

## Определение толщины теплоизоляции и заглубления подземного трубопровода теплоснабжения в многолетнемерзлых грунтах

*К.т.н., старший преподаватель М.П. Акимов;  
д.т.н., заведующий кафедрой С.Д. Мордовской,  
ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»  
д.т.н., заведующий лабораторией Н.П. Старостин,  
Институт проблем нефти и газа СО РАН*

**Аннотация.** Исследуется процесс оттаивания – промерзания грунта в основании подземного трубопровода теплоснабжения из полиэтилена с тепловой изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке, эксплуатируемого в районах распространения многолетнемерзлых грунтов.

Динамику температурного поля в системе «многослойная труба – грунт» предлагается определять путем численного решения уравнения теплопроводности в полярных координатах. Соответствующая двумерная задача Стефана решена методом конечных разностей сведением к цепочке одномерных задач. Предлагается определять величину заглубления и толщину теплоизоляции трубопровода из условия ежегодного восстановления глубины оттаивания до толщины деятельного слоя к началу отопительного сезона. Приводятся результаты расчетов динамики изотерм при воздействии на многолетнемерзлый грунт подземного трубопровода теплоснабжения, показывающие возможность такого восстановления толщины деятельного слоя.

В расчетах имитировались грунтовые условия и температура окружающей среды Якутска, тем не менее, полученные результаты могут быть использованы для условий других регионов распространения многолетнемерзлых грунтов.

**Ключевые слова:** бесканальный теплопровод; многолетнемерзлые грунты; температура; задача Стефана; глубина оттаивания; величина заглубления; толщина теплоизоляции

### Введение

В практику строительства тепловых сетей широко внедряются трубопроводы с пенополиуретановой изоляцией в полиэтиленовой оболочке типа «труба в трубе». Преимущества такого способа укладки труб из полимерных материалов в заводской теплоизоляции очевидны: они не подвержены коррозии, теплоизоляция не разрушается вследствие увлажнения грунтовыми водами, что позволяет использовать их как бесканальные подземные. Гибкость таких труб позволяет поставлять их на объекты длинномерными отрезками необходимой длины, проходить повороты трассы без применения фасонных деталей. Кроме того, такие трубы не требуют компенсаторов. Благодаря малому весу труб монтажные работы осуществляются без применения грузоподъемной техники. Из опыта эксплуатации в Европе известно, что срок службы полимерных труб составляет не менее 30 лет [1].

Использование таких перспективных трубопроводов в регионах с многолетнемерзлыми грунтами крайне ограничено. Согласно нормативным документам, выбор мероприятий по сохранению устойчивости тепловых сетей должен выполняться на основе расчетов зоны оттаивания мерзлого грунта около трубопроводов [2]. В то же время проблема прогнозирования теплового состояния многолетнемерзлых грунтов при воздействии подземных теплопроводов до сих пор не решена в полной мере и недостаточно освещена в научной литературе.

Размер зоны оттаивания многолетнемерзлого грунта под воздействием подземного бесканального теплопровода зависит от его заглубления и толщины слоя используемой теплоизоляции. Определение толщины теплоизоляции осуществляется по нормированной плотности теплового потока [3]. Методика определения толщины пенополиуретановой (ППУ) изоляции из условия минимума целевой функции, характеризующей стоимость капитальных затрат и стоимость теплоты в процессе эксплуатации при заданной глубине заложения, приводится в работе [4]. При этом в используемой математической модели теплового процесса взаимодействия теплопровода с ППУ-изоляцией с грунтами не учитываются многие факторы, влияющие на состояние многолетнемерзлого грунта: дневная поверхность, температура окружающего воздуха, теплота фазового перехода влаги и т. д.

При подземной прокладке трубопроводов за расчетную температуру окружающей среды при расчетах рекомендуется брать среднюю за год температуру грунта на глубине заложения оси трубопровода. В районах отсутствия многолетнемерзлых грунтов величина заглубления теплопроводов может задаваться произвольно, поскольку она не нормирована, кроме мест подземного пересечения теплопровода с инженерными сетями и сооружениями. В районах распространения многолетнемерзлых грунтов определение величины заглубления подземных теплопроводов затруднено даже в случае наличия расчетных данных о зоне оттаивания мерзлых грунтов. Причиной тому является отсутствие условий, по которым величина заглубления может быть рассчитана. Таким образом, при строительстве подземных теплопроводов в многолетнемерзлых грунтах неопределенными величинами остаются как заглубление, так и толщина теплоизоляции.

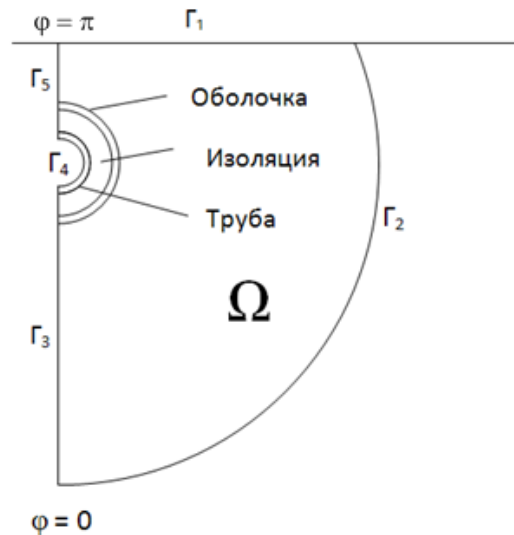
В данной работе на основе математического моделирования оттаивания – промерзания многолетнемерзлых грунтов при воздействии подземного бесканального трубопровода теплоснабжения с теплоизоляцией предлагается определять толщину теплоизоляции и величину заглубления в районах многолетнемерзлых грунтов сплошного распространения по условию ежегодного восстановления глубины оттаивания до толщины деятельного слоя грунта к началу отопительного сезона. Подробное изложение данного материала приводится в работе [5].

### *Постановка задачи*

В большинстве работ, посвященных исследованию температурного поля вокруг подземного трубопровода, рассматриваются задачи определения толщины теплоизоляции с целью уменьшения тепловых потерь [6–11]. Для решения технических проблем перекачки нефти в районах холодного климата часто решаются задачи теплового взаимодействия трубопровода с многолетнемерзлыми грунтами [12–15]. Решение стационарной двумерной задачи теплообмена теплоизолированных труб с постоянной температурой теплоносителя и мерзлого грунта приводится в работах [16–17]. Поскольку температуры теплоносителя и окружающего воздуха в течение отопительного сезона меняются существенно, для теплопроводов наиболее характерным является нестационарный режим работы. Кроме того, практически неизученным остается поведение границы оттаивания под воздействием многолетнемерзлого грунта вне отопительного сезона. В большинстве работ по исследованию влияния подземного полимерного трубопровода теплоснабжения в процессе эксплуатации на многолетнемерзлый грунт, например в работе [18], температурная задача решается методом конечных разностей в декартовой системе координат.

При таком подходе возникают сложности с аппроксимацией границ рассматриваемой области. В плоском случае границы расчетной области представляют собой отрезки прямых и полуокружностей, что затрудняет выбор системы координат для построения расчетной сетки. При использовании декартовой системы координат приходится аппроксимировать окружности ломаными линиями, что, естественно, влияет на точность определения температурного поля в многослойной трубе ввиду наличия условий теплового контакта между трубой и теплоизоляцией. При исследовании влияния теплоносителя в трубе на тепловое состояние грунта, приближенное задание границ в непосредственной близости от теплообменной поверхности может привести к существенным погрешностям при определении границ оттаивания. Для более точного описания температурного поля в окрестности трубы с теплоносителем перспективным представляется решать задачу в полярных координатах. Естественно, при этом будут приближенно описаны прямые участки границ области, что также снизит точность расчета, но можно предположить, что их влияние на определение границ оттаивания грунта будет значительно ниже.

Примем допущение, что температурный режим теплоносителя в трубопроводе вдоль осевой координаты меняется слабо, а величина заглубления теплопровода практически не меняется по трассе, что позволяет пренебречь тепловыми потоками вдоль теплопровода. Используем фронтальную модель процесса промерзания – оттаивания грунта в виде классической задачи Стефана, учитывающую теплоту фазового перехода на границе мерзлого и талого грунта. Тогда тепловой процесс в системе «труба – грунт» описывается двумерным уравнением теплопроводности в полярных координатах (рис. 1) [19–21].



**Рисунок 1. Расчетная область грунта вокруг теплопровода**

Математическая постановка задачи Стефана со сглаженными коэффициентами формулируется следующим образом. Требуется определить нестационарное температурное поле  $T(r, \varphi, t)$ , удовлетворяющее уравнению теплопроводности в полярных координатах:

$$c\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial \varphi}\right), \quad (r, \varphi) \in \Omega; \quad (1)$$

граничному условию на дневной поверхности грунта:

$$\lambda(T)\left(\frac{\partial T}{\partial r}\cos\varphi - \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial \varphi}\sin\varphi\right)\Bigg|_{\Gamma_1} = -\alpha(T(r, \varphi, t) - T_{\text{окр}}(t)); \quad (2)$$

граничным условиям на границах  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_3$  и  $\Gamma_5$ :

$$\lambda(T)\left(\frac{\partial T}{\partial r}\sin\varphi + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial \varphi}\cos\varphi\right)\Bigg|_{\Gamma_2} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi}\Bigg|_{\Gamma_3} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial \varphi}\Bigg|_{\Gamma_5} = 0; \quad (4)$$

граничному условию на внутренней поверхности теплопровода:

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\Bigg|_{\Gamma_4} = \alpha(T(r, \varphi, t) - T_{\text{воды}}) \quad (5)$$

и начальному условию:

$$T(r, \varphi, 0) = T_H(r, \varphi). \quad (6)$$

На границах слоев заданы условия идеального теплового контакта:

$$\begin{cases} \lambda_i(T)\frac{\partial T}{\partial r}\Bigg|_{r=r_i-0} = \lambda_i(T)\frac{\partial T}{\partial r}\Bigg|_{r=r_i+0} \\ T(r_{i-0}, \varphi, t) = T(r_{i+0}, \varphi, t) \end{cases} \quad i=1, 2, 3. \quad (7)$$

Здесь  $ср(T)$ ,  $λ(T)$  – эффективные (сглаженные) коэффициенты объемной теплоемкости и теплопроводности, учитывающие теплоту фазового перехода и влажность грунта [22, 23];  $α$  – коэффициент теплообмена свободных поверхностей;  $r$ ,  $φ$  – полярные координаты;  $t$  – время.

Нестационарное температурное поле в грунте с теплоизолированной трубой определялось решением системы (1)–(7) методом конечных разностей [24–25]. В рамках метода конечных разностей для подобных задач типа Стефана предложено много методов построения различных разностных схем, которые можно условно разделить на два класса – методы с явным выделением неизвестной границы и разностные методы сквозного счета. К первым с выделением фронта фазового перехода относятся методы ловли фронта в узел сетки [26], методы выпрямления фронтов [27], методы с дробными шагами фронта [28], а к методам сквозного счета – методы, основанные на введении в функции теплосодержания [24, 26]. Более полный обзор по решению задач типа Стефана разностными методами можно найти в работах [29–31]. В данном исследовании используется построенный методом сквозного счета алгоритм решения задачи, подробно изложенный в работе [32].

### Определение толщины теплоизоляции и заглубления

В водяных подземных тепловых сетях, как правило, подающий и обратный трубопроводы прокладываются в одном ряду, в котором также располагают трубопроводы для горячего и холодного водоснабжения. В этом случае при расчетах пучок труб можно рассматривать как одну трубу с эквивалентным радиусом [33]. При расчетах рассматривался трубопровод с эквивалентным радиусом 81,5 мм.

Значения теплофизических характеристик материалов, принятые в расчетах, приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Теплофизические характеристики грунта и материалов теплопровода**

	Труба из сшитого полиэтилена	Изоляция из пенополиуретана	Оболочка из полиэтилена	Талый грунт	Мерзлый грунт
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,35	0,05	0,42	1,4	1,5
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	938	33	960	1700	1700
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	2300	1800	1700	1850	1750

Температура теплоносителя вне отопительного периода  $T_{\text{воды}} = 10$  °С, в отопительный период она составляет от 80 до 95 °С в зависимости от температуры наружного воздуха; коэффициент теплообмена на внутренней поверхности трубы в отопительный период  $α = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С), вне отопительного сезона  $α = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С); коэффициент теплообмена на дневной поверхности летом  $α = 8,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С), зимой  $α = 4$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С); влажность грунта 17,65 %, температура и теплота фазового перехода 0 °С и 333,3 кДж/кг соответственно.

Расчет начинался с апреля месяца. За начальное распределение температуры в грунте принимается однородное распределение со значением  $-3$  °С. Полученное распределение температуры в системе «труба – грунт» в начале третьего отопительного сезона берется за начальное распределение температуры, с учетом того, что за этот период влияние заданного приближенного начального условия становится минимальным. Согласно нормативным документам, среднесуточная температура окружающего воздуха для начала отопительного сезона не превышает 8 °С. Изменение температуры окружающего воздуха во времени описывалось функцией среднесуточных температур:

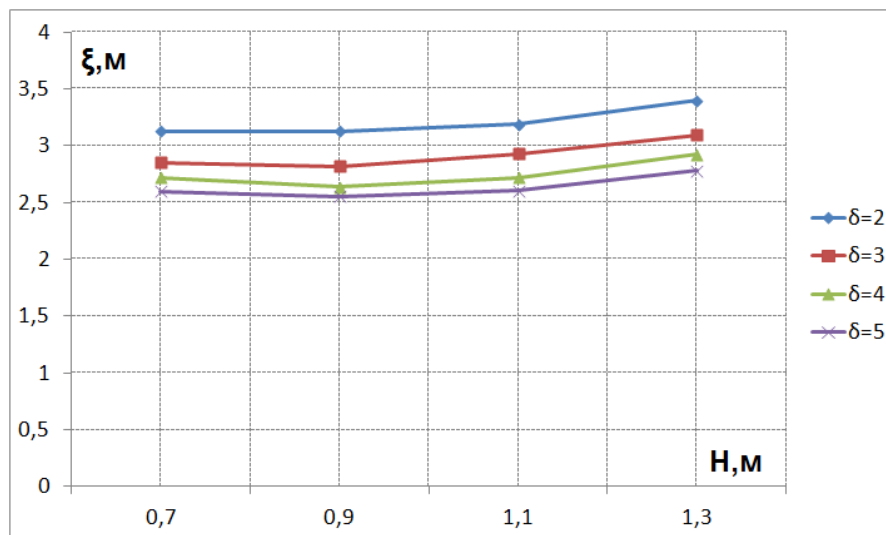
$$T(t) = 30,1 \cos\left(\frac{2\pi t}{365} + 10\right) - 8,2. \quad (8)$$

Заглубление тепловых сетей до верха оболочки при бесканальной прокладке принимается не менее 70 см [2]. При исследовании влияния величины заглубления на оттаивание и промерзание грунта в основании подземного трубопровода теплоснабжения заглубление до верха оболочки трубы изменялось от 70 до 130 см с шагом 20 см. Для каждого значения заглубления

Акимов М.П., Мордовской С.Д., Старостин Н.П. Определение толщины теплоизоляции и заглубления подземного трубопровода теплоснабжения в многолетнемерзлых грунтах

толщина теплоизоляции изменялась от 2 до 5 см. Расчеты показывают, что максимальная глубина оттаивания достигается в январе.

На рисунке 2 представлены значения максимальных глубин оттаивания (в январе) грунта при различных заглублениях труб теплоснабжения с различными толщинами теплоизоляции. Как и ожидалось, увеличение заглубления и уменьшение толщины теплоизоляции приводит к увеличению глубины оттаивания.



**Рисунок 2. Значения максимальных глубин оттаивания  $\xi$  при различных заглублениях труб  $H$  с толщинами теплоизоляции  $\delta$**

Расчеты показывают, что при всех рассматриваемых толщинах теплоизоляции и величинах заглубления опасности замерзания теплоносителя не существует, поскольку нулевая изотерма проходит по теплоизоляции. Поэтому величина необходимого заглубления не может быть определена по условию предотвращения замораживания теплоносителя. В связи с этим предлагается определять необходимое заглубление подземного бестраншейного теплопровода из условия сохранения толщины деятельного слоя. Величина заглубления должна обеспечивать такую величину максимальной глубины оттаивания, что до начала следующего отопительного сезона (в сентябре) глубина оттаивания восстановится до толщины деятельного слоя. При таком заглублении глубина оттаивания в окрестности трубопровода останется стабильной на протяжении многих лет.

В результате большого количества численных экспериментов с варьированием толщины теплоизоляции было установлено, что толщина теплоизоляции 3 см является минимальной, обеспечивающей восстановление к началу отопительного сезона глубины оттаивания около трубы на уровне деятельного слоя. Об этом свидетельствуют характерные изотермы температур на рисунках 3–6. Из графиков видно, что при толщине теплоизоляции 2 см и заглублении от 70 до 130 см глубина оттаивания не успевает восстановиться до толщины деятельного слоя. При заглублении теплопровода на 70 см и толщине изоляции 3 см глубина оттаивания к началу отопительного сезона восстанавливается до глубины деятельного слоя (рис. 3Б). Поэтому для рассматриваемого теплопровода с толщиной теплоизоляции 3 см рекомендуется величина заглубления, равная 70 см. Для теплопровода с толщиной теплоизоляции 4 см рекомендуется заглубление до 90 см (рис. 4В), с толщиной теплоизоляции 5 см – заглубление до 110 см (рис. 5Г). При заглублении 130 см толщина теплоизоляции должна быть более 5 см (рис. 6).

Область допустимых величин заглублений в зависимости от толщины слоя теплоизоляции представлена на рисунке 7.



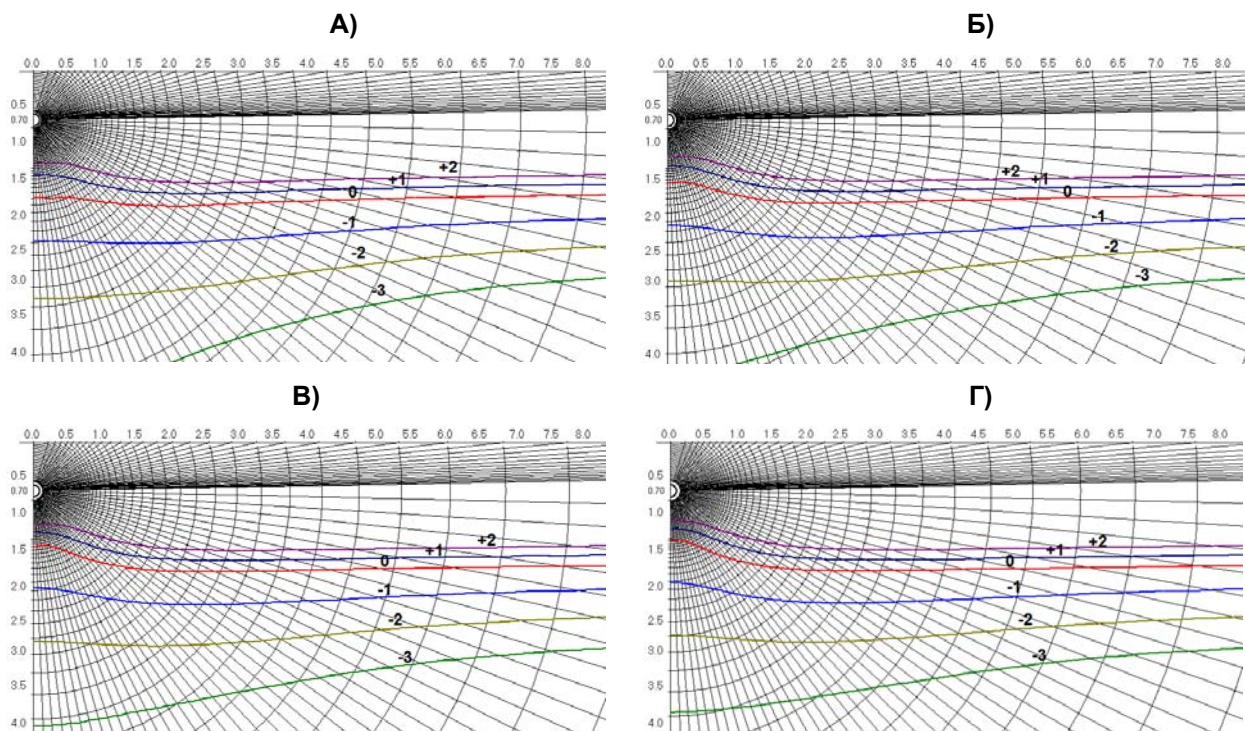


Рисунок 3. Изотермы температур около подземного теплопровода с эквивалентным радиусом 8,15 см к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении  $H = 70$  см при различных толщинах теплоизоляции  $\delta$ : А –  $\delta = 2$ ; Б –  $\delta = 3$ ; В –  $\delta = 4$ ; Г –  $\delta = 5$  см

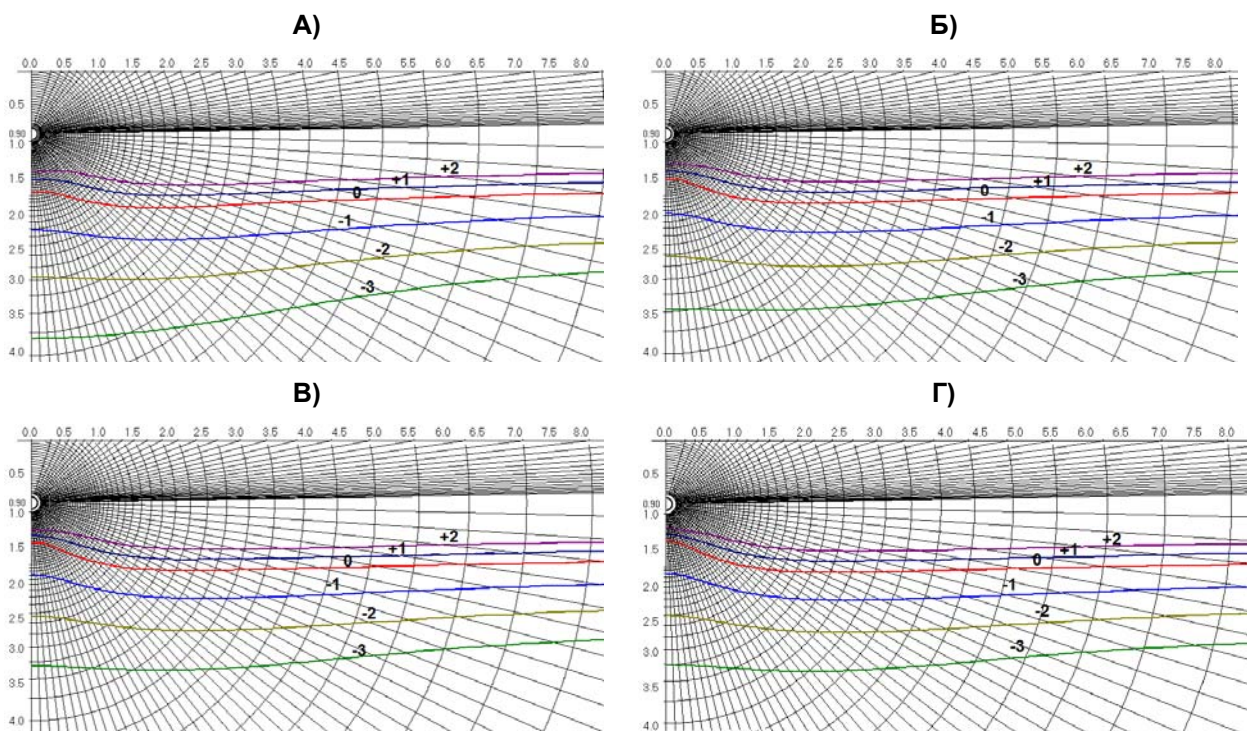


Рисунок 4. Изотермы температур около подземного теплопровода с эквивалентным радиусом 8,15 см к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении  $H = 90$  см при различных толщинах теплоизоляции  $\delta$ : А –  $\delta = 2$ ; Б –  $\delta = 3$ ; В –  $\delta = 4$ ; Г –  $\delta = 5$  см



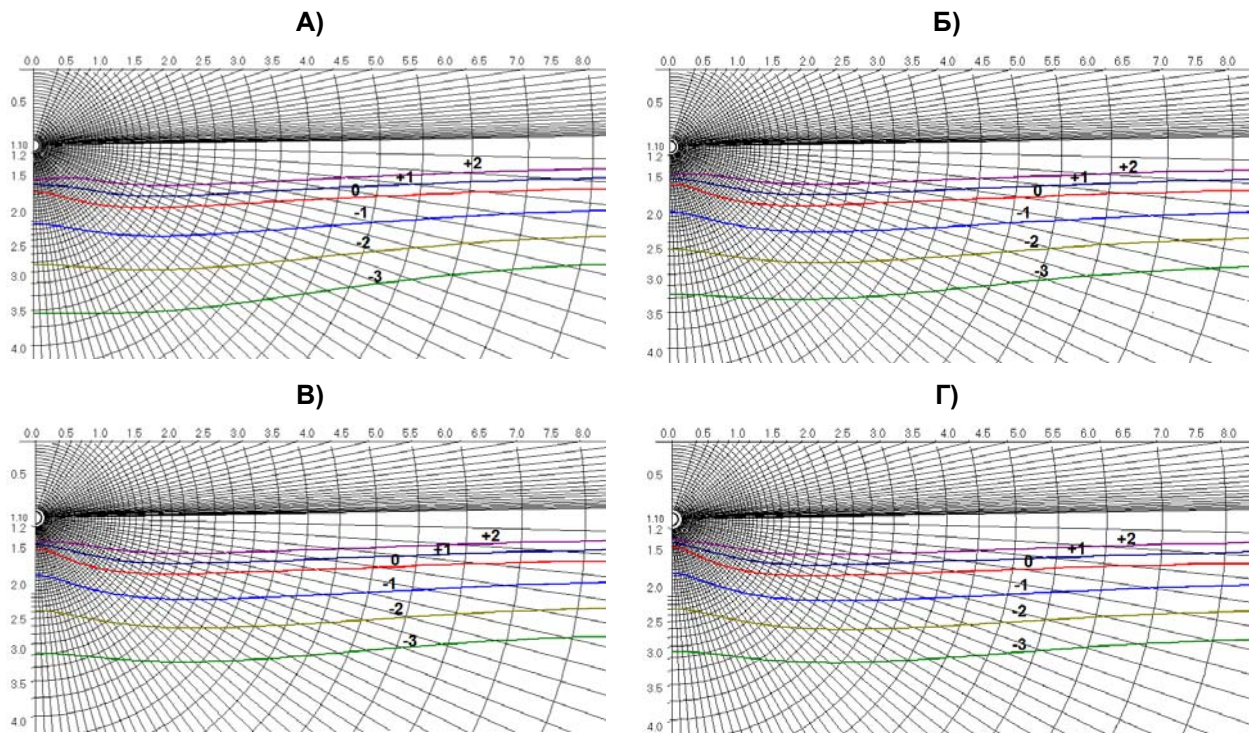


Рисунок 5. Изотермы температур около подземного теплопровода с эквивалентным радиусом 8,15 см к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении  $H = 110$  см при различных толщинах теплоизоляции  $\delta$ : А –  $\delta = 2$ ; Б –  $\delta = 3$ ; В –  $\delta = 4$ ; Г –  $\delta = 5$  см

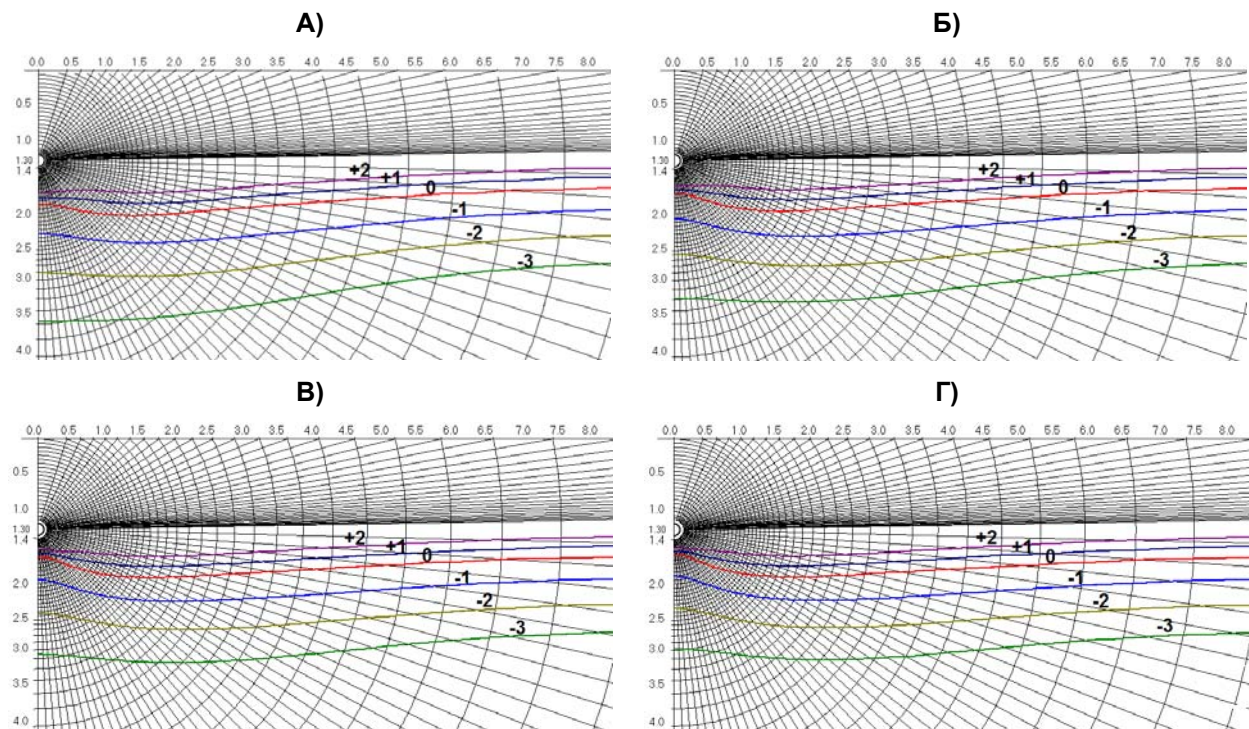


Рисунок 5. Изотермы температур около подземного теплопровода с эквивалентным радиусом 8,15 см к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении  $H = 110$  см при различных толщинах теплоизоляции  $\delta$ : А –  $\delta = 2$ ; Б –  $\delta = 3$ ; В –  $\delta = 4$ ; Г –  $\delta = 5$  см

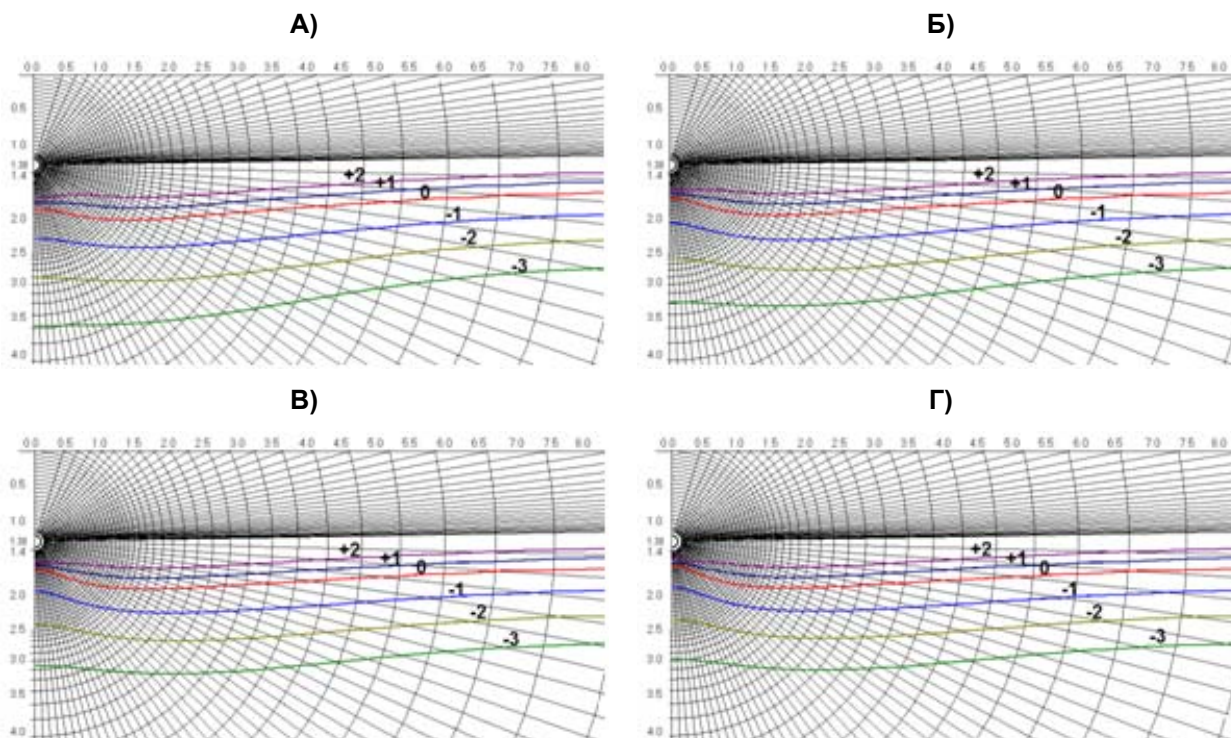


Рисунок 6. Изотермы температур около подземного теплопровода с эквивалентным радиусом 8,15 см к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении  $H = 130$  см при различных толщинах теплоизоляции  $\delta$ : А –  $\delta = 2$ ; Б –  $\delta = 3$ ; В –  $\delta = 4$ ; Г –  $\delta = 5$  см

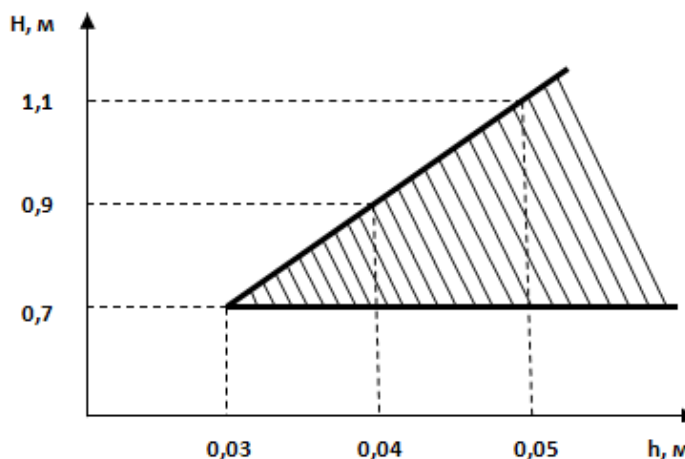


Рисунок 7. Область допустимых величин заглублений в зависимости от толщин теплоизоляции

Предлагаемая методика определения величины заглубления подземного бестраншейного трубопровода теплоснабжения с заданной толщиной теплоизоляции сводится к выполнению следующей цепочки расчетов:

- 1) задается начальное приближение заглубления  $H$ ;
- 2) по расчетным изотермам определяется восстанавливаемость границы оттаивания в начале отопительного сезона до границы деятельного слоя вычислением значения функционала

$$J(H) = \int_0^l \left[ \Gamma_{\text{оттаив}}(x) - \Gamma_{\text{деят}}(x) \right]^2 dx, \tag{9}$$

где  $\Gamma_{\text{оттаив}}$ ,  $\Gamma_{\text{деят}}$  – функции границ оттаивания и деятельного слоя соответственно;



- 3) методом одномерной минимизации определяется следующее приближение величины заглубления к решению задачи минимума функционала (2.7), характеризующего восстановление до начала отопительного сезона глубины оттаивания многолетнемерзлого грунта на уровне деятельного слоя;
- 4) расчеты повторяются с пункта 2 до определения точки экстремума с заданной точностью.

Расчеты динамики температурного поля вокруг подземного теплопровода проводились для климатических условий Якутска. Тем не менее, предлагаемая методика определения толщины теплоизоляции и величины заглубления трубопровода теплоснабжения из условия восстановления глубины оттаивания до толщины деятельного слоя к началу отопительного сезона может быть рекомендована и для других регионов распространения многолетнемерзлых грунтов.

### Заключение

1. Тепловой процесс в системе «многослойная труба – грунт» предлагается описывать уравнением теплопроводности в полярных координатах.

2. Расчетами промерзания и оттаивания многолетнемерзлых грунтов установлена возможность определения толщины теплоизоляции и величины заглубления по условию ежегодного восстановления глубины оттаивания до толщины деятельного слоя грунта к началу отопительного сезона.

### Литература

1. Концепция РАО «ЕЭС России» технической и организационно-экономической политики в области теплофикации и централизованного теплоснабжения // Новости теплоснабжения. 2002. №1. С. 1–11.
2. СНиП 41-02-2003. Тепловые сети. М., 2004.
3. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. М., 2004.
4. Налобин Н.В. Оптимизация толщины пенополиуретановой изоляции теплопроводов в системах теплоснабжения объектов на севере Западной Сибири: Дис...канд. наук. Тюмень, 2007. 138 с.
5. Акимов М.П. Моделирование и численный анализ динамики температурного поля многолетнемерзлых грунтов при воздействии бесканальных подземных трубопроводов теплоснабжения: Дис...канд. наук. Якутск, 2013. 110 с.
6. Rosa A., Li H., Svendsen S. Method for optimal design of pipes for low-energy district heating, with focus on heat losses // Energy. 2011. Vol. 36. No.5. Pp. 2407–2418.
7. Keçebaş A., Alkan M., Bayhan M. Thermo-economic analysis of pipe insulation for district heating piping systems // Applied Thermal Engineering. 2011. Vol. 31. No.17. Pp. 3929–3937.
8. Li H., Svendsen S. Energy and exergy analysis of low temperature district heating network // Energy. 2012. Vol. 45. No.1. Pp. 237–246.
9. Perpar M., Rek Z., Bajric S., Zun I. Soil thermal conductivity prediction for district heating pre-insulated pipeline in operation // Energy. 2012. Vol. 44. No.1. Pp. 197–210.
10. Gao P., Zhou G. Study on temperature field around heat pipe underground based on line heat source theory // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43. No.9. Pp. 2483–2487.
11. Корягин А.Н. Повышение эффективности систем теплоснабжения на основе мониторинга тепловых потерь и оптимизации параметров тепловой изоляции: Дис...канд. наук. Иваново, 2011. 155 с.
12. Xu G., Qi J., Jin H. Model test study on influence of freezing and thawing on the crude oil pipeline in cold regions // Cold Regions Science and Technology. 2010. Vol. 64. No.3. Pp. 262–270.
13. Zhang C., Wang H., Sun Q., Sun D. Temperature Field and Heat Transfer Analysis of Underground Buried Pipe // ICMTMA '11 Proceedings of the 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. 2011. Vol. 3. Pp. 636–639.
14. Pang L., Wang J. Study on Numerical Simulation for Soil Temperature Field Underground Heated Pipe // System Simulation Academic journal. 2004. Vol. 16. No.3. Pp. 485–491.
15. Gu F., Ma G., Sun N. and Li X. A Numerical Calculation on Soil Moisture and Heat Couple Temperature Field around Pipelines in the Process of Alternate Transportation of Cool-Hot Crude Oil // International Conference on Pipelines and Trenchless Technology (ICPTT). 2009. Pp. 362–372.

16. Половников В.Ю., Хузеев В.А. Численный анализ влияния промерзания грунта в зоне прокладки на тепловые потери бесканальных теплопроводов // Инженерно-строительный журнал. 2013. №2(37). С. 16–24.
17. Kuznetsov G.V., Polovnikov V.Yu. Numerical Investigation of Thermal Regimes in Twin-Tube-Channel Heat Pipelines Using Conductive-Convective Model of Heat Transfer // Thermal Engineering. 2012. Vol. 59. No.4. Pp. 310–315.
18. Размазин Г.А., Моисеев Б.В. Тепловое взаимодействие бесканальной прокладки теплопроводов с вечномерзлыми грунтами // Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экологии городов. Сб. материалов I Международной научно-практической конференции. Пенза, ПДЗ, 2000. С. 106–110.
19. Акимов М.П., Мордовской С.Д., Старостин Н.П. Воздействие подземного трубопровода теплоснабжения на многолетнемерзлые грунты Крайнего Севера // Вестник Северо-Восточного федерального университета. 2012. Т. 9. №2. С. 19–23.
20. Акимов М.П. Моделирование теплового воздействия подземного трубопровода с теплоносителем на вечномерзлые грунты // Нефтегазовое дело. 2013. Т.11. №2. С. 73–77.
21. Акимов М.П., Старостин Н.П., Мордовской С.Д. Математическое моделирование теплового процесса в вечномерзлом грунте при воздействии полимерного трубопровода теплоснабжения // Материалы XVII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВСМПС'2011), Алушта. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. С. 28–30.
22. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1965. Т. 5. №5. С. 816–827.
23. Слепцов В.И., Мордовской С.Д., Изаксон В.Ю. Математическое моделирование теплообменных процессов в многолетнемерзлых горных породах. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996. 104 с.
24. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
25. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. М.: Наука, 1977. 439 с.
26. Будак Б.М., Соловьев Е.Н., Успенский А.Б. Разностный метод сглаживанием коэффициентов для решения задач Стефана // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1964. Т. 5. №5. С. 828–840.
27. Волков С.А. Численные решения двухфазной задачи Стефана // Вычислительные методы и программирование. М.: ВЦ МГУ, 1967. Вып. 6. С.217–230.
28. Охлопков Н.М. Численные методы решения краевых задач математической физики. Якутск: Издательство ЯГУ, 1993. 177 с.
29. Васильев В.И. Численное интегрирование дифференциальных уравнений с нелокальными граничными условиями. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. 160 с.
30. Изаксон В.Ю., Петров Е.Е. Численные методы прогнозирования и регулирования теплового режима горных пород области многолетней мерзлоты: Препринт // ИГДС СО РАН. Якутск: Издательство ЯФ СО АН СССР, 1986. 96 с.
31. Тихонов А.Н., Самарский А.А., Уравнения математической физики. М: Наука, 1966. 501 с.
32. Акимов М.П., Мордовской С.Д., Старостин Н.П. Численный алгоритм для исследования влияния бесканального подземного трубопровода теплоснабжения на вечномерзлые грунты // Математические заметки ЯГУ. 2010. Т. 17. № 2. С. 125–131.
33. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976. 352 с.

*Мир Петрович Акимов, г. Якутск, Республика Саха (Якутия)  
+7(924)861-90-60; эл. почта: mir\_akimov@mail.ru*

*Сергей Денисович Мордовской, г. Якутск, Республика Саха (Якутия)  
+7(924)662-16-18; эл. почта: msd@mail.ru*

*Николай Павлович Старостин, г. Якутск, Республика Саха (Якутия)  
+7(914)221-44-95; эл. почта: nikstar56@mail.ru*

© Акимов М.П., Мордовской С.Д., Старостин Н.П., 2014

Акимов М.П., Мордовской С.Д., Старостин Н.П. Определение толщины теплоизоляции и заглубления подземного трубопровода теплоснабжения в многолетнемерзлых грунтах

doi: 10.5862/MCE.46.3

## Calculating thermal insulation thickness and embedment depth of underground heat supply pipeline for permafrost soils

**M.P. Akimov***North-Eastern Federal University in Yakutsk, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia  
+7(924)8619060; e-mail: mir\_akimov@mail.ru***S.D. Mordovskoy***North-Eastern Federal University in Yakutsk, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia  
+7(924)6621618; e-mail: msd@mail.ru***N.P. Starostin***Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia  
+7(914)2214495; nikstar56@mail.ru*

### Key words

pipeline; permafrost; temperature; the Stefan problem; thawing depth; embedment depth; insulation thickness

### Abstract

In this work the authors considered a freezing-and-melting process of soils under the polyurethane-insulated polyethylene heating pipeline, which is used in the regions with permafrost soils.

Temperature field dynamics of the “pipeline – soil” system is determined by heat conductivity equation in polar coordinate system. The corresponding two-dimensional Stefan problem is solved by the finite differences method. The authors propose to determine the thickness of pipeline thermal insulation and the embedment depth upon the condition of melting depth reduction to an annual thawed layer of soil identified before the heating season. There are presented results of isotherm calculations for underground heat supply pipelines interacting with frozen soil. These results show that reduction of melting depth to annual thawed layer is probable.

The calculations were carried out for simulated soil and temperature conditions of Yakutsk, Republic Sakha, Russia. Nevertheless, the results obtained can be applied in other permafrost areas.

### References

1. *Novosti teplosnabzheniya*. 2002. №1. Pp. 1–11. (rus)
2. *SNiP 41-02-2003. Teplovyye seti* [Building code 41-02-2003. Heat network]. Moscow, 2004. (rus)
3. *SNiP 41-03-2003. Teplovaya izolyatsiya oborudovaniya i truboprovodov* [Building code 41-03-2003. Thermal insulation of equipment and pipelines]. Moscow, 2004. (rus)
4. Nalobin N.V. *Optimizatsiya tolshchiny penopoliuretanovoy izolyatsii teploprovodov v sistemakh teplosnabzheniya obyektov na severe Zapadnoy Sibiri* [Optimization of polyurethane foam isolation thickness of heat supply pipelines of buildings in the northern part of Western Siberia]. PhD thesis. Tyumen, 2007. 138 p. (rus)
5. Akimov M.P. *Modelirovaniye i chislennyy analiz dinamiki temperaturnogo polya mnogoletnemerzlykh gruntov pri vozdeystvii beskanalnykh podzemnykh truboprovodov teplosnabzheniya* [Modeling and numerical analysis of temperature field's dynamic of permafrost in interaction with channelless heat supply pipeline]. PhD thesis. Yakutsk, 2013. 110 p. (rus)
6. Rosa A., Li H., Svendsen S. Method for optimal design of pipes for low-energy district heating, with focus on heat losses. *Energy*. 2011. Vol. 36. No. 5. Pp. 2407–2418.
7. Keçebaş A., Alkan M., Bayhan M. Thermo-economic analysis of pipe insulation for district heating piping systems. *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31. No. 17. Pp. 3929–3937.
8. Li H., Svendsen S. Energy and exergy analysis of low temperature district heating network. *Energy*. 2012. Vol. 45. No.1. Pp. 237–246.
9. Perpar M., Rek Z., Bajric S., Zun I. Soil thermal conductivity prediction for district heating pre-insulated pipeline in operation. *Energy*. 2012. Vol. 44. No. 1. Pp. 197–210.

Akimov M.P., Mordovskoy S.D., Starostin N.P. Calculating thermal insulation thickness and embedment depth of underground heat supply pipeline for permafrost soils



10. Gao P., Zhou G. Study on temperature field around heat pipe underground based on line heat source theory. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. No. 9. Pp. 2483–2487.
11. Koryagin A.N. *Povysheniye effektivnosti sistem teplosnabzheniya na osnove monitoringa teplovykh poter i optimizatsii parametrov teplovy izolyatsii* [Heat supply systems efficiency improvement on the basis of monitoring thermal losses and thermal isolation parameters optimization]. PhD thesis. Ivanovo, 2011. 155 p. (rus)
12. Xu G., Qi J., Jin H. Model test study on influence of freezing and thawing on the crude oil pipeline in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2010. Vol. 64. No. 3. Pp. 262–270.
13. Zhang C., Wang H., Sun Q., Sun D. Temperature Field and Heat Transfer Analysis of Underground Buried Pipe. *ICMTMA '11 Proceedings of the 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. 2011. Vol. 3. Pp. 636–639.
14. Pang L., Wang J. Study on Numerical Simulation for Soil Temperature Field Underground Heated Pipe. *System Simulation Academic journal*. 2004. Vol. 16. No. 3. Pp. 485–491.
15. Gu F., Ma G., Sun N., Li X. A Numerical Calculation on Soil Moisture and Heat Couple Temperature Field around Pipelines in the Process of Alternate Transportation of Cool-Hot Crude Oil. *International Conference on Pipelines and Trenchless Technology (ICPTT)*. 2009. Pp. 362–372.
16. Polovnikov V.Y., Khuzeev V.A. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 2(37). Pp. 16–24. (rus)
17. Kuznetsov G.V., Polovnikov V.Yu. Numerical Investigation of Thermal Regimes in Twin-Tube-Channel Heat Pipelines Using Conductive-Convective Model of Heat Transfer. *Thermal Engineering*. 2012. Vol. 59. No. 4. Pp. 310–315.
18. Razmazin G.A., Moiseev B.V. *Problemy stroitelstva, inzhenernogo obespecheniya i ekologii gorodov / Sb. materialov I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of construction, engineering and urban ecology. Proceedings of I international scientific and practical conference]. Penza: PDZ, 2000. Pp. 106–110. (rus)
19. Akimov M.P., Mordovskoy S.D., Starostin N.P. *Vestnik of the NEFU named after M.K. Ammosov*. 2012. Vol. 9. No. 2. Pp. 19–23. (rus)
20. Akimov M.P. *Oil and gas business*. 2013. Vol. 11. No. 2. Pp. 73–77. (rus)
21. Akimov M.P., Starostin N.P., Mordovskoy S.D. *Materialy XVII Mezhdunarodnoy konferentsii po vychislitelnoy mekhanike i sovremennym prikladnym programmnyy sistemam (VMSPPS'2011)* [Proceedings of XVII International conference on computational mechanics and modern applied software systems (VMSPPS'2011)]. Moscow: MAI-PRINT, 2011. Pp. 28–30. (rus)
22. Samarsky A.A. Moiseenko B.D. *Zhurnal vychislitelnoy matematiki i matematicheskoy fiziki*. 1965. Vol. 5. No. 5. Pp. 816–827. (rus)
23. Sleptsov V.I., Mordovskoy S.D., Izakson V.Y. *Matematicheskoye modelirovaniye teploobmennykh protsessov v mnogoletnemerzlykh gornykh porodakh* [Mathematical modeling of heat exchange processes in permafrost]. Novosibirsk: Nauka. Sibirskaya izdatelskaya firma RAN, 1996. 104 p. (rus)
24. Samarsky A.A., Vabishchevich P. N. *Vychislitel'naya teploperedacha* [Computational heat transfer]. Moscow: Editorial of URSS, 2003. 784 p. (rus)
25. Godunov S.K., Ryabenki V.S. *Raznostnyye skhemy* [Differential schemes]. Moscow: Nauka, 1977. 439 p. (rus)
26. Budak B.M., Solovyov E.N. *Zhurnal vychislitelnoy matematiki i matematicheskoy fiziki*. 1964. Vol. 5. No. 5. Pp. 828–840. (rus)
27. Volkov S.A. *Vychislitelnyye metody i programmirovaniye* [Computing methods and programming]. Moscow: VTs MGU, 1967. Vol. 6. Pp. 217–230. (rus)
28. Okhlopov N. M. *Chislennyye metody resheniya krayevykh zadach matematicheskoy fiziki* [Numerical methods of the solution of boundary problems of mathematical physics]. Yakutsk: Izdatelstvo YaGU, 1993. 177 p. (rus)
29. Vasilyev V.I. *Chislennoye integrirovaniye differentsialnykh uravneniy s nelokalnymi granichnymi usloviyami* [Numerical integration of the differential equations with not local boundary conditions]. Yakutsk: YaF SO AN SSSR, 1985. 160 p. (rus)
30. Izakson V. Yu., Petrov E.E. *Chislennyye metody prognozirovaniya i regulirovaniya teplovogo rezhima gornykh porod oblasti mnogoletney merzloty* [Numerical methods of forecasting and regulation of a thermal mode of the mining rocks in permafrost area]. Yakutsk: YaF SO AN SSSR, 1986. 96 p. (rus)

Akimov M.P., Mordovskoy S.D., Starostin N.P. Calculating thermal insulation thickness and embedment depth of underground heat supply pipeline for permafrost soils

31. Tikhonov. A.N., Samarsky A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka, 1966. 501 p. (rus)
32. Akimov M.P., Mordovskoy S.D., Starostin N.P. *Mathematical notes of YSU2010*. Vol. 17. No. 2. Pp.125–131. (rus)
33. Pekhovich A.I., Zhidkikh V.M. *Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel* [Solid thermal regime calculation]. Leningrad: Energiya, 1976. 352 p. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 14–23**