

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ВОКРУГ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА

Фомина В.В., Аксенов Б.Г., Игошин М.Е.

*ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет», Тюмень, Россия (625001, Тюмень, ул. Луначарского, 2. e-mail: m.e.igoshin@yandex.ru)*

В данной работе исследован процесс образования шлиров для различной температуры трубопровода, транспортирующего охлажденный газ. Образование прослоев льда есть следствие вторичного морозного пучения. Если пучение возможно, то необходимо принять меры для его предотвращения. Мы приводим методику моделирования явления вторичного морозного пучения. Описаны условия, при которых данная модель применима вследствие сделанных при ее построении предположений. Модель изложена в строгой математической постановке. Описан метод решения соответствующей краевой задачи. Результаты сопоставлялись с известными приближенными методами. Проведен расчет контрольного численного примера. Приведены графики, характеризующие процесс образования прослоев льда. При некоторых условиях образуется один прослой, а при других – два. По большей части, это зависит от температуры трубы. Для данного примера даны рекомендации по предотвращению пучения. Рекомендации носят общий характер и применимы для других случаев.

Ключевые слова: влажные грунты, тепловой режим, теплообмен, краевая задача, процесс образования прослоев льда.

## THERMAL CONDITION PREDICTION NEAR AN UNDERGROUND PIPE-LINE

Fomina V.V., Aksyonov B.G., Igoshin M.E.

*Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Tyumen, Russia (625001, Tyumen, street Lunacharskogo, 2, e-mail: m.e.igoshin@yandex.ru)*

The process of ice layers formation around the pipe-line transporting low temperature gas is here investigated. The ice layers formation is the consequence of secondary frost heaving. If the frost heaving is possible, one must take every measure to prevent it. We describe here a method of modeling the phenomenon of secondary frost heaving. We describe also the conditions under which the model is applicable according to the assumptions used in the process of its creating. The model is rigorously mathematically formulated. A method of solving the corresponding boundary problem is given. The results were compared with the known approximate methods. A computation of a numerical example was made. We give here the graphs characterizing the process of ice layers formation. Under some conditions one layer is formed and two under others. It depends for the most part on the temperature of the pipe. In the case of our numeric example we recommend how to prevent frost heaving. The recommendation is of general nature. It may be used in other cases.

Keywords: Moist soils, thermal condition, heat-and-moisture exchange, boundary problem, process of ice layers formation.

### Введение

Условия строительства и эксплуатации газопроводов существенно связаны с их температурным режимом. Анализ выполненных исследований, отечественный и зарубежный опыт эксплуатации показали целесообразность применения преимущественно подземной прокладки с регулируемым охлаждением газа до уровней, определяемых типом грунтов и их распространением по трассе.

Понятие «тепловой или температурный режим» означает учет и оценку теплового взаимодействия транспортируемого продукта, трубы и грунта. Особо важное значение имеет учет тепловых режимов для газопроводов, так как от этого сильно зависит пропускная спо-

способность последних. Учитывая, что большинство газопроводов проложено в районах многолетнемерзлых грунтов, температурное взаимодействие с грунтом влияет на состояние грунта, а следовательно, на механическую устойчивость и надежность линейной части трубопровода.

По мнению многих специалистов, для территорий Западной Сибири, имеющих низкую несущую способность, термостабилизированный режим транспорта газа, охлажденного до температур, соответствующих сезонным температурам грунта, может стать единственным способом обеспечения проектного положения трубопровода.

Охлаждение до температур близких к сезонным температурам грунта, возможно при наличии на КС (компрессорных станциях) специальных холодильных установок. Их создание требует дополнительных капиталовложений и эксплуатационных затрат. Но указанный температурный режим позволит пропускать больше газа, а увеличение надежности и долговечности трубопровода даст экономический эффект, превышающий все дополнительные затраты [3].

#### **Постановка задачи**

Эксплуатация газопроводов с охлаждением газа до температур грунта и низкотемпературных газопроводов вызывает необходимость решения некоторых проблем, связанных с обеспечением их устойчивости в увлажненных тонкодисперсных грунтах. В этом случае в талый период вокруг трубы образуется зона промерзания, в которой развивается пучение.

Тепловое взаимодействие транспортируемого газа с окружающей средой имеет ряд особенностей, обусловленных реальными термодинамическими свойствами газа при высоких давлениях и низких температурах, характером теплообмена транспортируемой и внешней сред; экологическими ограничениями при эксплуатации трубопроводов. Указанные факторы стали более ощутимы в связи с переходом к строительству трубопроводов большого диаметра, с повышением рабочего давления в трубопроводах, с внедрением искусственного охлаждения газа, особенно в условиях Севера.

С увеличением диаметра газопровода и повышением рабочего давления устойчивость трубы в грунте стала одним из главных факторов, которым определяется надежность транспортировки газа. При пересечении трубопроводом водных преград и местности с грунтом, повышенной влажности на нем наблюдается пучение и выпирание трубопровода в сторону дневной поверхности, кроме того, возможно перегораживание стока грунтовых вод и нарушение экологической обстановки в зоне влияния трубопровода.

Для обоснования температуры охлаждения газа, режимов регулирования температуры газа во времени и поверхности теплообмена необходимо располагать методикой тепловых

расчетов трубопроводов, учитывающих динамику изменения температуры газа и окружающей среды (грунта и воздуха).

Для обоснования конструктивных решений при транспортировке газа с охлаждением до температуры грунта и ниже в данной работе требуется оценить ореол обмерзания вокруг газопровода ( $D=1420\text{мм}$ ) во влажных дисперсных грунтах, проложенного на глубине 1м от поверхности (рис. 1), а также установить место образования прослоев льда и их размеры для замены пучинистого грунта непучинистым.

### Численное решение задачи

Математическая постановка задачи прогнозирования теплового режима вокруг подземного трубопровода записана уравнением теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \kappa \rho \frac{\partial W}{\partial \tau}$$

$$-\infty < x < +\infty \quad y \leq 0 \quad (1)$$

где  $T, x, y, \tau, c, \lambda, \rho, \kappa, W$  – соответственно температура, координаты, время, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, объемный вес скелета грунта, теплота фазового перехода и влажность грунта. Фазовый переход влаги учитывается последним слагаемым в правой части.

Начальное условие:  $T(x, y, 0) = f(x, y)$

Граничные условия на поверхности:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha [T(x, y, 0) - T_{\text{окр.ср.}}]; \text{ где } \alpha \text{ – теплоотдача от поверхности грунта;}$$

$$\lambda = \lambda(x, y, T);$$

$$T_{\text{окр.ср.}} = A \sin(\omega \tau + \varepsilon);$$

Граничные условия вокруг заглубленной в грунт трубы:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0;$$

Граничные условия самой трубы:  $T(x, y, \tau) = T_{\text{трубы}}$ ,

Данная задача эквивалентна задаче о фазовом переходе Стефана, для численного решения которой применяется метод сглаживания или «размазывания» фронта промерзания-протаивания грунта. Учитывая, для определенного вида грунта содержание незамерзшей воды при условиях, близких к термодинамическому равновесию, зависит только от температуры, вводим в исходное уравнение замену  $\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{dW}{dT} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau}$  и эффективный коэффициент тепло-

проводности, и эффективную теплоемкость, где дельта-функция приближенно заменяется дельта-образной.

Тогда уравнение (1) приводится к виду

$$\left( c_{эф} + \kappa \rho \frac{dW}{dT} \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

Для определения температурного поля грунта используется метод аппроксимации дифференциального уравнения разностной задачей [4]. Численное решение полученной системы разностных уравнений на каждом временном шаге проводилось универсальным продольно-поперечным методом на ЭВМ. Результаты программы были протестированы формулой Г. Карслоу и Дж. Егером [3], определяющей радиус кольцеобразной зоны оттаивания вокруг трубы, разница в расчетах составила в среднем 3% (рис. 2). Кроме того, построены графики сравнения температурных изотерм, полученных при решении исходной задачи и аналогичной осесимметричной задачи методом [1] сужающегося семейства оценок (рис. 3). Из

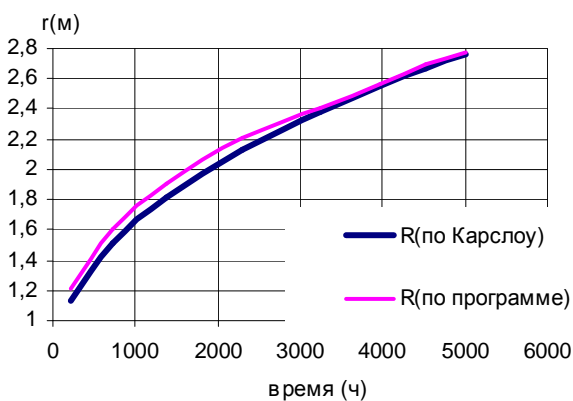


Рис. 2  
Графики сравнения радиуса оттаивания грунта под трубой с формулой Г.КАРСЛОУ И Дж. ЕГЕРА

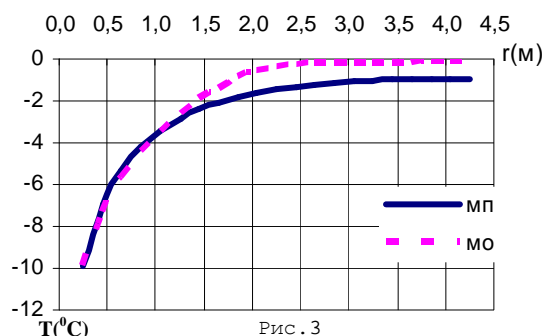


Рис. 3  
Графики сравнения радиуса оттаивания грунта под трубой с методом построения сужающейся системы ошибок

рисунка видно, что вблизи трубы графики температур совпадают, но чем дальше, тем больше становится разница в расчетах. Объясняется это влиянием температуры поверхности при решении задачи (1).

Исследование температурного режима грунта вокруг низкотемпературного трубопровода проводилось для различных температур на поверхности трубы. Все расчеты выполнялись с помощью компьютера.

Исследовалось распределение температуры в грунте по глубине над и под газопроводом в летний период и механизм образования сегрегационного пучения под трубопроводом.

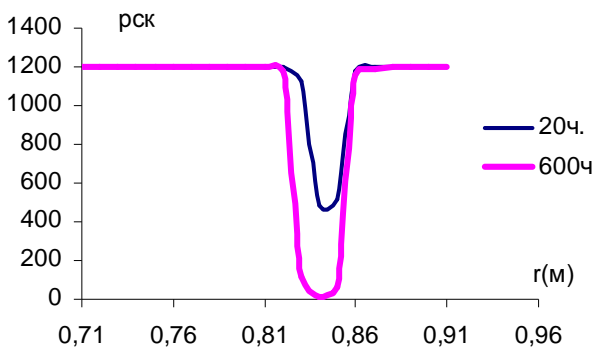


Рис. 4  
Графики процесса образования прослоев льда на поверхности трубы при  $T_{\text{трубы}} = -20^{\circ}\text{C}$

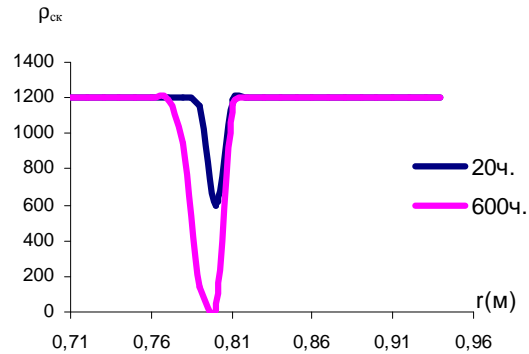


Рис. 5  
Графики процесса образования прослоев льда на поверхности трубы при  $T_{\text{трубы}} = -15^{\circ}\text{C}$

Графики показывают (рис. 4, рис. 5), что вокруг холодного газопровода (при  $T = -200\text{C}$  и при  $T = -150\text{C}$ ) после его закладки в теплый грунт образуются прослойки льда в короткий промежуток времени на расстоянии 8-12 см от трубы, а позднее (рис. 6, рис. 7) возникает еще один прослой под трубой на расстоянии 90-100 см.

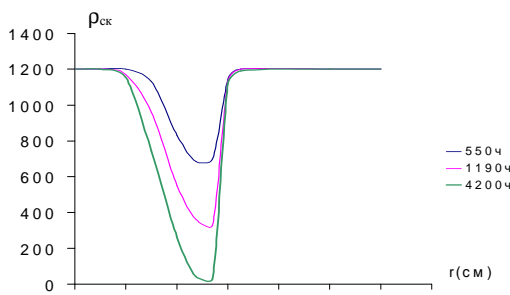


Рис. 6  
Графики процесса второго льдообразования под заглубленным газопроводом при  $T_{\text{трубы}} = -20^{\circ}\text{C}$  в разные промежутки времени

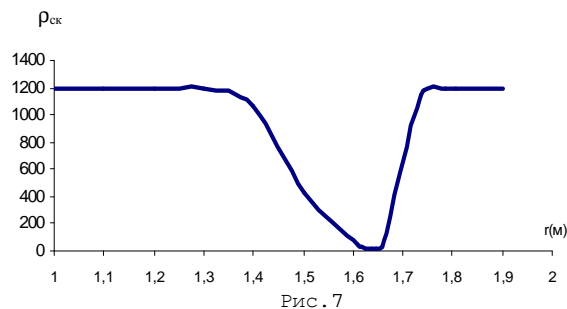


Рис. 7  
График второго льдообразования под трубой при  $T = -15^{\circ}\text{C}$  на поверхности трубы

В работе исследован процесс образования шлиров для различной температуры трубопровода, транспортирующего охлажденный газ. Результаты показали, что чем ниже температура, тем глубже находится зона образования второго пучения под трубой. При  $T_{\text{тр.}} = -50\text{C}$  второй прослой льда образуется на расстоянии 50-60 см от трубы, а при  $T_{\text{тр.}} = -20\text{C}$  шлир появляется только на поверхности трубы (рис. 8).

### Технические рекомендации

Опираясь на полученные результаты, можно внести следующие технические рекомендации, необходимые при закладке трубопроводов в пучинистый грунт.

Если температура газа трубопровода ниже  $-20\text{C}$ , то для устранения пучений вокруг него требуется увеличить траншею, предназначенную для укладки трубопровода в грунт, до

100см по радиусу трубы (в зависимости от температуры газа) и засыпать ее непучинистым грунтом.

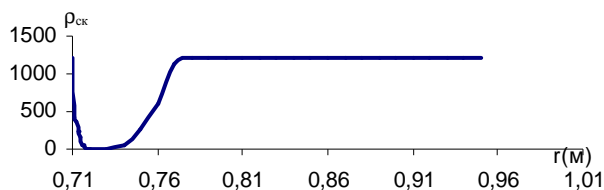


Рис. 8  
График образования шлира под трубой  
при  $T=-2^{\circ}\text{C}$  на поверхности трубы

Другим вариантом является улучшение теплоизоляции трубопровода с тем, чтобы температура на его поверхности была не ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ . Тогда объем грунта, который нужно менять, значительно меньше.

Выбор одного из этих вариантов должен быть обоснован технико-экономическим расчетом.

### Список литературы

1. Аксенов Б.Г., Фомина В.В. Расчет температурных полей в промерзающих и оттаивающих грунтах // Ж.: Доклады АН ВШ РФ. Технические науки. – 2009. - №1(12). – С. 78-87.
2. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964.
3. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. Изд. 4-е, исправленное. – М.: изд-во «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1972. 735 с.
4. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Высш.шк., 1973. – 446 с.
5. Ходанович И.Е., Кривошеин Б.Л., Бикчентай Р.Н. Тепловые режимы магистральных газопроводов. – М.: Недра, 1971. – 216 с.

### Рецензенты:

Чекардовский М.Н., д.т.н., профессор, зав. кафедрой теплогазоснабжения Тюменского государственного архитектурно-строительного университета, г. Тюмень.

Степанов О.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой промышленной теплоэнергетики Тюменского государственного архитектурно-строительного университета, г. Тюмень.