

УДК 622.692.4.076:662.998

Расчетное моделирование параметров температурных полей в грунте, окружающем газопровод с дефектом теплоизоляционного покрытия

А.С. Кузьбожев^{1*}, Т.И. Работинская¹, И.В. Шишкин¹, И.Н. Бирилло¹, П.А. Кузьбожев¹

¹ 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. При засыпке магистрального газопровода (МГ) мерзлым грунтом во время строительства, а также при взаимодействии подземного трубопровода и мерзлых грунтов во время эксплуатации в некоторых случаях между отдельными сегментами могут формироваться дефекты теплоизоляции в виде зазоров, снижающие эффективность теплоизоляционных свойств покрытия.

С целью анализа и оценки температурных полей в грунте, окружающем газопровод с дефектом теплоизоляционного покрытия, выполнено расчетное моделирование для двух случаев: «грунт талый – газ холодный» и «грунт мерзлый – газ теплый».

Установлено, что при наличии в теплоизоляционном слое дефектов шириной (и протяженностью) менее 100 мм, вне зависимости от их расположения, газопровод не оказывает существенного влияния на формирование температурных полей в грунте вне зависимости от температуры газа. При ширине (и протяженности) дефекта более 100 мм в окрестности газопровода могут формироваться временные или стабильные области талого или мерзлого грунта.

Также определено, что для «теплых» участков МГ наиболее опасными будут являться дефекты теплоизоляционного слоя, расположенные в пределах нижней половины трубы и обеспечивающие интенсификацию процесса оттаивания и осадки грунтового основания.

На «холодных» участках МГ, проложенных в талых грунтах, дефекты в пределах нижней половины трубы могут способствовать ускоренному промерзанию грунта в основании МГ и возможному развитию морозного пучения. Дефекты в пределах верхней половины трубы способствуют промерзанию грунта над МГ, что в дальнейшем может способствовать формированию преград водотoku грунтовых и поверхностных вод в весенний и летний периоды.

В настоящее время для теплоизоляции магистральных газопроводов (МГ) применяется покрытие трассового нанесения, которое состоит из отдельных сегментов или блок-сегментов, выполненных из вспененного полиуретана. Сегменты закрепляют на трубах после монтажа трубопровода в трассовых условиях с помощью стальных или полимерных хомутов. Целевым назначением теплоизоляционного покрытия является ограничение интенсивности развития следующих процессов:

- избыточного переохлаждения талого грунта, контактирующего с газопроводом, на участках транспорта газа с отрицательной температурой;
- оттаивания мерзлого околотрубного грунта на участках транспорта газа с положительной температурой.

Так, при сооружении первой нитки МГ Бованенково – Ухта реализованы технические решения по теплоизоляции верхней половины газопровода, а также теплоизоляции по всему периметру труб (кольцевая теплоизоляция), теплоизоляции стенок и дна траншеи, основания насыпей при наземной прокладке МГ. Общее количество теплоизолированных участков – более 250 ед. (более 190 ед. на территории п-ова Ямал и около 60 ед. на участке МГ Бованенково – Ухта, 1-я нитка, км 194 – км 430 км). Суммарная протяженность участков МГ, в пределах которых реализованы технические решения по теплоизоляции, составляет более 53 км. Для теплоизоляции применялись сегменты теплоизоляции «Пеноплэкс» или «Экстрол» толщиной 100 мм.

В случае если при эксплуатации газопроводов теплоизоляция будет сохраняться в виде монолитного бездефектного слоя, проектом гарантируется эффективное противодействие теплоизоляции процессам оттаивания или избыточного промерзания околотрубного грунта. Однако при засыпке газопровода мерзлым грунтом во время

Ключевые слова: магистральный газопровод, мерзлый грунт, теплоизоляция, расчетная модель.

строительства, а также при взаимодействии подземного трубопровода и мерзлых грунтов во время эксплуатации в некоторых случаях между отдельными сегментами могут формироваться дефекты теплоизоляции в виде зазоров, снижающих эффективность теплоизоляционных свойств покрытия. Зазоры между сегментами теплоизоляции потенциально могут быть сформированы при взаимодействии газопровода с грунтом в основании траншеи и при взаимодействии грунта засыпки с поверхностью покрытия. Обычно проектом предусматривается укладка газопровода на мягкое грунтовое основание с последующей засыпкой минеральным привозным грунтом на высоту не менее 0,2 м над верхней образующей трубы. Формирование повреждений в указанных условиях возможно в следующих случаях:

- в насыпном основании на дне траншеи присутствуют единичные мерзлые фрагменты грунта, при взаимодействии с которыми будет происходить сдвиг или разрушение сегментов теплоизоляционного покрытия в окрестности нижней образующей трубы;

- вследствие недостаточного натяжения стяжных хомутов или при их разрушении в процессе засыпки МГ грунтом и последующей усадке грунта возможно смещение сегментов с формированием зазоров в окрестности верхней и боковых образующих труб.

Расчетная модель

Моделирование параметров температурных полей в грунте, окружающем газопровод с дефектом теплоизоляционного покрытия, проводилось для двух случаев:

- грунт талый (температура 2 °С), газ холодный (температура газа от минус 10 до минус 18 °С);
- грунт мерзлый (температура минус 3 °С), газ теплый (температура газа от 3 до 7 °С).

В расчетах приняты следующие исходные данные:

- плотность теплоизоляционного материала – 45 кг/м³, удельная теплоемкость – 1450 Дж/(кг·°С), теплопроводность – 0,035 Вт/(м·°С);
- грунт – суглинок, плотность – 2100 кг/м³, теплопроводность в мерзлом состоянии – 1,64 Вт/(м·°С), теплопроводность в талом состоянии – 1,52 Вт/(м·°С), температура замерзания – минус 1,5 °С, теплоемкость в талом

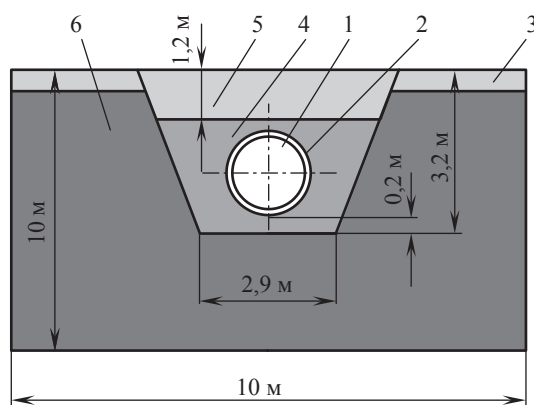


Рис. 1. Схема к расчету температурных полей в грунте, окружающем теплоизолированный газопровод:
1 – газопровод (диаметр 1420 мм);
2 – теплоизоляционное покрытие (100 мм);
3 – слой торфа и растительных остатков (0,5 м); 4 – песок; 5 – грунт засыпки;
6 – многолетнемерзлый грунт с ненарушенной структурой

состоянии – 562 Дж/(кг·°С), теплоемкость в мерзлом состоянии – 716 Дж/(кг·°С);

- в расчете учитывается теплота фазовых переходов при промерзании и оттаивании грунта;
- продолжительность расчетного периода – 1 год.

Схема расчетной области представлена на рис. 1.

С учетом рекомендаций, изложенных в СП 61.13330.2012 [1] и Р 536-84 [2], разработана расчетная модель процессов оттаивания и промерзания грунтов при нарушениях теплоизоляционных покрытий. Расчетная модель выполнена для поперечного сечения участка трассы теплоизолированного газопровода. Дефект теплоизоляционного покрытия имитирован в виде единичного сегмента теплоизоляции заданной ширины (протяженность по окружности трубы) 10, 20 и 30 см, расположенного на боковой, верхней и нижней образующих трубы. В дефекте теплоизоляции поверхность трубы напрямую контактирует с окружающим газопроводом грунтом.

Результаты расчетов

Определены следующие особенности теплового взаимодействия «теплого» теплоизолированного газопровода с мерзлым грунтом при условии наличия на боковой образующей

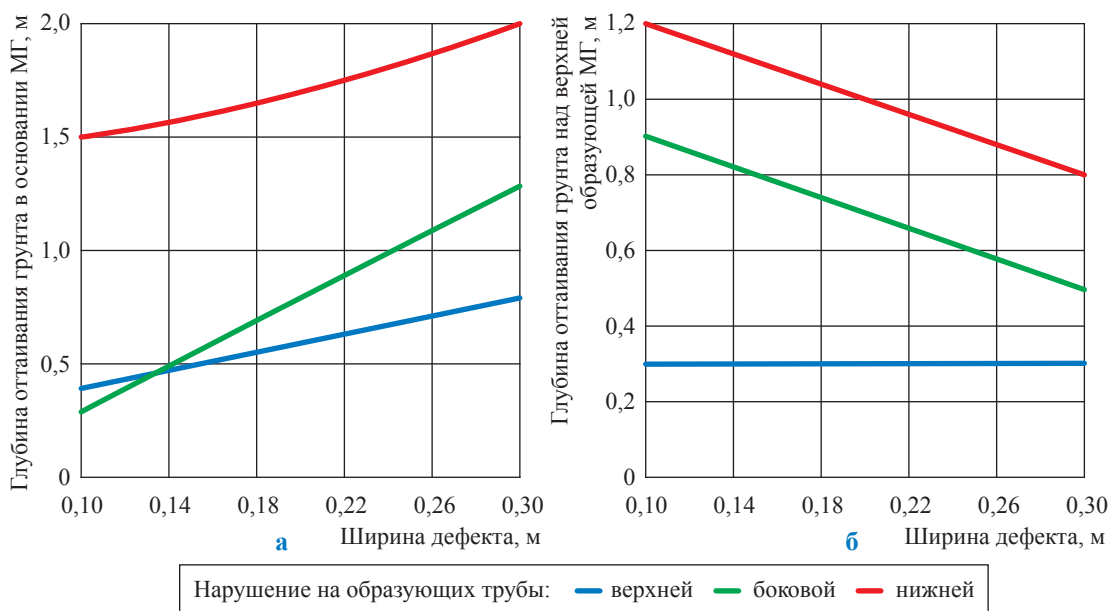


Рис. 3. Глубина оттаивания грунта в летний период в основании «теплого» газопровода при температуре газа 7 °С (а) и над «холодным» газопроводом при температуре газа минус 10 °С (б) при наличии единичных нарушений теплоизоляции шириной 0,1; 0,2 и 0,3 м

не менее 0,2 м при температуре газа 3 °С и не меньше 1,3 м при 7 °С.

При расположении нарушения теплоизоляции на уровне верхней образующей трубы особенности распределения температур в конце летнего периода в оттаивающем грунте следующие:

- при температуре газа 3 °С и ширине дефекта от 0,1 до 0,3 м грунт в основании траншеи остается в мерзлом состоянии;
- при температуре газа 7 °С и ширине дефекта 0,1 м грунт в основании МГ оттаивает на глубину до 0,4 м;
- при температуре газа 7 °С и ширине дефекта 0,2 м грунт в основании трубы оттаивает на глубину до 0,6 м;
- при температуре газа 7 °С и ширине дефекта 0,3 м грунт в основании трубы оттаивает на глубину до 0,8 м.

В случае расположения нарушения теплоизоляции на уровне нижней образующей трубы особенности распределения температур в конце летнего периода в оттаивающем грунте будут иметь следующий вид:

- при ширине дефекта от 0,1 м и температуре газа 3 °С глубина оттаивания грунта в основании МГ достигает 0,4 м, а при температуре газа 7 °С – 1,5 м;

- при ширине дефекта от 0,2 м и температуре газа 3 °С глубина оттаивания грунта в основании МГ составляет 1,2 м, а при температуре газа 7 °С – 1,7 м;

- при ширине дефекта от 0,3 м и температуре газа 3 °С глубина оттаивания грунта в основании МГ составляет 1,4 м, а при температуре газа 7 °С – 2 м.

Тепловое взаимодействие «холодного» теплоизолированного газопровода с талым грунтом при условии наличия в теплоизоляционном слое на боковой образующей трубы дефекта шириной 0,1 и 0,3 м будет иметь следующие особенности (рис. 4):

- при наличии дефекта шириной 0,1 м в весенний и последующий летний периоды наблюдается стабилизация температуры мерзлого грунта в окрестности дефекта на одном уровне (на расстоянии 0,1 м от дефекта при температуре газа минус 10 °С – от минус 4,8 до минус 5 °С и при температуре газа минус 18 °С – от минус 10 до минус 10,5 °С). Грунт над верхней образующей МГ при температуре газа минус 10 °С оттаивает полностью. При температуре газа минус 18 °С глубина оттаивания грунта над осью МГ составляет не более 0,9 м;
- при наличии дефекта шириной 0,3 м в летний период при температуре газа

взаимодействия «холодного» газопровода и талого грунта в летний период следующие:

- при ширине дефекта 0,1 м глубина оттаивания грунта над осью МГ составляет не более 0,7 м при температуре газа минус 10 °С и не более 0,3 м при минус 18 °С;
- при ширине дефекта 0,3 м глубина оттаивания грунта над осью МГ составляет не более 0,6 м при температуре газа минус 10 °С и не более 0,3 м при минус 18 °С.

При наличии дефекта на нижней образующей трубы тепловое взаимодействие «холодного» газопровода и талого грунта имеет следующие особенности:

- при наличии дефекта шириной 0,1 м в летний период глубина промерзания грунта в основании МГ составляет не менее 1,6 м при температуре газа минус 10 °С и не менее 2,6 м при минус 18 °С. При температуре газа минус 10 °С грунт над МГ оттаивает практически полностью. При температуре газа минус 18 °С грунт в приповерхностном слое над осью МГ оттаивает на глубину не менее 1,2 м;

- при ширине дефекта 0,3 м в летний период глубина промерзания грунта в основании МГ составляет не менее 2,3 м при температуре газа минус 10 °С и не менее 3 м при минус 18 °С. При температуре газа минус 10 °С грунт над МГ оттаивает на глубину не менее 1,5 м. При температуре газа минус 18 °С грунт в приповерхностном слое над осью МГ оттаивает на глубину не менее 0,8 м.

Установлено, что при отсутствии дефектов реализованные при сооружении МГ Бованенково – Ухта проектные решения по теплозащите являются достаточно эффективными.

Независимо от расположения в теплоизоляционном слое дефектов шириной и протяженностью менее 100 мм и температуры газа газопровод не оказывает существенного влияния на формирование температурных полей в грунте.

При ширине и протяженности дефекта более 100 мм в окрестности газопровода могут формироваться временные или стабильные области талого или мерзлого грунта.

Установлено, что для «теплых» участков МГ наиболее опасными будут являться дефекты теплоизоляционного слоя, расположенные в пределах нижней половины трубы и обеспечивающие интенсификацию процесса оттаивания и осадки грунтового основания.

На «холодных» участках МГ, проложенных в талых грунтах, дефекты в пределах нижней половины трубы могут способствовать ускоренному промерзанию грунта в основании МГ и возможному развитию морозного пучения. Дефекты в пределах верхней половины трубы способствуют промерзанию грунта над МГ, что в дальнейшем может способствовать формированию преград водотоку грунтовых и поверхностных вод в весенний и летний периоды.

Список литературы

1. СП 61.13330.2012 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов (утв. приказом Министерства регионального развития РФ № 608 от 27.12.2011). – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 67 с.
2. Р 536-84 Рекомендации по проектированию теплоизоляционных конструкций магистральных трубопроводов (утв. ВНИИСТ 14.12.1983). – М.: ВНИИСТ, 1985. – 54 с.