



УДК: 622.692.4.076:662.998

## РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЗОННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МЕРЗЛОМ ГРУНТЕ, ОКРУЖАЮЩЕМ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫЙ ГАЗОПРОВОД

### NUMERICAL MODELING OF SEASONAL CHANGES IN TEMPERATURE FIELDS IN FROZEN SOIL SURROUNDING A THERMALLY INSULATED GAS PIPELINE

**Работинская Татьяна Ивановна**

инженер I категории отдела надежности  
и ресурса Северного коридора ГТС,  
филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Ухта  
t.rabotinskaja@sng.vniigaz.gazprom.ru

**Шишкин Иван Владимирович**

кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник отдела надежности  
и ресурса Северного коридора ГТС,  
филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта  
i.shishkin@sng.vniigaz.gazprom.ru

**Кузьбожев Александр Сергеевич**

доктор технических наук, профессор,  
начальник отдела надежности  
и ресурса Северного коридора ГТС,  
филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Ухта  
a.kuzbozhev@sng.vniigaz.gazprom.ru

**Аннотация.** В статье представлены результаты расчетного моделирования (с применением программного комплекса Ansys) теплового взаимодействия газопровода, транспортирующего газ с положительной температурой, и мерзлого околотрубного грунта. В ходе моделирования определены параметры теплового поля, формируемого в мерзлом грунте в окрестности газопровода, и особенности его изменения в течение календарного года.

**Ключевые слова:** магистральный газопровод, теплоизоляция, мерзлый грунт, моделирование.

**Rabotinskaya Tatiana Ivanovna**

Engineer of the first category  
of the Reliability and Resource Department  
of the Northern corridor  
of the gas transmission system,  
branch of Gazprom VNIIGAZ LLC, Ukhta  
t.rabotinskaja@sng.vniigaz.gazprom.ru

**Shishkin Ivan Vladimirovich**

Candidate of technical sciences,  
Leading Researcher of Reliability  
and Resource Department of the Northern  
corridor of the gas transmission system,  
branch of Gazprom VNIIGAZ LLC, Ukhta  
i.shishkin@sng.vniigaz.gazprom.ru

**Kuzbozhev Alexander Sergeevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of Reliability and Resource Department  
of the Northern corridor  
of the gas transmission system,  
branch of Gazprom VNIIGAZ LLC, Ukhta  
a.kuzbozhev@sng.vniigaz.gazprom.ru

**Annotation.** The paper presents the results of computational modeling (using the software Ansys) of the thermal interaction of a gas pipeline, with a positive operating temperature, and frozen near-pipe soil. During the computational modeling, determined the parameters of the thermal field formed in frozen soil in the vicinity of the gas pipeline, and its change during the calendar year.

**Keywords:** main gas pipeline, thermal insulation, frozen soils, defect, modeling.

## Введение

На магистральных газопроводах, проложенных в Арктических условиях на мерзлых грунтах, применяется теплоизоляционное покрытие, выполненное из отдельных сегментов из вспененного полиуретана.

В частности, при сооружении первой нитки МГ Бованенково – Ухта, реализованы технические решения по теплоизоляции верхней половины газопровода, а также теплоизоляция по всему периметру труб (кольцевая теплоизоляция), теплоизоляция стенок и дна траншеи, теплоизоляция основания насыпей при наземной прокладке МГ. Общее количество теплоизолированных участков – более 250 (более 190 на территории полуострова Ямал и около 60 на участке МГ Бованенково – Ухта, 1-я нитка, 194–430 км). Для оценки эффективности проектных решений по теплоизоляции труб выполнено компьютерное моделирование процессов теплообмена между газопроводом, транспортирующим газ с положительной температурой, и окружающими его мерзлыми грунтами [1, 2].

### Исходные данные для расчетного моделирования

В расчетах приняты следующие исходные данные:

– плотность теплоизоляционного материала –  $45 \text{ кг/м}^3$ , удельная теплоемкость –  $1450 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ , теплопроводность –  $0,035 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;

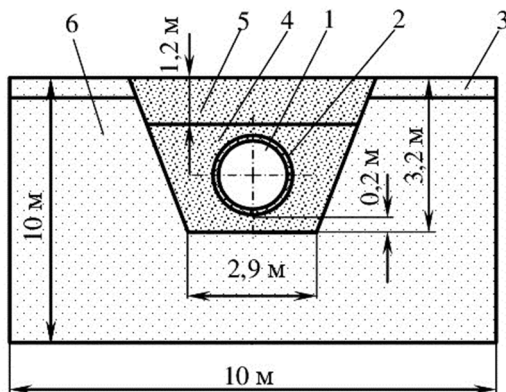
– грунт – суглинок, плотность –  $2100 \text{ кг/м}^3$ , теплопроводность в мерзлом состоянии –  $1,64 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ , теплопроводность в талом состоянии –  $1,52 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ , температура замерзания – минус  $1,5 \text{ °C}$ , теплоемкость в талом состоянии –  $562 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ , теплоемкость в мерзлом состоянии –



716 Дж/(кг·°C);

- температура мерзлого грунта – минус 3 °C;
- рабочая температура транспортируемого газа – 7 °C;
- в расчете учитывается теплота фазовых переходов при промерзании и оттаивании грунта;
- продолжительность расчетного периода – один год.

Схема расчетной области представлена на рисунке 1.

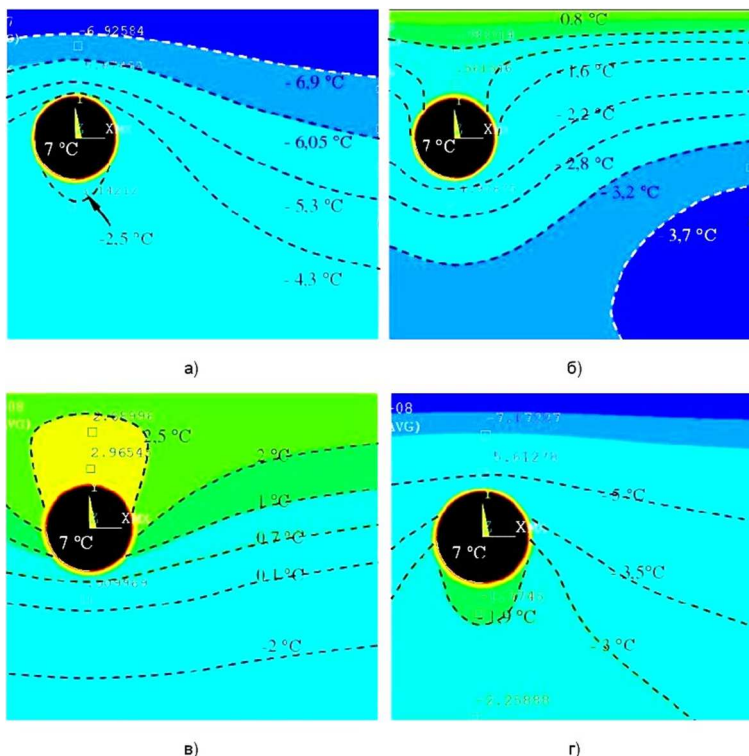


**Рисунок 1** – Схема к расчету температурных полей в грунте, окружающем теплоизолированный газопровод:

- 1 – газопровод (диаметр 1420 мм); 2 – теплоизоляционное покрытие (толщина 100 мм);
- 3 – слой торфа и растительных остатков (толщина 0,5 м); 4 – песок;
- 5 – грунт засыпки; 6 – многолетнемерзлый грунт с ненарушенной структурой

**Результаты расчетного моделирования**

Расчетное моделирование выполнено в среде программного комплекса Ansys [3]. Результаты расчета параметров теплового поля, формируемого в мерзлом грунте в окрестности газопровода, транспортирующего газ с положительной температурой представлены на рисунке 2. Установлено, что в указанных условиях изотермы теплового поля представляют собой замкнутые линии, симметричные относительно условной вертикальной оси.



**Рисунок 2** – Результаты расчета параметров теплового поля в мерзлом грунте, в окрестности участка МГ, обеспечивающего транспорт газас положительной температурой: февраль – март (а); июнь – июль (б); начало сентября (в); декабрь (г)



По результатам моделирования установлено следующее:

- в зимний период (январь – май) грунт находится в мерзлом состоянии. Снижение температуры грунта над газопроводом происходит с меньшей интенсивностью, чем у многолетнемерзлого грунта с ненарушенной структурой. В окрестности газопровода формируется характерное искажение температурного поля. Температура грунта в основании траншеи в течение указанного периода изменяется незначительно (в начальный момент времени, до момента достижения горизонта промерзания уровня трубы, температура повышается до минус 2,5 °С, далее, к началу апреля, снижается до минус 3,1 °С);

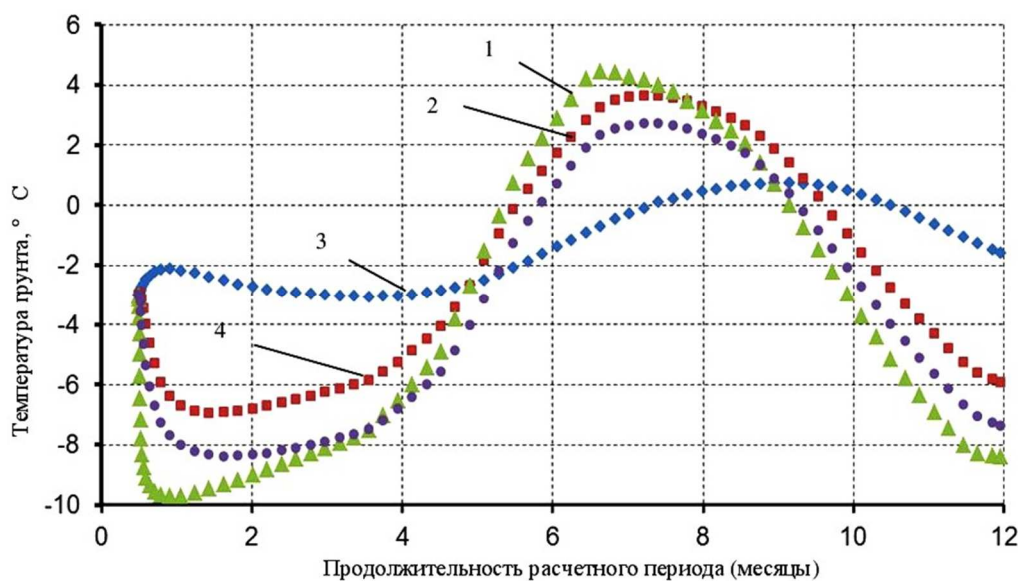
- в летние месяцы (июнь – август) происходит оттаивание грунта в приповерхностном слое. К середине июня температура грунта над газопроводом достигает нулевых значений, граница талого слоя в мерзлом грунте с ненарушенной структурой находится на глубине 0,6–0,8 м, при приближении к газопроводу снижается до глубины 1,6 м. Температура грунта в основании траншеи МГ составляет минус 1,9 – минус 2 °С. К сентябрю граница слоя сезонного оттаивания достигает глубины 1,8–2 м, глубина оттаивания грунта под трубой достигает 0,3–0,4 м;

- в осенний период (начиная с октября) начинается промерзание талого грунта в горизонте сезонного промерзания-оттаивания. Вокруг МГ формируется замкнутая симметричная область талого грунта с температурой 0,5–0,7 °С;

- в декабре грунт промерзает полностью.

Графическая зависимость, определяющая изменение температуры грунта в основании газопровода, также представляет собой период гармонически изменяющейся функции, однако, максимальная температура в данном случае наблюдается в середине сентября. Смещение максимума температур определяется мощностью слоя грунта между контрольным уровнем и поверхностью грунта. Из представленных диаграмм видно, что аналогичное смещение максимума также наблюдается на глубинах 0,5 и 1 м и составляет 15–20 дней.

По результатам проведенных расчетов установлено, что оттаивание мерзлого грунта, в окрестности МГ, обеспечивающего транспорт газа с положительной температурой, возможно при условии одновременного воздействия тепловых потоков, проходящих от поверхности грунта в периоды положительных среднесуточных температур и от труб через слой теплоизоляционного покрытия. Очевидно, что в данном случае теплоизоляционное покрытие, при условии обеспечения его целостности, достаточно эффективно. Анализ графиков, характеризующих изменение температур на различных глубинах (рис. 3) показывает, что в верхнем слое грунта (на глубинах до 1,5 м) колебания температур соответствуют колебаниям температуры воздуха и существенных отличий между диаграммами, полученными в грунте засыпки над осью газопровода и в многолетнемерзлом грунте с ненарушенной структурой, не наблюдается (в зимний период в грунте с ненарушенной структурой температура выше, чем в грунте засыпки, на 1,5–2 °С, а в летний ниже также на 1,5–2 °С, при идентичной динамике изменения).



**Рисунок 3** – Особенности изменения температуры мерзлого грунта в окрестности участка МГ, с рабочей температурой газа 7 °С:

- 1 – на глубине 0,5 м над верхней образующей газопровода;
- 2 – на глубине 1 м над верхней образующей газопровода;
- 3 – на уровне дна траншеи;
- 4 – на глубине 0,5 м в многолетнемерзлом грунте с ненарушенной структурой



### Заключение

Таким образом, в результате расчетного моделирования установлено, что теплоизоляционное покрытие газопровода, транспортирующего газ с положительной температурой  $7^{\circ}\text{C}$ , достаточно эффективно, так как в завершении осеннего сезона характер оттаивания мерзлых грунтов незначителен, что позволяет обеспечить сохранность околотрубных грунтов в мерзлом состоянии.

### Литература:

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

### References:

1. SP 61.13330.2012 Thermal insulation of equipment and pipelines. Approved Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation No. 608 of December 27, 2011. – M. : Publishing House of Standards, 2012. – 67 p.
2. R 536-84 Recommendations for the design of heat-insulating structures of trunk pipelines. Approved VNIIST December 14, 1983. – M. : Publishing House VNIIST, 1985. – 54 p.
3. Chigarev A.V. ANSYS for engineers: reference manual / A.V. Chigarev, A.S. Kravchuk, A.F. Smalyuk. – M. : Engineering, 2004. – 512 p.