

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-48-56

<sup>1,\*</sup>Акимов М.П., <sup>1</sup>Мордовской С.Д., <sup>2</sup>Старостин Н.П.<sup>1</sup>Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К. Аммосова<sup>2</sup>Институт проблем нефти и газа СО РАН

\*E-mail: mir\_akimov@mail.ru

## РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ И ВЕЛИЧИНЫ ЗАГЛУБЛЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В РЕГИОНАХ С МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМИ ГРУНТАМИ

**Аннотация.** Рассмотрен процесс оттаивания-промерзания вмещающего грунта подземного полиэтиленового трубопровода теплоснабжения с теплоизоляцией, эксплуатируемого в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Поставлена задача определения толщины теплоизоляции трубопровода и величины его заглубления на основе анализа температурного поля в грунте в течение многолетних циклов. Температурное поле в системе «теплоизолированная труба-грунт», изменяющееся во времени, предложено определять, решая уравнения теплопроводности в полярных координатах. При этом пучок труб рассматривается как одна труба эквивалентного радиуса. Такой подход позволил упростить условия сопряжения трубы, теплоизоляции, полиэтиленовой оболочки и вмещающего грунта, а также использовать простой численный метод решения уравнения – метод конечных разностей. Приведены результаты расчетов максимальной глубины оттаивания грунта от величины заглубления трубы теплоснабжения при различных толщинах теплоизоляции. Предложено определять оптимальную величину заглубления подземного трубопровода теплоснабжения из условия ежегодного установления нулевой изотермы вмещающего грунта на уровне границы деятельного слоя грунта к началу отопительного сезона. Возможность нахождения нулевой изотермы на таком уровне проиллюстрирована расчетами изотерм к началу отопительного сезона (сентябрь) при различных заглублениях и толщинах теплоизоляции. По результатам расчетов предложена методика расчетного определения толщины слоя теплоизоляции и величины заглубления трубопровода из условия минимизации функционала, характеризующего меру уклонения ординаты нулевой изотермы на левой границе области от уровня глубины деятельного слоя грунта в момент времени начала отопительного сезона.

**Ключевые слова:** трубопровод, теплоснабжение, многолетнемерзлые грунты, температура, глубина оттаивания, толщина теплоизоляции.

**Введение.** В настоящее время в практику строительства тепловых сетей широко внедряются опытно-промышленные бесканальные варианты внутриквартальных предизолированных полиэтиленовых подземных трубопроводов теплоснабжения. В то же время, проектные решения прокладки таких трубопроводов недостаточно научно обоснованы. Это связано, прежде всего, с отсутствием методов определения таких параметров теплопровода, как толщина теплоизоляции и величина заглубления, которыми можно управлять тепловым режимом грунта в основании трубопровода. Управление тепловым режимом грунта имеет особую важность при проектировании тепловых сетей в регионах с многолетнемерзлыми грунтами.

Согласно нормативным документам расчет толщины теплоизоляции осуществляется по нормированной плотности теплового потока [1]. Такой расчет, при котором за температуру окружающей среды берется среднегодовая температура грунта на глубине заложения трубопровода, не пригоден для расчетов толщины теплоизоляции

теплопроводов, прокладываемых в регионах распространения многолетнемерзлых грунтов. Кроме того, при таких расчетах толщина теплоизоляции не связана с величиной заглубления теплопроводов, что не соответствует реальному процессу теплового режима в многолетнемерзлых грунтах. При проектировании тепловых сетей в районах распространения многолетнемерзлых грунтов толщину слоя теплоизоляции необходимо определять в комплексе с величиной заглубления теплопровода, основываясь на анализе динамики границы оттаивания грунта. Отсутствие подобной методики расчета приводит к негативным последствиям при практическом использовании перспективных трубопроводов теплоснабжения подземной прокладки.

В условиях эксплуатации подземного теплопровода тепловое состояние грунта в течение годового цикла претерпевает значительные изменения. Это обусловлено не только изменением температуры окружающей среды, но и температурным режимом теплоносителя. На динамику температурного поля грунта существенное влияние имеют также толщина слоя теплоизоляции и

глубина заложения трубопровода. В регионах распространения многолетнемерзлых грунтов прокладка теплопровода с использованием недостаточно обоснованных параметров может привести к ежегодному увеличению ореола оттаивания вокруг теплопровода и потере его устойчивости. Имеется достаточно большое количество научных работ, посвященных исследованию температурного поля в основании бесканальных полимерных трубопроводов [2–4]. В то же время актуальной проблеме сохранения многолетнемерзлых грунтов при воздействии подземного теплопровода уделяется недостаточное внимание.

В целях снижения теплопотерь подземные трубопроводы теплоснабжения прокладываются в пучке с другими трубопроводами, который можно рассматривать как один трубопровод [5]. Тогда температурное поле в многослойной трубе и грунте можно описать уравнением теплопроводности в полярных координатах, упрощающей условия сопряжения трубы, теплоизоляции, полиэтиленовой оболочки и вмещающего грунта.

Для учета теплоты фазового перехода воды в уравнении теплопроводности удобнее воспользоваться фронтовой моделью, согласно которой фазовое превращение происходит на границе мерзлого и талого грунта [6–9]. При численном

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

На поверхности грунта граничное условие третьего рода запишем в виде:

$$\lambda(T)\left(\frac{\partial T}{\partial r}\cos\varphi - \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial \varphi}\sin\varphi\right)\Big|_{\Gamma_1} = -\alpha_{eff}(T(r, \varphi, t) - T_{air}(t)). \quad (2)$$

В условии (2) эффективный коэффициент теплообмена  $\alpha_{eff}$  в зимний период вычисляется в зависимости от толщины снега,  $T_{air}$  – температура окружающего воздуха.

На удалении от теплопровода условие отсутствия теплового потока в горизонтальном направлении запишем в виде:

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

В виду симметричности температурного поля справедливы условия:

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

На внутренней поверхности теплопровода происходит конвективный теплообмен с теплоносителем с температурой  $T_{water}$ :

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{\Gamma_4} = \alpha(T(r, \varphi, t) - T_{water}). \quad (5)$$

На границах разнородных тел запишем условия идеального теплового контакта:

$$\lambda_i(T)\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r_{i-0}} = \lambda_i(T)\frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r_{i+0}}; \quad (6)$$

$$T(r_{i-0}, \varphi, t) = T(r_{i+0}, \varphi, t), \quad (7)$$

где  $i$  – номер слоя.

решении уравнения теплопроводности, учитывающего фазовое превращение, трудность представляет определение границ твердой и жидкой фаз. Эффективным методом решения подобных уравнений является метод сквозного счета, предложенный в работе [10] и применяемый для решения многих прикладных задач [11–14]. Численные алгоритмы решения задачи определения динамики температурного поля грунта вокруг подземного полимерного трубопровода с теплоизоляцией рассматривались в работах [15, 16]. Результаты решения задач теплового режима в системе «грунт-труба» не применялись для решения задач проектирования теплопроводов, в частности определения толщины теплоизоляции и глубины заглублиения.

Целью данной работы является разработка методики определения толщины теплоизоляции и величины заглублиения подземного трубопровода теплоснабжения, прокладываемого в регионах с многолетнемерзлыми грунтами на основе анализа динамики нулевой изотермы (изотермы  $0^\circ\text{C}$ ) в области вмещающего грунта.

**Постановка задачи.** В рассматриваемой области (рис. 1) запишем уравнение теплопроводности в полярных координатах:

При  $t=0$  зададим начальное условие:

$$T(r, \varphi, 0) = T_{init}(r, \varphi). \quad (8)$$

В уравнении (1) с начальными и граничными условиями использованы следующие обозначения:  $T$  – температура;  $\rho(T)$ ,  $\lambda(T)$  – эффективные (сглаженные) коэффициенты теплоемкости и теплопроводности;  $r$ ,  $\varphi$  – полярные координаты;  $t$  – время. Поставленная задача решалась методом конечных разностей. Расчеты проводились с шагом по времени равным 3 часа. Проводились предварительные расчеты для определения начального распределения температуры следующим образом. За начальное время бралось первое число сентября. За начальное условие принималось однородное распределение температуры в рассматриваемой области с температурой  $-3^\circ\text{C}$ . Проводились расчеты 3 летнего цикла, в результате которого распределение температуры в рассматриваемой области в начале сентября становится практически не зависящим от начального условия. Полученное температурное поле принималось за начальное условие при расчетах.

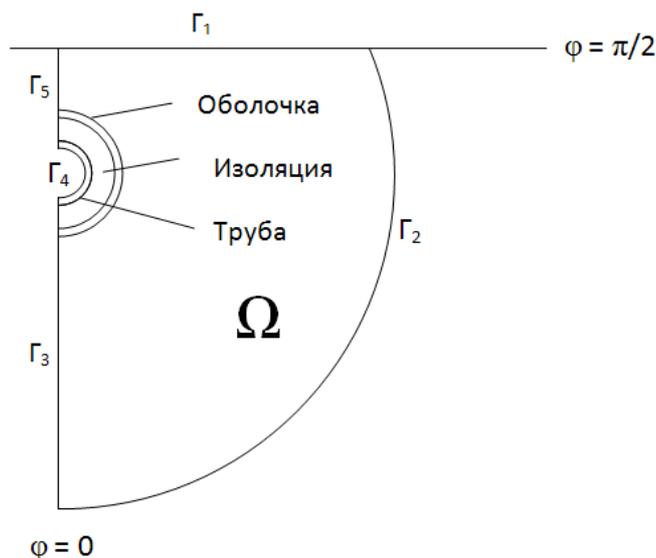


Рис. 1. Расчетная область предизолированного трубопровода и грунта:  
 Ω – область; Γ<sub>1</sub> – дневная поверхность; Γ<sub>2</sub>, Γ<sub>3</sub>, Γ<sub>4</sub>, Γ<sub>5</sub> – границы области, φ – угловая координата

**Результаты расчетов. Обсуждения.** Методу определения толщины теплоизоляции и величины заглубления подземного трубопровода теплоснабжения изложим на примере расчета температурного режима вмещающего грунта при

воздействии трубопровода теплоснабжения с эквивалентным радиусом 81,5 мм.

В таблице 1 приведены значения теплофизических характеристик материалов, принятые в расчетах [17–18].

Таблица 1

**Теплофизические характеристики грунта и материалов теплопровода**

Параметр	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

Примем, что температура теплоносителя  $T_{water}$  в летний период (май-август) равна 10 °С, в отопительный период – меняется от 80 до 95 °С

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_1}{\pi r_1}, \quad Nu = 0,023 Pr^{0,4} Re^{0,8}, \quad Pr = \frac{\nu}{a}, \quad Re = \frac{w \pi r_1}{\nu}, \quad (9)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость воды,  $a$  – коэффициент температуропроводности воды,  $w$  – скорость течения воды в трубе;  $r_1$  – внутренний радиус трубы.

Эффективный коэффициент теплообмена  $\alpha_{eff}$  на дневной поверхности грунта определялся из формулы [7–9]:

$$\frac{1}{\alpha_{eff}} = \frac{1}{\alpha_{air}} + \frac{h_{snow}}{\lambda_{snow}}, \quad (10)$$

где  $\alpha_{air}$  – коэффициент теплообмена поверхности с окружающим воздухом;  $h_{snow}$ ,  $\lambda_{snow}$  – толщина и коэффициент теплопроводности снежного покрова.

в зависимости от температуры окружающего воздуха. Влажность грунта равна 0,18. Коэффициент теплообмена  $\alpha$  на внутренней поверхности трубы вычислялся по формуле [19]:

В начальный момент времени расчета (1 апреля) температурное поле в грунте не известно. В качестве начального распределения температуры задавалось однородное температурное поле со значением -3 °С. Расчеты показали, что температурное поле в исследуемой области после нескольких годовых циклов практически не зависит от начального распределения температуры. В связи с этим далее приводятся результаты расчетов после трехлетнего цикла.

Изменение температуры окружающего воздуха во времени описывалось функцией средне-

суточных температур, полученной статистической обработкой двадцатилетних температурных данных:

$$T(t) = 30,1 \cos\left(\frac{2\pi t}{365} + 10\right) - 8,2 \quad (11)$$

Заглубление тепловых сетей до верха оболочки при бесканальной прокладке полиэтиленовых трубопроводов согласно нормативным документам принималось не менее 0,7 м. Исследовалось влияние величины заглубления подземного трубопровода теплоснабжения на тепловое состояние вмещающего грунта. Варьировались величина заглубления трубопровода в интервале

[70, 130] с шагом 20 см и толщина теплоизоляции в интервале [2, 5] с шагом 1 см. Расчетами с многолетними циклами показано, что, несмотря на минимальные температуры окружающего воздуха, максимальная глубина оттаивания достигается в январе. На рис. 2 представлены зависимости максимальной глубины оттаивания грунта от величины заглубления трубы теплоснабжения при различных толщинах теплоизоляции. Увеличение заглубления и уменьшение толщины теплоизоляции приводят к увеличению глубины оттаивания.

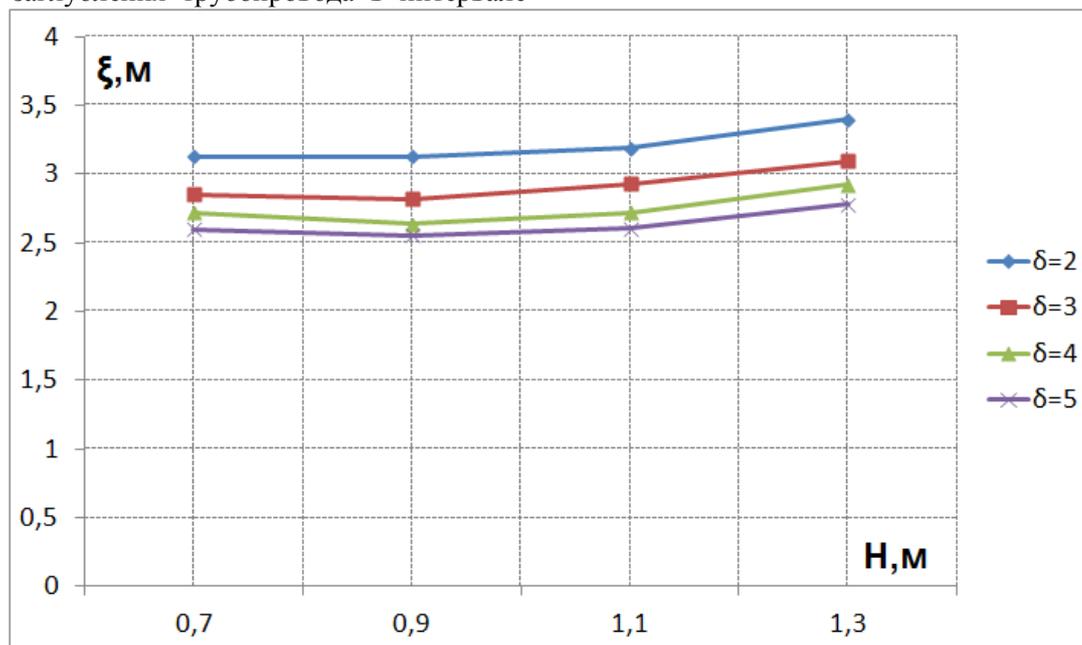


Рис. 2. Зависимости максимальных глубин оттаивания  $\xi$  от величины заглубления трубы  $H$  при различных толщинах теплоизоляции  $\delta$

Расчеты показывают, что при всех рассматриваемых толщинах теплоизоляции и величинах заглубления нулевая изотерма расположена в области теплоизоляции, что свидетельствует об отсутствии замерзания теплоносителя. Такое поведение нулевой изотермы не позволяет при заданной толщине теплоизоляции величину необходимого заглубления определять из условия недопущения замораживания теплоносителя. Наиболее практичным является определение оптимального заглубления подземного трубопровода теплоснабжения из условия ежегодного установления нулевой изотермы вмещающего грунта на уровне границы деятельного слоя грунта к началу отопительного сезона. Такое заглубление будет оптимальным с точки зрения сохранения стабильной глубины оттаивания в окрестности трубопровода в течение продолжительного времени, поскольку процесс оттаивания грунта под воздействием теплопровода ежегодно будет повторяться с одного и того же уровня глубины. Увеличение толщины теплоизоляции выше расчетной при фиксированной величине заглубления приводит к

смещению нулевой изотермы в основании трубопровода выше границы деятельного слоя, т.е. образованию под трубой валика из мерзлого грунта. Такая граница оттаивания грунта будет препятствовать миграции влаги в горизонтальном направлении и может привести к негативным последствиям.

Численными экспериментами, при которых варьировалась толщина теплоизоляции, для рассматриваемых климатических условий была установлена минимальная толщина теплоизоляции равная 3 см, обеспечивающая установление к началу отопительного сезона нулевой изотермы в грунте на уровне границы деятельного слоя (рис. 3–6). Координата глубины деятельного слоя из рисунков определяется по значению ординаты нулевой изотермы на расстоянии 8 м от начала координат.

К началу отопительного сезона нулевая изотерма в области вмещающего грунта восстанавливается до уровня границы деятельного слоя при величине заглубления трубопровода 70 см и толщине теплоизоляции 3 см. При заглублении

трубопровода 90 см толщина теплоизоляции должна быть 4 см, при заглублении 110 см – 5 см. При заглублении  $H = 130$  см толщина теплоизоляции  $h$  должна быть более 5 см (рис. 6) и может быть рассчитана по формуле

$$h = \frac{H-0,1}{20}, \quad 0,7 \leq H \leq 1,3.$$

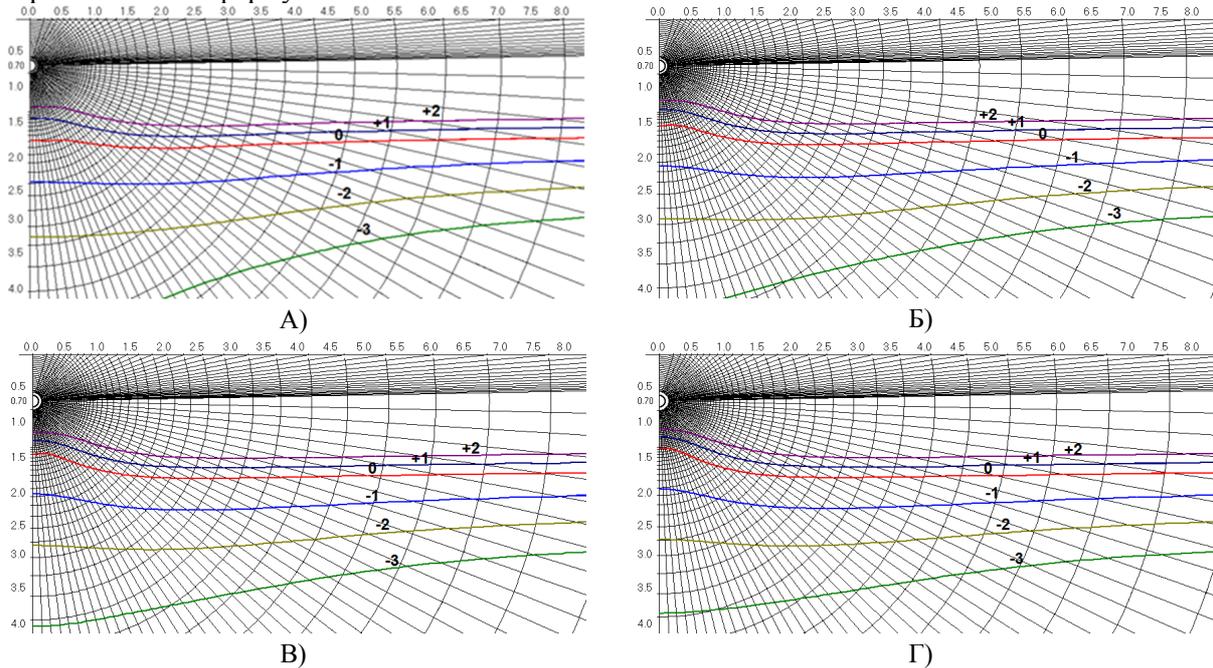


Рис. 3. Изотермы температур вмещающих грунтов трубопровода теплоснабжения к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении 70 см при различных толщинах теплоизоляции  $\delta$  :  
 А –  $\delta=2$ ; Б –  $\delta=3$ ; В –  $\delta=4$ ; Г –  $\delta= 5$  см

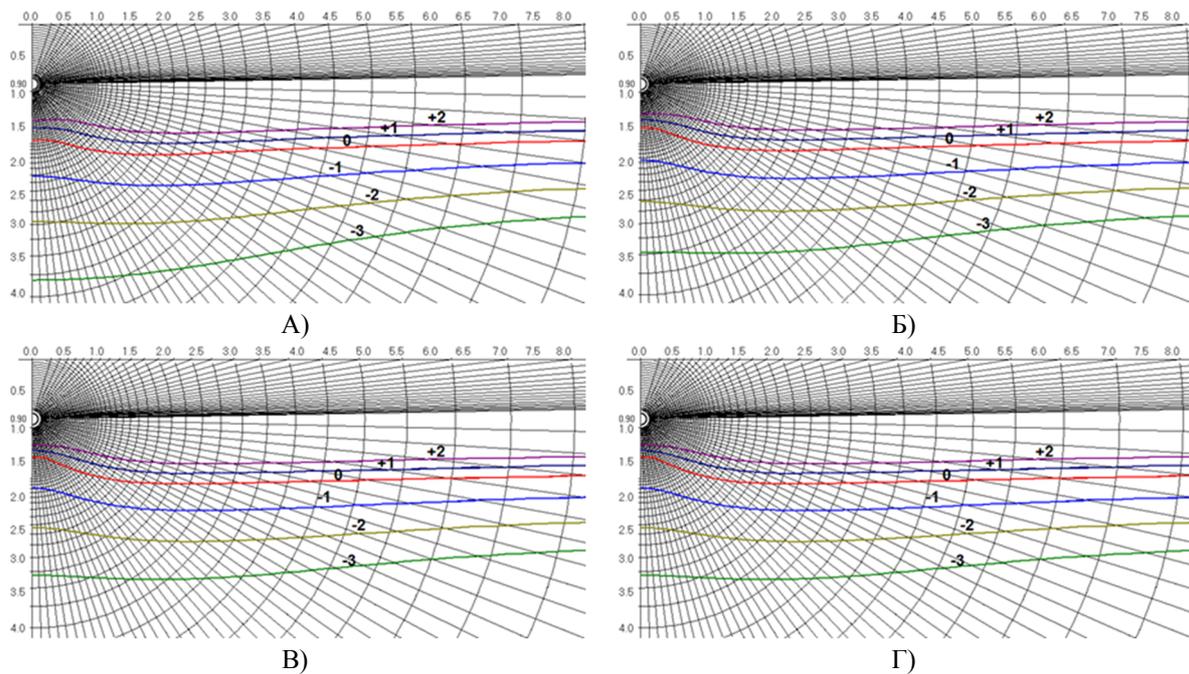


Рис. 4. Изотермы температур вмещающих грунтов трубопровода теплоснабжения к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении 90 см при толщинах теплоизоляции  $\delta$ : А-Г соответствуют  $\delta$  рис. 3

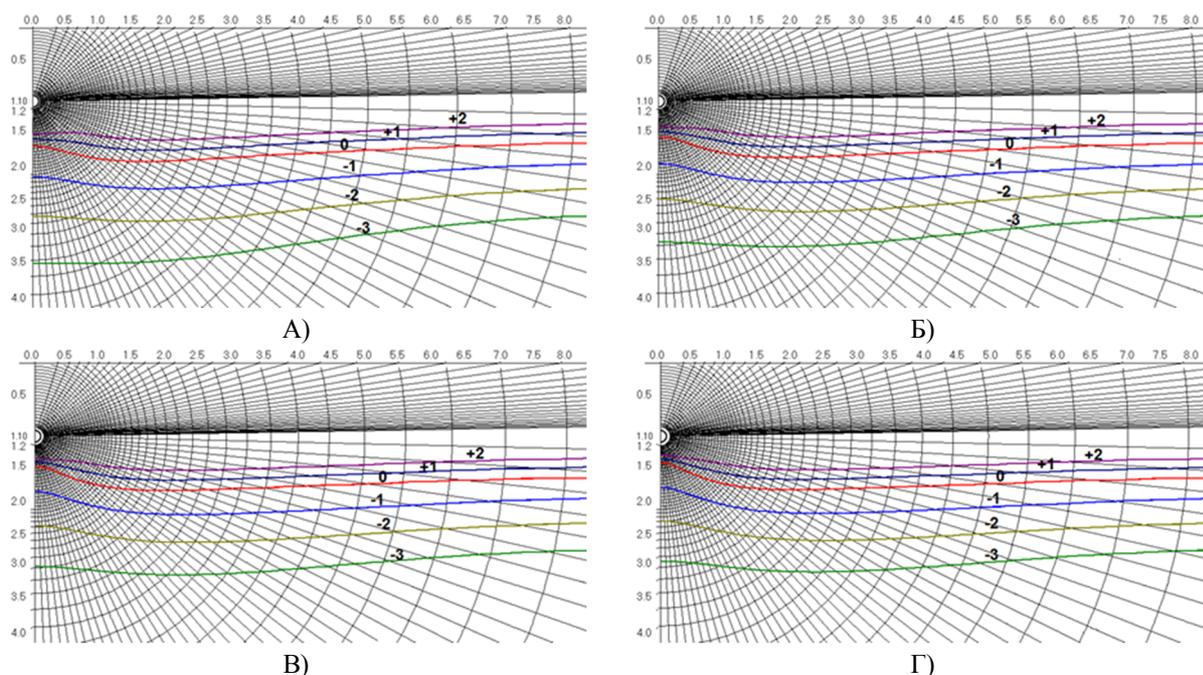


Рис. 5. Изотермы температур вмещающих грунтов трубопровода теплоснабжения к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении 110 см при различных толщинах теплоизоляции  $\delta$ : А–Г соответствуют  $\delta$  рис. 3

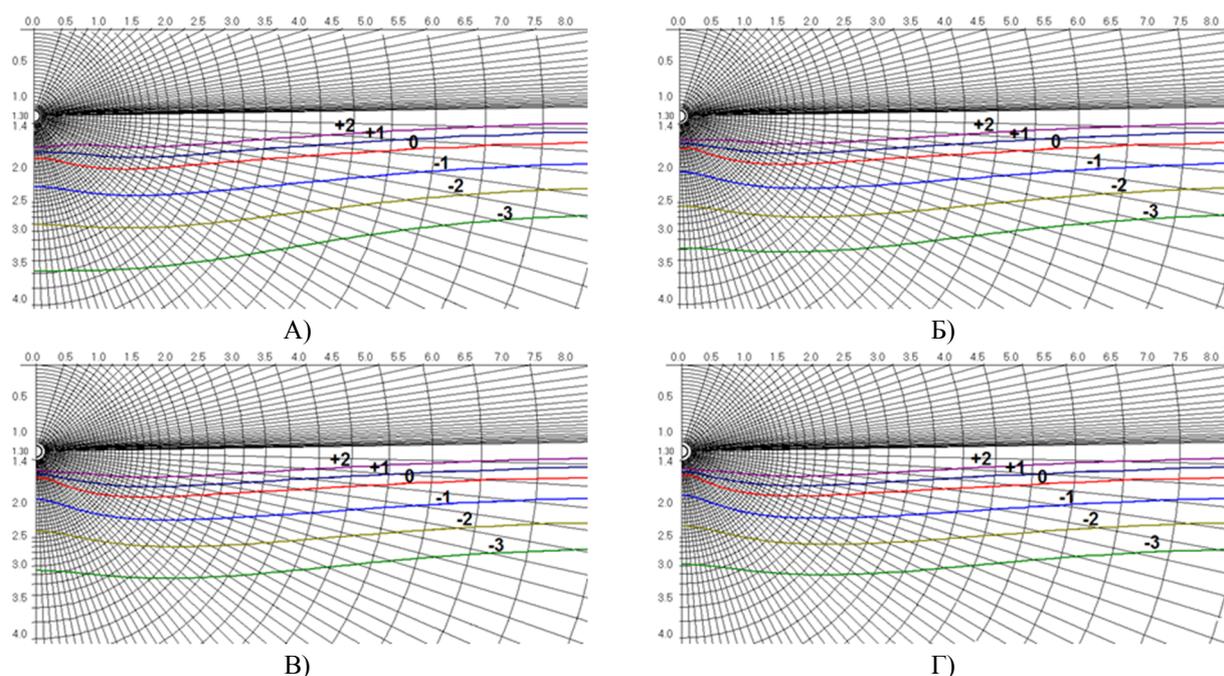


Рис. 6. Изотермы температур вмещающих грунтов трубопровода теплоснабжения к началу отопительного сезона (сентябрь) при заглублении 130 см при различных толщинах теплоизоляции  $\delta$ : А–Г соответствуют  $\delta$  рис. 3

Предлагаемая методика определения параметров подземного трубопровода теплоснабжения (величины заглубления  $H$  и толщины слоя теплоизоляции  $\delta$ ) сводится к минимизации функционала:

$$J[H, \delta, t_s] = [y(0, H, \delta, t_s) - y(l, H, \delta, t_s)]^2, \quad (12)$$

где  $y$  – уравнение в декартовых координатах, описывающее нулевую изотерму, зависящее от абсциссы, величины заглубления, толщины слоя

теплоизоляции;  $t_s$  – время начала отопительного сезона,  $l$  – ширина рассматриваемой области.

Функционал (12), характеризующий меру уклонения ординаты нулевой изотермы на левой границе области от уровня глубины деятельного слоя грунта в момент времени начала отопительного сезона. Минимизация функционала (12) реализуется методом последовательного анализа вариантов.

**Заключение.** Предлагаемая методика определения параметров трубопровода теплоснабжения из условия ежегодного установления нулевой изотермы вмещающего грунта к началу отопительного сезона на уровне границы деятельного слоя грунта, может применяться при проектировании подземных тепловых сетей из полиэтиленовых предизолированных труб в регионах распространения многолетнемерзлых грунтов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. М.: 2004.
2. Половников В.Ю., Хузеев В.А. Численный анализ влияния промерзания грунта в зоне прокладки на тепловые потери бесканальных теплопроводов // Инженерно-строительный журнал. 2013. №2. С. 16–24.
3. 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.
4. Половников В.Ю. Численный анализ влияния нестационарности процессов теплопереноса в зонах размещения подземных теплопроводов на их тепловые режимы и тепловые потери // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 10. С. 76–84.
5. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: «Энергия», 1976. 352 с.
6. Andersland O.B, Ladanyi B. An introduction to frozen ground engineering. Springer Science & Business Media, 2013.
7. Слепцов В.И., Мордовской С.Д., Изаксон В.Ю. Математическое моделирование теплообменных процессов в многолетнемерзлых горных породах. Н.: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1996. 104 с.
8. Вабищевич П.Н., Варламов С.П., Васильев В.И., Васильева М.В., Степанов С.П. Численное моделирование температурного поля многолетнемерзлого грунтового основания железной дороги // Математическое моделирование. 2016. Т.28. №10. С. 110–124.
9. Васильев В.И., Максимов А.М., Петров Е.Е., Цыпкин Г.Г. Тепломассоперенос в промерзающих и протаивающих грунтах. М.: Наука, Физматлит, 1997. 224 с.
10. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // ЖВМ и МФ. 1965. Т.5. №5. С. 816–827.
11. Gornov V.F., Stepanov S.P., Vasilyeva M.V. et al. Mathematical modeling of heat transfer problems in the permafrost // AIP Conference Proceedings. 2014. Vol. 1629. Pp. 424–431.
12. Pavlova N. V., Vabishchevich P. N., Vasilyeva M. V. Mathematical modeling of thermal stabilization of vertical wells on high performance computing systems // International Conference on Large-Scale Scientific Computing / Springer. 2013. Pp. 636–643.
13. Ascher U.M. Numerical methods for evolutionary differential equations. Society for Industrial Mathematics, 2008.
14. Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V., Pavlova N.V. Numerical simulation of thermal stabilization of filter soils // Mathematical Models and Computer Simulations. 2015. Vol. 7, No. 2. Pp. 154–164.
15. 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.
16. Акимов М.П., Захаров П.Е., Матвеева О.И. Численное моделирование динамики температурного поля многолетнемерзлых грунтов при воздействии трубопроводов // Математические заметки СВФУ. 2014. Т. 21. №4. С. 61–70.
17. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Н.: Изд-во СО РАН, 1998. 280 с.
18. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
19. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

#### Информация об авторах

**Акимов Мир Петрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики. E-mail: mir\_akimov@mail.ru. Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Кулаковского, д. 48.

**Мордовской Сергей Денисович**, доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий. E-mail: msd@mail.ru. Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Кулаковского, д. 48.

**Старостин Николай Павлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией климатических испытаний. E-mail: nikstar56@mail.ru. Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 677000, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Автодорожная, д. 20.

Поступила 10.09.2020 г.

©Акимов М.П., Мордовский С.Д., Старостин Н.П., 2020

<sup>1,\*</sup>*Akimov M.P.*, <sup>1</sup>*Mordovskoy S.D.*, <sup>2</sup>*Starostin N.P.*

<sup>1</sup>*North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov,*

<sup>2</sup>*Institute of oil and gas problems of the Siberian branch of the RAS*

*\*E-mail: mir\_akimov@mail.ru*

## ESTIMATION OF THERMAL INSULATION THICKNESS AND DEPTH OF UNDERGROUND POLYETHYLENE HEAT SUPPLY PIPELINES IN REGIONS WITH PERMAFROST

**Abstract.** *The process of thawing and freezing of the host soil of an underground polyethylene heat supply pipeline with thermal insulation, operated in areas of permafrost distribution, is considered. The task is to determine the thickness of the thermal insulation of the pipeline and the size of its depth based on the analysis of the temperature field in the ground during long-term cycle. The temperature field in the "insulated pipe-ground" system, which changes over time, is proposed to be determined by solving the heat conduction equations in polar coordinates. In this case, a bundle of pipes is considered as one pipe of equivalent radius. This approach allows to simplify the interface conditions of the pipe, thermal insulation, polyethylene shell and the host soil, as well as to use a simple numerical method for solving the equation – the finite difference method. The results of calculations of the maximum depth of soil thawing from the depth of the heat supply pipe at different thicknesses of thermal insulation are presented. It is proposed to determine the optimal depth of the underground heat supply pipeline from the condition of annual establishment of the zero isotherm of the host soil at the level of the boundary of the active soil layer by the beginning of the heating season. The possibility of finding a zero isotherm at this level is illustrated by calculations of isotherms by the beginning of the heating season (September) at various depths and thicknesses of thermal insulation. Based on the results of calculations the method of estimation the insulation thickness and depth of the pipeline from the condition of minimizing the functional that characterizes the measure of deviation of the ordinates of the zero isotherm on the left-hand boundary of the region from the depth of the active soil layer at the beginning of the heating season.*

**Keywords:** *heat equation, pipeline, heat supply, permafrost, temperature, finite difference method, thawing depth, thermal insulation thickness.*

### REFERENCES

1. SNiP 41-03-2003. Thermal insulation of equipment and pipelines [Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов]. Moscow: 2004.(rus)
2. Polovnikov V.Y., Khuzeev V.A. Numerical analysis of soil freezing impact on heat losses of pipelines [Численный анализ влияния промерзания грунта в зоне прокладки на тепловые потери бесканальных трубопроводов]. Civil engineering magazine. 2013. No. 2. Pp. 16–24.(rus)
3. Razmazin G.A., Moiseev B.V. Thermal interaction channelless pipeline with permafrost soils [Тепловое взаимодействие бесканальной прокладки трубопроводов с вечномёрзлыми грунтами]. Problems of construction, engineering and urban ecology /proceedings of I international conference. Penza, PDZ. 2000. Pp. 106–110.(rus)
4. Polovnikov V.Yu. Numerical analysis of nonstationary heat transfer influence in the zones of underground thermal pipelines on their thermal regimes and heat losses [Численный анализ влияния нестационарности процессов теплопереноса в зонах размещенных подземных теплопроводов на их тепловые режимы и тепловые потери]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2018. Vol. 329. No. 10. Pp.76–84.(rus)
5. Pekhovich A.I., Zhidkikh V.M. Solid thermal regime calculation [Расчет теплового режима твердых тел]. Leningrad: "Energiya", 1976. 352 p. (rus)
6. Andersland O.B, Ladanyi B. An introduction to frozen ground engineering. Springer Science & Business Media, 2013.
7. Slepsov V.I., Mordovskoy S.D., Izakson V.Y. Mathematical modeling of heat exchange processes in permafrost [Математическое моделирование теплообменных процессов в многолетнемёрзлых горных породах]. Novosibirsk: Science. Siberian publishing company of Academy of Sciences of the USSR. 1996. 104 p.(rus)
8. Vabishchevich P.N., Varlamov S.P., Vasilieva M.V., Vasiliev V.I., Stepanov S.P. Numerical

analysis of temperature dynamics of railway embankment in permafrost [Chislennoe modelirovanie temperaturnogo polya mnogoletnemerzlogo gruntovogo osnovaniya zheleznoj dorogi]. Mathematical Modeling. 2016. Vol. 28, No. 10. Pp. 110–124. (rus)

9. Vasiliev V.I., Maksimov A.M., Petrov E.E., Tsyarkin G.G. Heat and mass transfer in freezing and thawing soils [Teplomassoperenos v promerzayushchih i protaivayushchih gruntah]. Moscow: Nauka, Fizmatlit, 1997. 224 p. (rus)

10. Samarsky A.A., Moiseenko B.D. An efficient shock-capturing schemes for multidimensional the Stefan problem [Ekonomichnaya skhema skvoznogo scheta dlya mnogomernoj zadachi Stefana]. Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. 1965. Vol. 5. No. 5. Pp. 816–827. (rus)

11. Gornov V.F., Stepanov S.P., Vasilyeva M.V. et al. Mathematical modeling of heat transfer problems in the permafrost. AIP Conference Proceedings. 2014. Vol. 1629. Pp. 424–431.

12. Pavlova N.V., Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V. Mathematical modeling of thermal stabilization of vertical wells on high performance computing systems. International Conference on Large-Scale Scientific Computing / Springer. 2013. Pp. 636–643.

13. Ascher U.M. Numerical methods for evolutionary differential equations. Society for Industrial Mathematics, 2008.

14. Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V., Pavlova N.V. Numerical simulation of thermal stabilization of filter soils. Mathematical Models and Computer Simulations. 2015. Vol. 7, No. 2. Pp. 154–164.

15. Akimov M.P., Mordovskoy S.D., Starostin N.P. Numerical algorithm for studying heat supply pipeline impact on permafrost [Chislennyj algoritm dlya issledovaniya vliyaniya beskanal'nogo podzemnogo truboprovoda teplosnabzheniya na vechnomerzlye grunty]. Mathematical notes of YSU, Yakutsk, 2010. Vol. 17. No. 2. Pp. 125–131. (rus)

16. Akimov M.P., Zakharov P.E., Matveeva O.I. The numerical simulation of temperature field permafrost soil under the influence of pipelines [Chislennoe modelirovanie dinamiki temperaturnogo polya mnogoletnemerzlykh gruntov pri vozdeystvii truboprovodov]. Mathematical notes of North-Eastern Federal University. 2014. Vol. 21, No. 4. Pp. 61–70. (rus)

17. Gavriliev R.I. Thermophysical properties of rocks and ground cover in permafrost zone [Teplofizicheskie svoystva gornyh porod i napochvennykh pokrovov kriolitozony]. Novosibirsk: publishing house of SB RAS, 1998. 280 p. (rus)

18. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovsky A.M. et al. Physical quantities: reference book [Fizicheskie velichiny. Spravochnik]. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1232 p. (rus)

19. Kutateladze S.S. Fundamentals of heat exchange theory [Osnovy teorii teploobmena]. Moscow: Atomizdat, 1979. 416 p. (rus)

#### *Information about the authors*

**Akimov, Mir P.** PhD, Associate Professor. E-mail: mir\_akimov@mail.ru. North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, Russia, 677000, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, st. Kulakovskiy, 48.

**Mordovskoy, Sergey D.** DSc, Professor. E-mail: msd@mail.ru. North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, Russia, 677000, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, st. Kulakovskiy, 48.

**Starostin, Nikolay P.** DSc, Professor. E-mail: nikstar56@mail.ru. Institute of oil and gas problems of the Siberian branch of the RAS - a separate division of the Federal state budgetary institution of science of the Federal research center "Yakut scientific center of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences", Russia, 677000, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, str. Avtodorozhnaya, 20.

---

*Received 10.09.2020*

#### **Для цитирования:**

Акимов М.П., Мордовской С.Д., Старостин Н.П. Расчет толщины теплоизоляции и величины заглубления подземных полиэтиленовых трубопроводов теплоснабжения в регионах с многолетнемерзлыми грунтами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 48–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-48-56

#### **For citation:**

Akimov M.P., Mordovskoy S.D., Starostin N.P. Estimation of thermal insulation thickness and depth of underground polyethylene heat supply pipelines in regions with permafrost. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 48–56. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-48-56