоды. При температуре транспортируемого газа  $+7 \text{ }^\circ\text{C}$  через 28 месяцев после начала эксплуатации глубина оттаивания грунта в основании МГ (здесь и далее – глубина от уровня нижней образующей трубы) составит  $0,3 \text{ м}$  (см. рис. 3б). В течение

<sup>2</sup> См. СП 131.13330.2012. Строительная климатология / утв. приказом Министерства регионального развития РФ № 275 от 30 июня 2012 г. – М.: Изд-во ФАУ ФЦС, 2015. – 124 с.

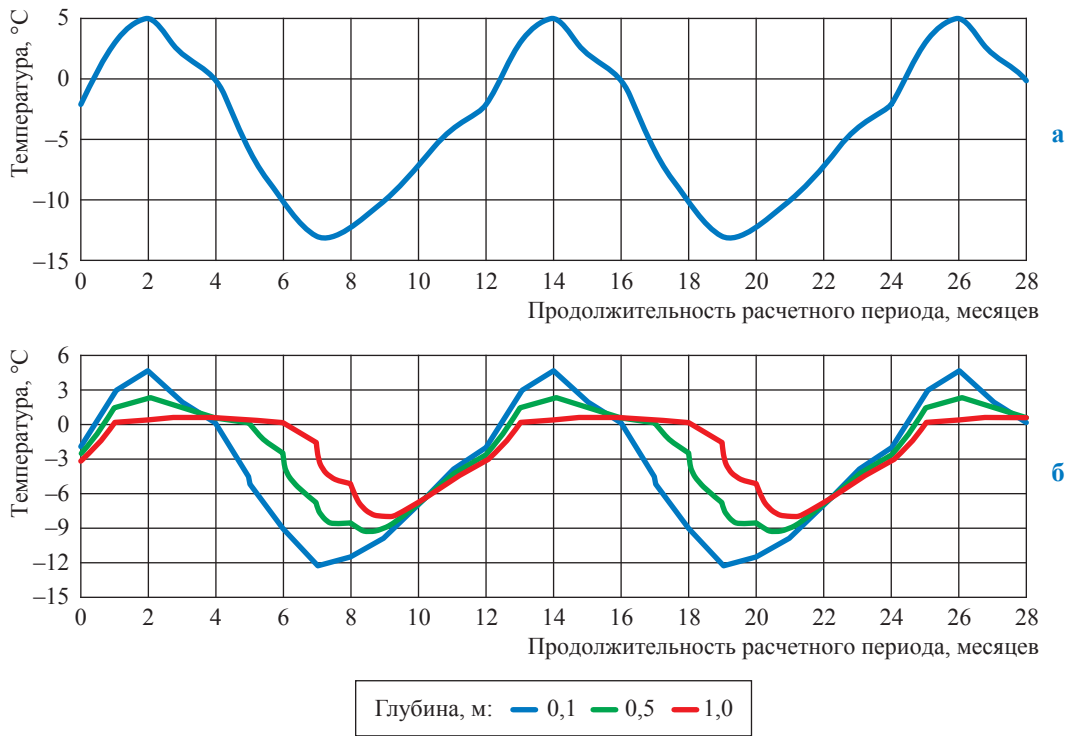


Рис. 1. Динамика изменения температуры грунта на поверхности (а) и в приповерхностном слое (б)

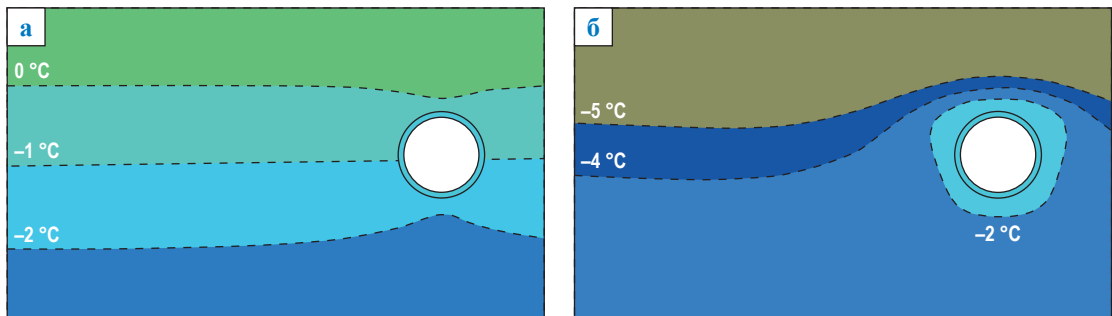


Рис. 2. Распределение изолиний температурных полей в пределах расчетной модели в 4-й (а) и 9-й (б) месяцы расчетного интервала

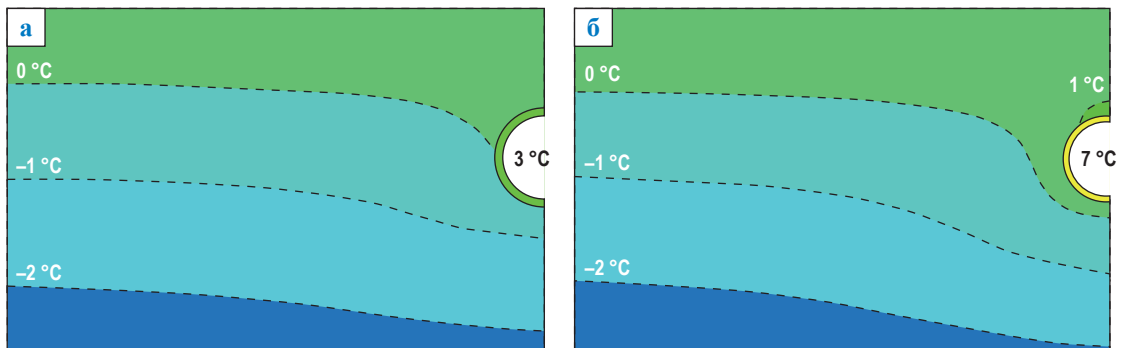


Рис. 3. Поля распределения температур в пределах расчетной модели (завершение расчетного интервала) при наличии вокруг трубы кольцевой теплоизоляции с коэффициентом теплопроводности  $0,043 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  и температурах газа  $+3 \text{ °С}$  (а) и  $+7 \text{ °С}$  (б)

первых четырех месяцев расчетного интервала происходит интенсивный рост температуры грунта. Через 8 месяцев температура стабилизируется. Влияние естественных отепляющих (охлаждающих) факторов прослеживается слабо, амплитуда колебаний температуры не превышает  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  в период с 8-го по 20-й месяц и  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  в период с 20-го по 28-й месяц.

При значении коэффициента теплопроводности материала теплоизоляции  $0,1\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  и температуре газа  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$  глубина оттаивания грунта в основании МГ по завершении расчетного интервала (28 месяцев) составляет от  $0,2$  до  $0,3\text{ м}$  (рис. 4, см. а). Стабилизация температуры грунта в основании МГ происходит спустя 8 месяцев после начала эксплуатации. Амплитуда сезонных колебаний температуры грунта в основании МГ составляет до  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  в период с 8-го по 20-й месяц и  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  в период с 20-го по 28-й месяц. При температуре газа  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$  глубина оттаивания грунта по завершении расчетного интервала составляет  $1,0\text{ м}$ . Интенсивный рост температуры грунта

наблюдается в течение первых трех месяцев эксплуатации МГ, далее скорость растепления постепенно снижается.

При значении коэффициента теплопроводности материала теплоизоляции  $0,2\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  и температуре газа  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$  глубина оттаивания грунта в основании МГ составляет  $0,7\text{ м}$  (рис. 5, см. а), стабилизация температуры происходит через  $12\dots16$  месяцев после начала эксплуатации МГ. Влияние естественных отепляющих (охлаждающих) факторов прослеживается на глубинах (от уровня нижней образующей трубы) свыше  $0,5\text{ м}$ , амплитуда сезонных колебаний температуры грунта составляет  $0,1\dots0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При температуре транспортируемого газа  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$  глубина оттаивания грунта в основании МГ по завершении расчетного интервала составляет  $1,6\text{ м}$  (см. рис. 5б). Стабилизация температуры грунта основания МГ предположительно произойдет через  $36\dots38$  месяцев после начала эксплуатации, глубина оттаивания грунта составит  $1,7\dots1,8\text{ м}$ .

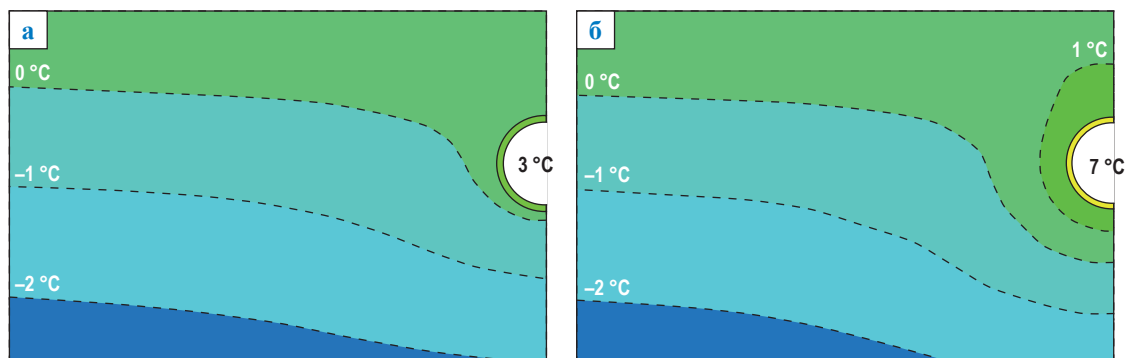


Рис. 4. Поля распределения температур в пределах расчетной модели (завершение расчетного интервала) при наличии вокруг трубы кольцевой теплоизоляции с коэффициентом теплопроводности  $0,1\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  и температурах газа  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (а) и  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б)

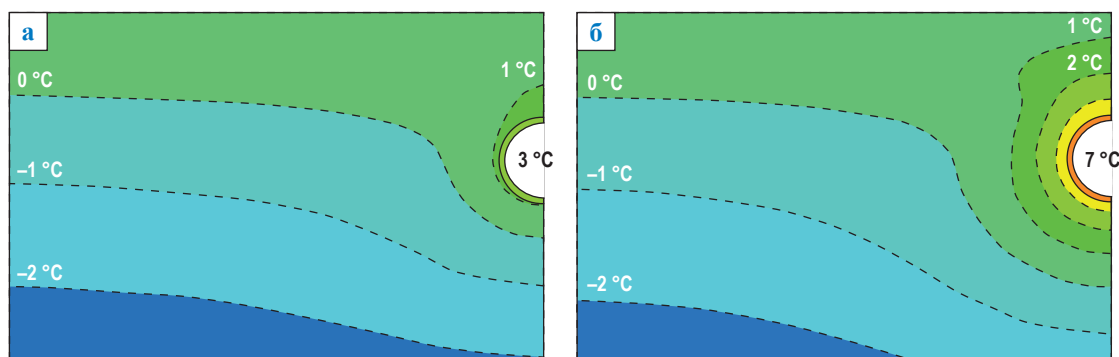


Рис. 5. Поля распределения температур в пределах расчетной модели (завершение расчетного интервала) при наличии вокруг трубы кольцевой теплоизоляции с коэффициентом теплопроводности  $0,2\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  и температурах газа  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (а) и  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б)

При значении коэффициента теплопроводности материала теплоизоляции  $0,4 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  и температуре газа  $+3 \text{ }^\circ\text{C}$  глубина оттаивания грунта в основании МГ спустя 28 месяцев после начала эксплуатации составляет  $1,0 \text{ м}$ , стабилизация температуры происходит через  $16\dots 20$  месяцев (рис. 6, см. а). Влияние естественных отепляющих (охлаждающих) факторов прослеживается на глубинах (от уровня нижней образующей трубы) свыше  $1,2 \text{ м}$ , амплитуда сезонных колебаний составляет  $0,05\dots 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . При температуре газа  $+7 \text{ }^\circ\text{C}$  глубина оттаивания грунта в основании МГ по завершении расчетного интервала составляет  $2,1 \text{ м}$  (см. рис. 6б). Стабилизация температуры грунта основания МГ предположительно произойдет через  $40\dots 42$  месяца после начала эксплуатации, глубина оттаивания грунта составит  $2,2\dots 2,3 \text{ м}$ .

При значении коэффициента теплопроводности материала теплоизоляции  $0,7 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  и температуре газа  $+3 \text{ }^\circ\text{C}$  глубина оттаивания

грунта в основании МГ через 28 месяцев после начала эксплуатации составляет  $1,3 \text{ м}$ , стабилизация температуры происходит через  $20\dots 24$  месяца (рис. 7, см. а). Влияние естественных отепляющих (охлаждающих) факторов прослеживается на глубинах (от уровня нижней образующей трубы) свыше  $1,6 \text{ м}$ . Амплитуда сезонных колебаний составляет  $0,05\dots 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . При температуре газа  $+7 \text{ }^\circ\text{C}$  глубина оттаивания грунта в основании МГ по завершении расчетного интервала составляет  $2,5 \text{ м}$  (см. рис. 7б). Стабилизация температуры грунта основания МГ предположительно произойдет через  $46\dots 48$  месяцев после начала эксплуатации, глубина оттаивания грунта составит  $2,6\dots 2,7 \text{ м}$ .

\*\*\*

По результатам выполненного расчетного моделирования установлено следующее:

- при температуре газа  $+3 \text{ }^\circ\text{C}$  и исправной теплоизоляции труб мерзлый грунт

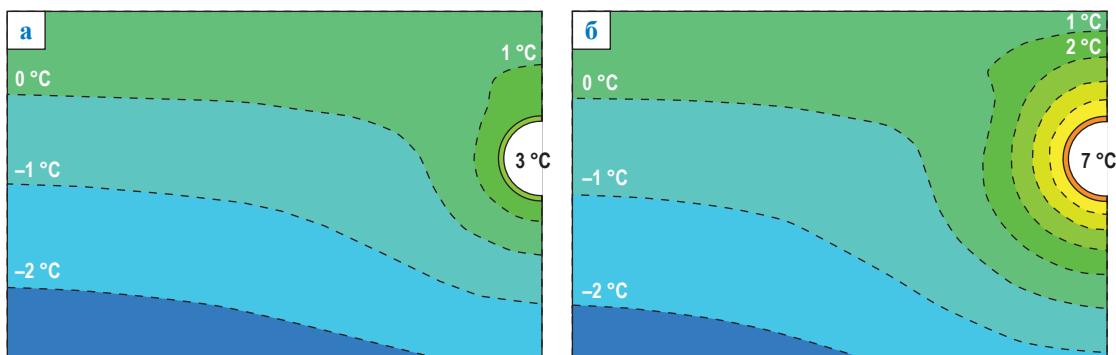


Рис. 6. Поля распределения температур в пределах расчетной модели (завершение расчетного интервала) при наличии вокруг трубы кольцевой теплоизоляции с коэффициентом теплопроводности  $0,4 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  и температурах газа  $+3 \text{ }^\circ\text{C}$  (а) и  $+7 \text{ }^\circ\text{C}$  (б)

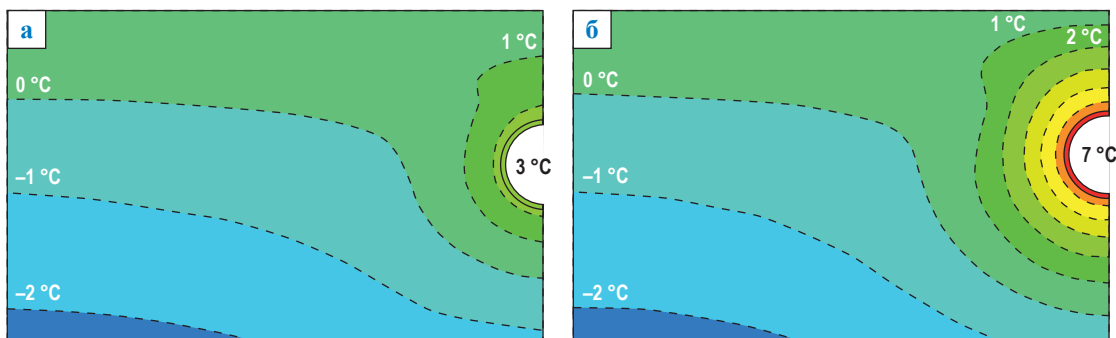
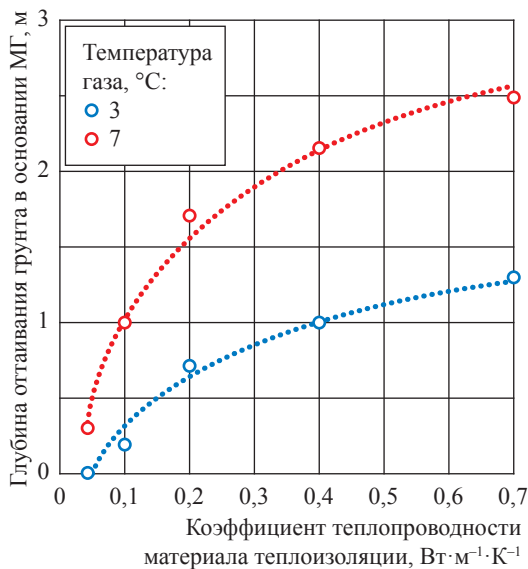


Рис. 7. Поля распределения температур в пределах расчетной модели (завершение расчетного интервала) при наличии вокруг трубы кольцевой теплоизоляции с коэффициентом теплопроводности  $0,7 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  и температурах газа  $+3 \text{ }^\circ\text{C}$  (а) и  $+7 \text{ }^\circ\text{C}$  (б)



**Рис. 8. Глубина оттаивания грунта в основании МГ спустя 28 месяцев после начала эксплуатации в зависимости от коэффициента теплопроводности материала теплоизоляции и температуры газа в трубе**

в основании МГ будет находиться в стабильно мерзлом состоянии, а над трубой в летние периоды будет оттаивать полностью;

- при температуре газа +7 °С вне зависимости от состояния теплоизоляционного слоя грунт в основании МГ будет находиться в стабильно талом состоянии;
- глубина оттаивания грунта в основании МГ, транспортирующего газ с положительной температурой, при увеличении теплопроводности материала теплоизоляции увеличивается (рис. 8).

### Список литературы

1. Р 536-84. Рекомендации по проектированию теплоизоляционных конструкций магистральных трубопроводов / утв. ВНИИСТ 14 декабря 1983 г. – М.: ВНИИСТ, 1985. – 54 с.
2. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров: справ. пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.

## Modeling of freezing and thawing of frozen soils in the Arctic gas pipelines while reducing functional parameters of pipe insulation

A.S. Kuzbozhev<sup>1\*</sup>, T.I. Rabotinskaya<sup>1</sup>, I.V. Shishkin<sup>1</sup>, I.N. Birillo<sup>1</sup>, P.A. Kuzbozhev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ukhta Subsidiary of the Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1-a, Sevastopolskaya street, Ukhta, The Komi Republic, 169330, Russian Federation,

\* E-mail: a.kuzbozhev@sng.vniigaz.gazprom.ru

**Abstract.** One of the key conditions for long-term and trouble-free operation of the Bovanenkovo–Ukhta gas pipeline at a section between Bovanenkovo gas condensate field and Vorkuta compressor station is decrease in the rate of thawing of frozen soils, which is achieved by providing certain temperature conditions for gas transport, as well as the use of heat-insulating coatings for route application. During operation of the gas pipeline, the functional characteristics of heat-insulating coatings may go down with intensification of a thawing processes and worsening of the bearing capacity of frozen soils.

In this paper, authors determined the features of the thawing frozen soils with increase in thermal conductivity of heat-insulating pipe coatings.

**Keywords:** gas pipeline, frozen soil, thermal insulation, temperature.

### References

1. R 536-84. *Recommendations on design of heat insulation for trunk gas pipelines* [Rekomendatsii po proyektirovaniyu teploizolyatsionnykh konstruktsiy magistralnykh truboprovodov]. Approved on 14 December 1983. Moscow: All-Union Research Institute for Construction and Operation of Pipelines, 1985. (Russ.).
2. CHIGAREV, A.V., A.S. KRAVCHUK, A.F. SMALYUK. *ANSYS for engineers* [ANSYS dlya inzhenerov]: reference manual. Moscow: Mashinostroyeniye, 2004. (Russ.).