

УДК 622.692.4.076:662.998

Диагностирование устойчивости теплоизолированных газопроводов при эксплуатации на мерзлых грунтах

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

Ключевые слова: магистральный газопровод, мерзлый грунт, пучинистый грунт, теплоизоляция.

Тезисы. Северные участки магистрального газопровода (МГ) Бованенково – Ухта эксплуатируются в сложных геокриологических условиях, для которых характерно повсеместное распространение мерзлых и талых пучинистых грунтов. Для снижения интенсивности теплового воздействия газопровода на мерзлые грунты, а также ограничения промерзания талых грунтов, контактирующих с холодным газопроводом, предусмотрена теплоизоляция труб газопровода. Механическое взаимодействие газопровода с мерзлыми грунтами, взаимные перемещения грунта и газопровода могут привести к развитию дефектов теплоизоляционных покрытий.

Важным направлением поддержания надежной эксплуатации газопроводов, обеспечения их устойчивого положения в мерзлых грунтах является диагностирование, оценка состояния теплоизоляционных конструкций.

Для разработки процедур диагностирования теплоизолированных участков газопроводов по заданию ООО «Газпром трансгаз Ухта» филиалом ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта была реализована научно-исследовательская работа, результатом которой стал стандарт Общества «Газпром трансгаз Ухта» «Методы восстановления устойчивости магистральных газопроводов при образовании эксплуатационных нарушений теплоизоляционных покрытий в многолетнемерзлых грунтах».

Разработанный алгоритм позволяет выполнить комплексное диагностирование устойчивости теплоизолированных участков МГ, выявить дефектные участки и принять решение о необходимости ремонта теплоизоляции и восстановления проектного положения участка газопровода. Опыт применения на практике вышеуказанного стандарта ООО «Газпром трансгаз Ухта» показывает, что нормативный документ может быть рекомендован для использования в других дочерних обществах, эксплуатирующих газопроводы, пролегающие по территории распространения мерзлых грунтов.

Северные участки магистрального газопровода (МГ) Бованенково – Ухта эксплуатируются в сложных геокриологических условиях, для которых характерно повсеместное распространение мерзлых и талых пучинистых грунтов. Для снижения интенсивности теплового воздействия газопровода на мерзлые грунты, а также ограничения промерзания талых грунтов, контактирующих с холодным газопроводом, предусмотрена теплоизоляция труб газопровода. Для сохранения температурного режима мерзлого грунта в основании насыпей участков наземной прокладки газопровода, стенок и дна траншеи подземного газопровода, в основании средств инженерной защиты (георешетки, водопропускные и перепускные лотки и др.) проектом на сооружение МГ Бованенково – Ухта предусмотрено применение различных видов теплоизоляционных экранов. В соответствии с проектным обоснованием бездефектное кольцевое теплоизоляционное покрытие труб или теплоизоляция в основании насыпи линейного объекта МГ исключает критическое изменение температурного режима мерзлых или талых грунтов, сопровождающееся снижением их несущей способности или увеличением объема при промерзании. Однако механическое взаимодействие газопровода с мерзлыми грунтами, взаимные перемещения грунта и газопровода могут привести к развитию дефектов теплоизоляционных покрытий. Поэтому важным направлением поддержания надежной эксплуатации газопроводов, обеспечения их устойчивого положения в мерзлых грунтах является диагностирование и оценка состояния теплоизоляционных конструкций. При этом общепринятые методы диагностирования газопроводов, как правило, не позволяют напрямую определить дефектное состояние и эффективность теплоизоляционных покрытий. Поэтому разработка и уточнение процедур диагностирования теплоизолированных газопроводов, предполагающих комплексные исследования с использованием различных

методов контроля, является актуальной задачей, реализация которой позволит обеспечить безаварийную эксплуатацию МГ в течение всего срока службы.

Методы диагностирования

Для разработки процедур диагностирования теплоизолированных участков газопроводов по заданию ООО «Газпром трансгаз Ухта» филиалом ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта была реализована научно-исследовательская

работа, результатом которой стал стандарт «Методы восстановления устойчивости магистральных газопроводов при образовании эксплуатационных нарушений теплоизоляционных покрытий в многолетнемерзлых грунтах».

Диагностирование устойчивого положения теплоизолированных участков МГ при формировании эксплуатационных повреждений теплоизоляции включало три этапа выполнения (рис. 1):

1) первичная оценка состояния теплоизолированных участков МГ;

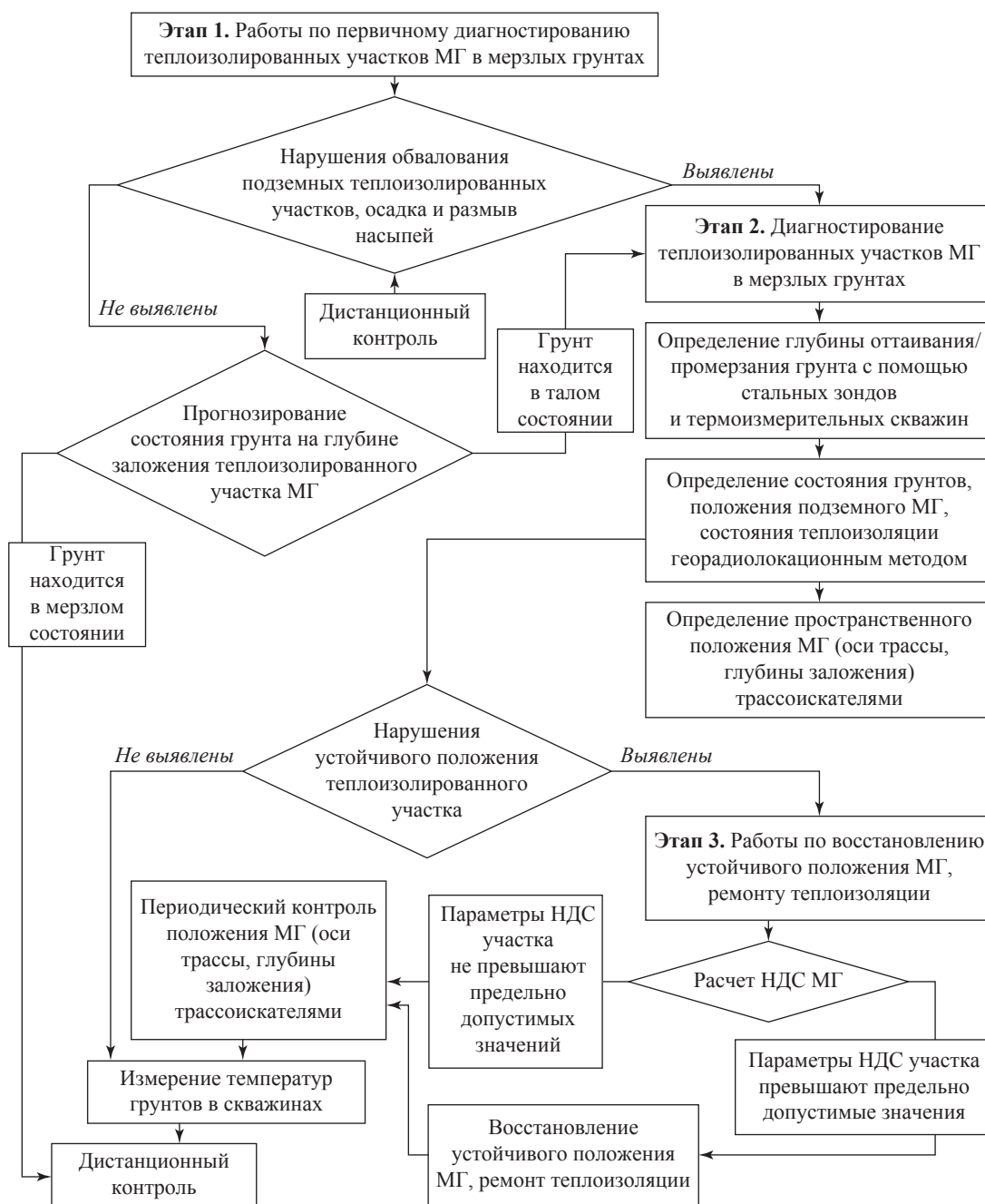


Рис. 1. Схема организационно-технических мероприятий по диагностированию теплоизолированных участков МГ

2) диагностирование теплоизолированных участков МГ;

3) восстановление устойчивого положения газопровода.

Первичную оценку состояния теплоизолированных участков МГ выполняли по результатам дистанционного контроля и последующего прогнозирования условий теплового взаимодействия теплоизолированных участков МГ с мерзлыми грунтами. В ходе диагностирования теплоизоляции МГ выполняли оценку ореолов оттаивания и промерзания грунта, определение состояния теплоизоляции, определяли пространственное положение теплоизолированных участков МГ.

Дистанционный контроль теплоизолированных участков МГ выполняли с борта вертолета либо с помощью беспилотного аппарата, оснащенного фото- и видеоаппаратурой высокого разрешения. Прогнозирование параметров теплового взаимодействия теплоизолированных участков МГ с мерзлыми грунтами выполняли в соответствии с расчетными алгоритмами, с учетом температуры транспортируемого газа и температуры мерзлых грунтов с помощью специализированных программ для теплотехнических расчетов, а также расчетными методами согласно рекомендациям СП 41-103-2000 [1] и СП 25.13330.2012 [2].

Для наземного диагностирования теплоизоляции участков МГ применяли следующие методы:

- измерение глубины сезонного оттаивания грунта;
- измерение температуры грунтов в скважинах (предусмотренных проектом на сооружение теплоизолированных участков, а также дополнительно обустроенных в процессе диагностирования);
 - георадиолокационный метод;
 - определение пространственного положения теплоизолированного участка газопровода с помощью приборов для поиска трассы.

По результатам диагностирования определяли:

- глубину сезонного оттаивания грунта обвалования теплоизолированных участков МГ, геометрию нижней границы талого слоя;
 - температуры грунта засыпки теплоизолированных участков МГ на различных глубинах;
 - положение границ мерзлых и талых грунтов в пределах контрольных сечений,

положение МГ, состояние теплоизоляции траншеи и в основании насыпей;

- состояние теплоизоляции в основании насыпей и средств инженерной защиты, теплоизоляции стенок траншей, кольцевой теплоизоляции для труб.

По результатам анализа данных, полученных в ходе диагностирования, определяли:

- положение возможных нарушений теплоизоляции (по искажениям границ мерзлых и талых грунтов, положению областей оттаивания и промерзания);
- схемы развития нарушений устойчивого положения теплоизолированных участков МГ;
- исходные данные для расчета параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) теплоизолированного участка газопровода при наличии нарушений устойчивого положения.

Прогнозирование состояния околотрубного грунта

Расчетное моделирование теплового взаимодействия участков теплоизолированного МГ с мерзлыми и талыми грунтами выполняли с помощью специализированных программ для проведения теплотехнических расчетов (компьютерное моделирование). Для этого выполняли построение двух- или трехмерной расчетной модели, содержащей участок теплоизолированной трубы (трехмерная модель) или поперечное сечение теплоизолированной трубы (двухмерная модель), область (объем) талого или мерзлого грунта (окружающего участок МГ), разделение компонентов расчетной модели на элементарные области или объемы заданной формы и размера, определение теплофизических параметров компонентов расчетной модели. В расчете использовали следующие исходные данные:

- для металла трубы, защитного покрытия, теплоизоляции – плотность, теплоемкость, теплопроводность;
- для грунта – плотность, теплоемкость, теплопроводность в мерзлом и талом состоянии;
- условия теплообмена на границах расчетной модели с учетом температуры газа, температуры грунта (на начало эксплуатации участка МГ), температуры атмосферного воздуха (для расчетного периода).

Дополнительно при проведении компьютерного моделирования теплового взаимодействия участка теплоизолированного МГ

с мерзлыми или тальми грунтами учитывали теплоту замерзания (таяния) грунта, влияние снегового покрова на интенсивность охлаждения грунта в зимний период, влияние солнечного излучения и растительного слоя на интенсивность нагрева грунта в летний период и др.

В результате расчета получали графические зависимости, определяющие изменения температуры в контрольных точках расчетной модели и распределения изолиний температурного поля в контрольных сечениях расчетной модели, например, для участка газопровода, транспортирующего природный газ с температурой минус 10 и минус 18 °С, имеющего

теплоизоляцию верхней половины трубы, проложенного в мерзлом суглинке с начальной температурой минус 4 °С (рис. 2). Расчетная модель показывает, что в течение первых двух месяцев расчетного периода происходит интенсивное охлаждение грунта в основании МГ с последующей стабилизацией температуры на уровне от минус 9 до минус 15 °С (в зависимости от температуры газа) в течение оставшихся десяти месяцев.

В зимний период в окрестности МГ формируется область пониженных значений температуры грунта. Над осью МГ на глубине 0,5 м при температуре газа минус 10 °С температура

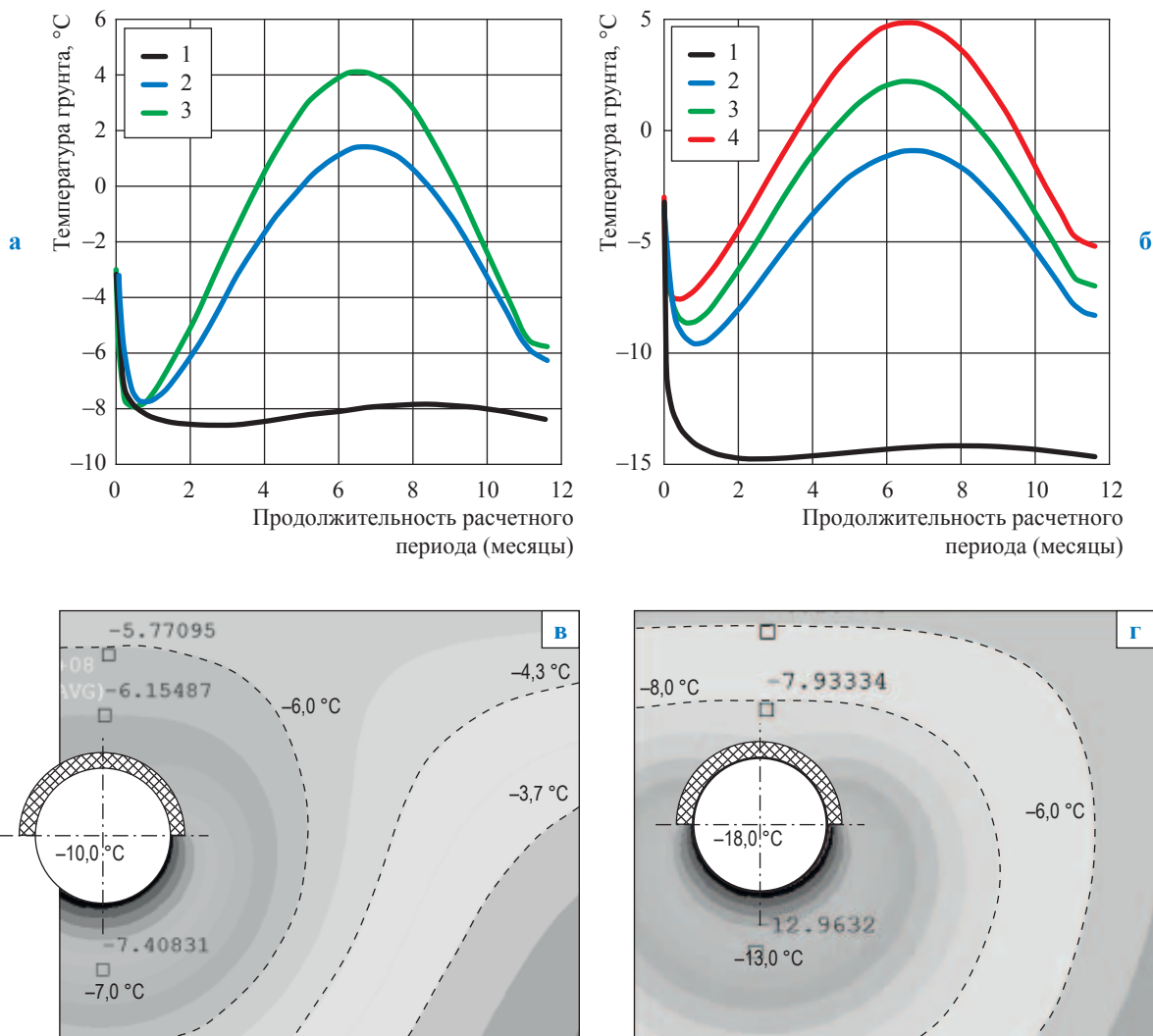


Рис. 2. Динамика изменения температуры мерзлого грунта в контрольных точках расчетной области и температурные поля в мерзлом грунте, в окрестности участка подземного МГ в завершении расчетного периода: при температуре газа минус 10 °С (а, в); при температуре газа минус 18 °С (б, г), где 1 – температура грунта в основании траншеи; 2 – на глубине 1 м над осью МГ; 3 – на глубине 0,5 м над осью МГ; 4 – на глубине 0,5 м в грунте с ненарушенной структурой

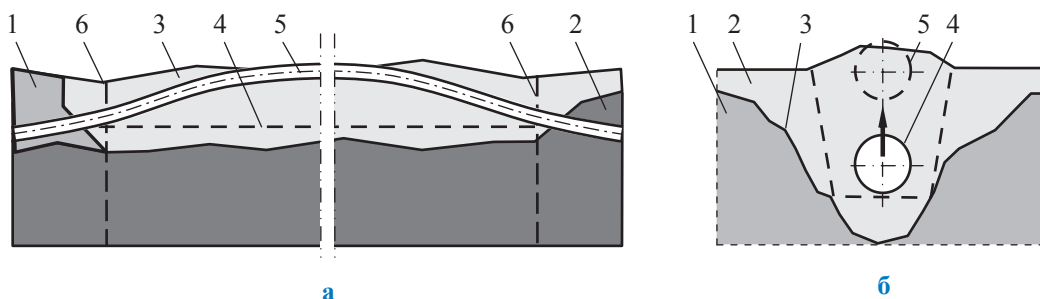


Рис. 3. Расчетная схема нарушения устойчивого положения теплоизолированных участков МГ: грунт на границах участка МГ талый необводненный (а); грунт на границах участка талый обводненный (б); поперечное сечение участка МГ с нарушением устойчивого положения (в), где 1 – талый необводненный грунт; 2 – мерзлый грунт; 3 – талый обводненный грунт; 4 – проектное положение теплоизолированного участка МГ, 5 – положение участка после перемещения; 6 – границы участка перемещения

грунта составляет минус 6...7 °С. При температуре газа минус 18 °С грунт на глубине 0,5 м над осью МГ охлаждается до минус 8,0...8,5 °С. В летний период происходит сезонное оттаивание грунтов в приповерхностном слое. В сентябре глубина оттаивания грунта над осью МГ составляет не менее 1 м при температуре газа минус 10 °С и не менее 0,7 м при температуре газа минус 18 °С. Глубина оттаивания грунта с ненарушенной структурой в данном случае составляет не менее 1,6 м.

Диагностирование теплоизолированных газопроводов

Первичное диагностирование теплоизолированных газопроводов выполняли путем высокоточной аэрофотосъемки, в ходе которой определяли положение (линейные координаты) и основные геометрические размеры (линейную протяженность, ширину) осадки, размывов обвалования газопровода, средств его инженерной защиты, областей заболачивания и обводнения, нарушений устойчивого положения (всплытие, выпучивание участка МГ с оголением труб).

По результатам расчетного моделирования и прогнозирования условий теплового взаимодействия теплоизолированного участка МГ с мерзлыми грунтами и первичного дистанционного диагностирования определяли перечень теплоизолированных участков для наземного диагностирования, выполняемого, в том числе, с применением георадиолокационного обследования. Возможность применения георадиолокации уточняли исходя из фактического состояния теплоизолированного участка газопровода (метод затруднен в реализации

на пересеченной местности, при низкой несущей способности талых грунтов, в условиях заболачивания). По результатам георадиолокационного обследования теплоизолированных участков МГ определяли положение границ мерзлых и талых грунтов, пространственное положение теплоизолированного участка, положение балластирующих устройств, состояние теплоизоляции в основании насыпей, дна траншеи, состояние кольцевой теплоизоляции труб. В процессе диагностирования применяли непрерывный режим перемещения антенного модуля георадара с постоянной заданной скоростью по профилю и дискретный режим с определенным шагом по профилю (по точкам вдоль профиля).

Мониторинг устойчивости газопроводов

Нарушения устойчивого положения теплоизолированных участков МГ, проложенных в условиях распространения мерзлых грунтов, в большинстве случаев выражаются в их перемещении вверх (всплытии, выпучивании) под воздействием выталкивающей силы воды или обводненного грунта, а также сжимающих сил, обусловленных внутренним давлением и температурой транспортируемого газа. Условием перемещения теплоизолированного участка МГ вверх (всплытие, выпучивание) будет являться слияние в летний период приповерхностного слоя сезонно оттаявшего грунта с областью талого грунта, окружающего теплоизолированный участок МГ. Факторами, способствующими формированию нарушений устойчивого положения, является уменьшение балластирующей способности грунта засыпки участка МГ (при оттаивании или обводнении)

Значения предельных длин деформированных участков МГ Бованенково – Ухта

| Температура газа (температурный перепад), °С | Предельные длины деформированных участков МГ, м, при рабочих давлениях, МПа | | | | |
|---|--|-------|-------|-------|-------|
| | 9,0 | 9,7 | 10,4 | 11,1 | 11,8 |
| Талое необводненное состояние грунта вокруг трубы за пределами деформированного участка | | | | | |
| 0 (20) | 64,0 | 63,0 | 62,1 | 61,2 | 60,3 |
| 3 (23) | 62,0 | 61,1 | 60,3 | 59,9 | 58,7 |
| 6 (26) | 60,2 | 59,4 | 58,6 | 57,9 | 57,2 |
| 9 (29) | 58,5 | 57,8 | 57,1 | 56,4 | 55,7 |
| 12 (32) | 57,0 | 56,3 | 55,7 | 55,0 | 54,4 |
| 15 (35) | 55,5 | 54,9 | 54,3 | 53,7 | 53,1 |
| Мерзлое состояние грунта вокруг трубы за пределами деформированного участка | | | | | |
| 0 (20) | 111,4 | 109,9 | 108,4 | 107,0 | 105,6 |
| 3 (23) | 108,4 | 107,1 | 105,8 | 104,6 | 103,3 |
| 6 (26) | 105,6 | 104,4 | 103,2 | 102,0 | 100,9 |
| 9 (29) | 103,0 | 101,9 | 100,8 | 99,7 | 98,6 |
| 12 (32) | 100,6 | 99,5 | 98,5 | 97,5 | 96,5 |
| 15 (35) | 98,3 | 97,3 | 96,4 | 95,4 | 94,5 |

или смещение или нарушение средств балластировки газопровода. Предварительную оценку НДС теплоизолированного участка при его всплытии или выпучивании определяют в зависимости от линейной протяженности деформированного участка, давления и температуры транспортируемого газа в соответствии с расчетной схемой (рис. 3).

Значения предельных длин деформированных участков МГ Бованенково – Ухта приведены в таблице. При предельной длине деформированного участка МГ максимальные механические напряжения в стенках труб достигают предельно допустимых значений, установленных СТО Газпром 2-2.1-249 [3].

Устранение нарушений устойчивого положения теплоизолированных участков МГ выполняют при всплытии (выпучивании) теплоизолированного участка, в случаях превышения предельно допустимых значений механических напряжений (обусловленных внутренним давлением, температурными

и изгибными деформациями), установленных СТО Газпром 2-2.1-249 [3].

Разработанный алгоритм позволяет выполнить комплексное диагностирование устойчивости теплоизолированных участков МГ, выявить дефектные участки и принять решение о необходимости ремонта теплоизоляции и восстановления проектного положения участка газопровода. Опыт применения на практике стандарта ООО «Газпром трансгаз Ухта» «Методы восстановления устойчивости магистральных газопроводов при образовании эксплуатационных нарушений теплоизоляционных покрытий в многолетнемерзлых грунтах» показывает, что нормативный документ может быть рекомендован для использования в других дочерних обществах, эксплуатирующих газопроводы, пролегающие по территории распространения мерзлых грунтов.

Список литературы

1. СП 41-103-2000 Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов (утв. постановлением Госстроя РФ от 16.08.2000 № 81). – М.: ФГУП ЦПП, 2001. – 41 с.
2. СП 25.13330.2012 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003 (утв. приказом Министерства регионального развития РФ от 27.12.2011 № 608). – М.: Изд-во МГСУ, 2013. – 46 с.
3. СТО Газпром 2-2.1-249 Магистральные газопроводы (утв. распоряжением ОАО «Газпром» от 26.08.2008 № 258). – М.: ИРЦ Газпром, 2008. – 150 с.