

Моделирование динамики температурного поля грунтов вокруг магистральных газопроводов в криолитозоне

А. А. Федотов, П. В. Храпов, Ю. В. Тарасюк

Аннотация – Рассмотрена начально-краевая задача для нестационарного двумерного уравнения теплопроводности в ограниченной области, моделирующая нестационарное распределение температуры грунта в окрестности магистрального газопровода в криолитозоне. Параметры математической модели подобраны в соответствии с экспериментальными данными по транспортировке газа в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Моделирование температурного поля проводится в течение 30 лет с момента начала эксплуатации газовой трубы. Задача решена численно методом конечных элементов с параметрами счета, подобранными в результате методических расчетов. Расчеты начинаются с 1 января первого года эксплуатации газопровода. Для анализа температурного поля вблизи трубы в определенные моменты времени построены графики зависимости температуры вдоль горизонтальной оси на расстоянии 10 см от верхней точки трубы и 10 см от нижней точки трубы. На расстоянии 10 см от крайних правой точки трубы построены зависимости температуры по глубине вдоль вертикальной оси. В качестве моментов времени выбраны моменты, характерные для температурного поля грунта в летние периоды эксплуатации трубы: середины 1-ого, 5-ого, 10-ого, 15-ого, 20-ого и 30-ого годов наблюдения. Показано, что эксплуатация трубы с выбранными параметрами не приводит к появлению в многолетнемерзлом грунте вокруг трубы областей с положительной температурой. Установившийся температурный режим обеспечивает безаварийную эксплуатацию магистрального газопровода.

Ключевые слова – уравнение теплопроводности; температурное поле; метод конечных элементов; магистральный газопровод; многолетнемерзлый грунт; криолитозона.

I. ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование нестационарных температурных полей грунтов в зоне влияния инженерных сооружений рассматривается как один из видов работ геотехнического мониторинга геотехнических систем. Геотехническая система (ГТС): «совокупность природных объектов и технических сооружений, прямо связанных друг с другом, когда функционирование технического объекта сильно зависит от природного и наоборот» [1]. Геотехнический мониторинг (ГТМ): «система комплексного контроля, прогнозирования и управления состоянием ГТС с целью обеспечения их надежности на всех стадиях жизненного цикла» [2].

Организация ГТМ на инженерном объекте может быть эффективной при условии правильного выбора контролируемых параметров состояния сооружения и окружающей природной среды [3],[4]. Динамика температурного режима грунтов – один из основных факторов, определяющих прочность и устойчивость инженерных сооружений в криолитозоне. Вследствие этого составление прогноза изменений температурного режима грунтов является необходимым элементом инженерно-геологического обоснования строительства геотехнических объектов в районах распространения вечномерзлых грунтов [5-8], [15-27].

Ниже рассматривается нестационарное распределение температуры грунта вокруг магистрального газопровода. Моделирование температурного поля проводится в течение 30 лет с момента ввода в эксплуатацию газовой трубы. Параметры математической модели подобраны в соответствии с экспериментальными данными по транспортировке газа в условиях криолитозоны [9,10]. Показано, что за все время наблюдения в окрестности трубы не возникают области с положительной температурой. Такое температурное поле гарантирует безаварийную эксплуатацию магистрального газопровода.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Магистральный газопровод представляет собой инженерное сооружение многокилометровой

Статья получена 29 января, 2020.

А. А. Федотов, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Высшая математика», Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана, 105005, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3383-1188>, e-mail: fedotov_a_a@bmstu.ru.

П. В. Храпов, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Высшая математика», Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана, 105005, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6269-0727>, e-mail: pvkhrapov@gmail.com, khrapov@bmstu.ru.

Ю. В. Тарасюк – Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана, 105005, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1820-4266>, e-mail: tarasyuk@student.bmstu.ru.

протяженности. Поэтому для исследования температурного поля грунта в окрестности газопровода на таком протяженном участке можно рассмотреть одно из сечений трубы, т.е. можно сформулировать задачу в двумерной постановке.

В результате задача ставится как начально-краевая задача для нестационарного двумерного уравнения теплопроводности. Требуется найти распределение температуры в окрестности трубы газопровода. Тепловое состояние такой среды в безразмерной форме записывается следующим образом.

Решение $u(t, x, y)$ уравнения

$$C \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(Fo \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Fo \frac{\partial u}{\partial y} \right) + s \quad (1)$$

требуется найти в ограниченной области D (Рис. 1)

$$D = D_1 \setminus D_2, \quad D_1 = \{-L_x \leq x \leq L_x, -L_y \leq y \leq 0\}, \\ D_2 = \{x^2 + (y + y_c)^2 = R_T^2\}$$

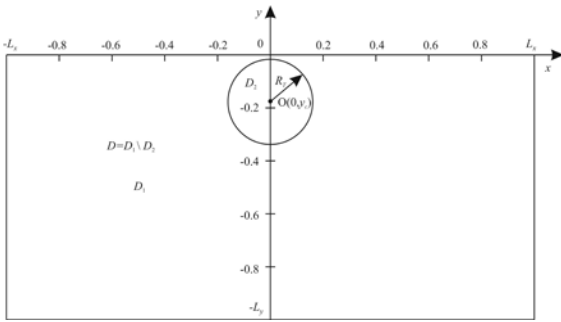


Рис. 1. Расчетная область.

удовлетворяющее начальному условию

$$u(0, x, y) = \varphi(x, y). \quad (2)$$

На верхней границе $y = 0$ происходит конвективный теплообмен со средой, имеющей температуру $\theta(t)$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = Bi(x, 0, t) \cdot [\theta(t) - u(t, x, 0)]. \quad (3)$$

На нижней границе $y = -L_y$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = Ki(x, y, u). \quad (4)$$

Боковые границы области теплоизолированы

$$\frac{\partial u}{\partial x}(t, -L_x, y) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x}(t, L_x, y) = 0. \quad (5)$$

На поверхности трубы радиуса R_T с центром в т. $O(0, y_c)$ поддерживается постоянная температура

$$u(t, x, y) = U_p = const. \quad (6)$$

В (1)-(6):

x, y – декартовы координаты, t – время,

$u(t, x, y)$ – температура среды,

$s = s(x, y, t)$ – мощность внутренних источников тепла,

$C = c\rho$ – объемная теплоёмкость, c – удельная теплоёмкость, ρ – плотность,

Fo – число Фурье, Bi – число Био,

Ki – теплообменное число Кирпичева.

При обезразмеривании за характерные величины приняты:

$L' = \max\{L'_x, L'_y\}$ – максимальное значение

параметров размера расчетной области, Здесь и далее штрихом отмечены размерные величины, когда их необходимо отличать от соответствующих безразмерных величин.

$$L'_x = 20m, \quad L'_y = 20m, \quad L' = 20m,$$

$T' = 8760$ ч – период изменения граничных условий на верхней границе (1 год),

$\theta'_{max} = 25^\circ C$ – максимальное значение температуры в задаче,

$$c'_d = 0,22 \frac{ккал}{кг \cdot ^\circ C} - \text{удельная теплоемкость сухого}$$

грунта,

$$\rho'_d = 1390 \frac{кг}{м^3} - \text{плотность сухого грунта,}$$

За характерную величину можно взять объемную теплоемкость сухого грунта, т.е.

$$C'_d = c'_d \rho'_d = 305,8 \frac{ккал}{м^3 \cdot ^\circ C}.$$

$$\lambda' = 1,55 \frac{ккал}{м \cdot ч \cdot ^\circ C} - \text{коэффициент}$$

теплопроводности.

Основные обозначения, использовавшиеся при переходе к безразмерному виду:

$$x = \frac{x'}{L'}, \quad y = \frac{y'}{L'}, \quad t = \frac{t'}{T'}, \quad u = \frac{u'}{\theta'_{max}}, \quad \theta = \frac{\theta'}{\theta'_{max}},$$

$$C = \frac{C'}{C'_d} = \frac{c' \rho'}{c'_d \rho'_d} = \frac{c'_d \rho'_d}{c'_d \rho'_d} = 1,$$

$$s = \frac{s' T'}{c'_d \rho'_d \theta'_{max}}, \quad s = 0,$$

$$Fo = \frac{\lambda' T'}{c'_d \rho'_d \cdot (L')^2} \approx 0,1110,$$

$$Bi = \frac{h' L'}{\lambda'}, \quad \frac{L'}{\lambda'} \approx 12,9032,$$

$$q'_E = 0,043 \frac{ккал}{м^2 \cdot ч} - \text{постоянный тепловой поток}$$

(поток из недр Земли [11]), $Ki = \frac{L' q'_E}{\lambda' \theta'_{max}} \approx 0,0222,$

$$U'_p = -3.5^\circ\text{C}, U_p = \frac{U'_p}{\theta'_{\max}} = -0.14.$$

В районах распространения многолетнемерзлых грунтов газ транспортируется с температурой -2°C зимой и не выше -5°C летом [3]. -3.5°C – среднее значение указанных температур.

Значения физических и теплофизических характеристик грунта приняты в соответствии с данными работы [10].

Коэффициент теплоотдачи h' записывается в виде

$$h' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha'} + R'}, \quad (7)$$

где α' – коэффициент конвективного теплообмена, R' – термическое сопротивление поверхности грунта [10].

В [10] приводятся средние по месяцам значения температуры окружающей среды θ' , термического сопротивления R' , коэффициента конвективного теплообмена α' . По этим данным составлены аппроксимационные формулы для зависимостей θ и $h = Bi$ (см. формулу (7)) от времени:

$$a_1 = -0.9400 - 9.5782 \cdot \bar{t} + 62.8546 \cdot \bar{t}^2 - 97.4102 \cdot \bar{t}^3 + 46.1034 \cdot \bar{t}^4 - 1.9697 \cdot \bar{t}^5,$$

$$a_2 = \max(-0.94, a_1), \quad \theta(\bar{t}) = \min(0.6, a_1);$$

$$b_1 = 5 - 173 \cdot \bar{t} - 13975 \cdot \bar{t}^2 + 67491 \cdot \bar{t}^3 - 96770 \cdot \bar{t}^4 + 43428 \cdot \bar{t}^5,$$

$$b_2 = \max(5, b_1), \quad Bi(\bar{t}) = \min(170, b_1).$$

Здесь $\bar{t} = [t', T'] / T'$, $[t', T']$ – означает остаток от целочисленного деления первого аргумента на второй.

Начальное условие (2) полагалось равным -0.14 .

Расчеты проводились со следующими значениями геометрических характеристик задачи: радиус трубы $R'_T = 0.71$ м. Это основной радиус труб магистральных газопроводов «Бованенково – Ухта» и «Бованенково – Ухта – 2» [12]. $R_T = 0.0355$. Расстояние от поверхности земли до оси трубы принято равным $(R'_T + 1.0)$ м. [9]. Координаты центра трубы: $(x_c = 0.0, y_c = -0.0855)$. Отношение L_x к радиусу трубы: $L_x / R_T > 28$, т.е. можно считать, что боковые граничные условия (5) не влияют на распределение температуры грунта в окрестности трубы.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Задача решалась численно в пакете MatLab методом конечных элементов [13,14]. В окончательном варианте расчетная сетка содержала 11896 узловых точек и 23424 треугольных конечных элементов.

Расчеты начинаются с 1 января первого года эксплуатации газопровода. Для анализа температурного поля вблизи трубы в определенные моменты времени

строились графики зависимости температуры u вдоль оси x на расстоянии 10 см от верхней точки трубы и 10 см от нижней точки трубы. На расстоянии 10 см от крайней правой точки трубы строились зависимости температуры u вдоль оси y по глубине $z = -y$.

На рис. 2 приведены зависимости $u = u(x)$ на расстоянии 10 см от верхней точки трубы для средин 1-ого, 5-ого, 10-ого, 15-ого и 30-ого годов наблюдения (соответственно кривые 1 – 5).

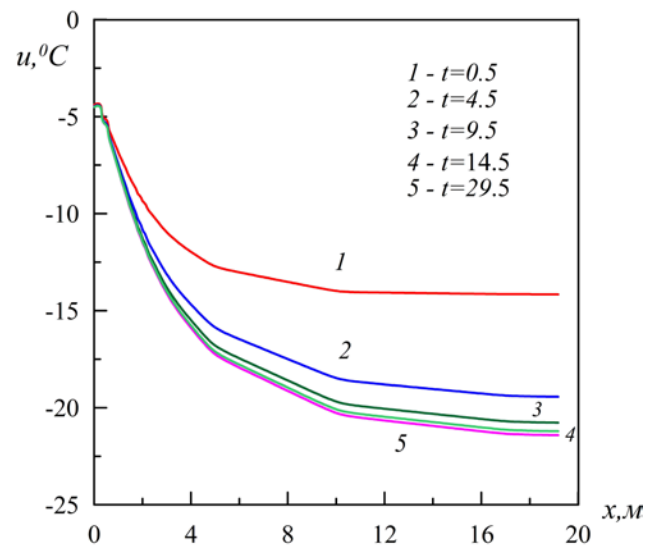


Рис. 2. Распределение температуры вдоль оси x на расстоянии 10 см от верхней точки трубы.

На рис. 3 приведены зависимости $u = u(x)$ на расстоянии 10 см от нижней точки трубы для средин 1-ого, 5-ого, 10-ого, 15-ого и 30-ого годов наблюдения (соответственно кривые 1 – 5).

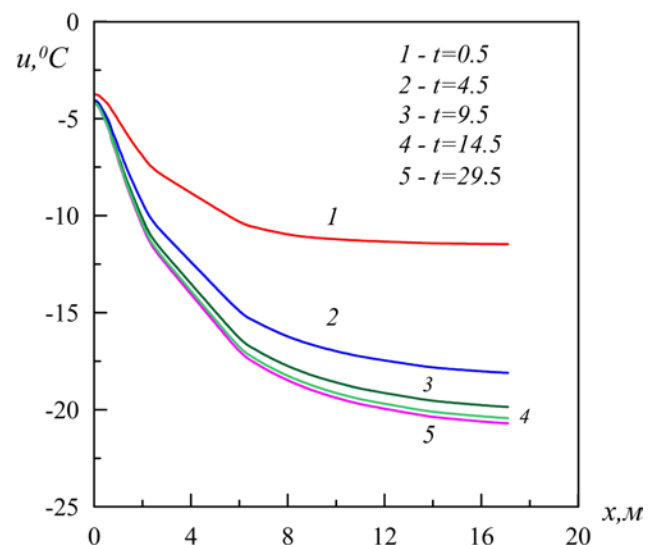


Рис. 3. Распределение температуры вдоль оси x на расстоянии 10 см от нижней точки трубы.

В постановке задачи (1)-(6) ось y является осью симметрии. Поэтому на рис. 2 и 3 приведены кривые для

правой половины расчетной области.

На рис. 4 приведены зависимости $u = u(z)$ на расстоянии 10 см от крайне правой точки трубы для середин 1-ого, 5-ого, 10-ого, 15-ого, 20-ого и 30-ого годов наблюдения (соответственно кривые 1 – 6).

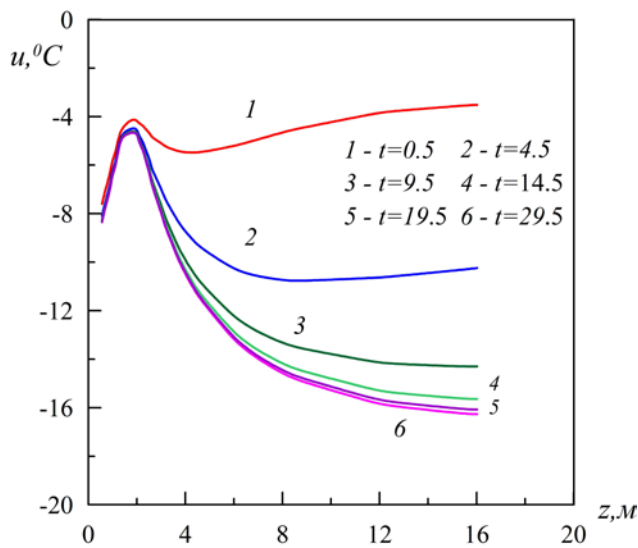


Рис. 4. Распределение температуры по глубине на расстоянии 10 см от крайне правой точки трубы.

На рис. 5 приведено температурное поле $u = u(t, x, y)$ в конце 30-ого года наблюдения.

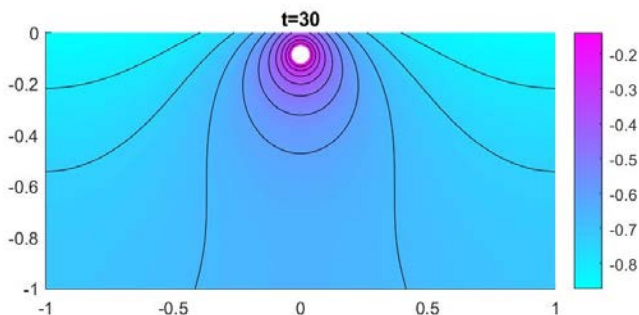


Рис. 5. Распределение температуры в области D при $t = 30$.

Из рис. 2 – 5 видно, что температура грунта вокруг трубы все время остается отрицательной. Следовательно, оттаивания грунта с течением времени не происходит. Из графиков на рис. 2 и 3 и других аналогичных кривых следует, что вдоль оси x через 15 лет практически устанавливается периодический температурный режим, Периодическое распределение температуры по глубине устанавливается через 20 лет с момента начала эксплуатации трубы (рис. 4).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетов показывают, что эксплуатация трубы с выбранными параметрами не приводит к появлению в многолетнемерзлом грунте вокруг трубы областей с положительной температурой. Таким образом, при установившемся температурном режиме обеспечивается надежная безаварийная эксплуатация

магистрального газопровода.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] СТО Газпром 2-3.1-071-2006. Регламент организации работ по геотехническому мониторингу объектов газового комплекса в криолитозоне. – М.: ИРЦ Газпром, 2006. – 26 с.
- [2] СТО Газпром 2-3.1-072-2006. Регламент на проведение геотехнического мониторинга объектов газового комплекса в криолитозоне. – М.: ИРЦ Газпром, 2006. – 62 с.
- [3] Дзюба С.А. Информационно-аналитическая система геотехнического мониторинга и управления магистральным газопроводом «Ямал – Торжок». Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2006. – 22 с.
- [4] Марахтанов В.П., Топчиев А.Г. Технология геотехнического мониторинга магистральных газопроводов на территории криолитозоны Западной Сибири. Успехи современного естествознания. 2016. № 9, с. 131–136.
- [5] Крылов Д. А., Сидняев Н. И., Федотов А. А. Математическое моделирование распределения температурных полей. Математическое моделирование. 2013, том 25. № 7, с. 3–27.
- [6] Крылов Д. А., Федотов А. А. Температурный режим вечномерзлого грунта под зданием со свайным фундаментом. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2013. № 3, с. 106–116.
- [7] 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, том 28, № 10, с. 110–124.
- [8] Васильев В.И., Васильева М.В., Сирдитов И.К., Степанов С.П., Цеева А.Н. Математическое моделирование температурного режима грунтов оснований фундаментов в условиях многолетнемерзлых пород. Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. №1, с. 142–159. doi: 10.18698/1812-3368-2017-1-142-159.
- [9] Хрусталева Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне. М.: Изд-во МГУ, 2005. 542 с.
- [10] РСН 67–87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами. М.: Госстрой РСФСР, 1987. 40 с.
- [11] Короновский Н.В. Общая геология. М.: Изд-во «Книжный дом университет». 2006. 528 с.
- [12] ПАО «Газпром» [электронный ресурс]. URL: <https://www.gazprom.ru/projects/bovanenkovo-ukhta/> (дата обращения: 29.01.2020).
- [13] Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М.: Мир, 1981. 304 с.

- [14] Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л. Численные методы. М.: Физматлит, 2004. 400 с.
- [15] Larry D. Hinzman, Douglas J. Goering, and Douglas L. Kane. A distributed thermal model for calculating soil temperature profiles and depth of thaw in permafrost regions. *Journal of geophysical research*, vol. 103, No. D22, pages 28,975-28,991, November 27, 1998. <https://doi.org/10.1029/98JD01731>
- [16] J. Weismuller¹, U. Wollschlager, J. Boike, X. Pan, Q. Yu, and K. Roth. Modeling the thermal dynamics of the active layer at two contrasting permafrost sites on Svalbard and on the Tibetan Plateau. *The Cryosphere*, 5, 741–757, 2011. <https://doi.org/10.5194/tc-5-741-2011>
- [17] Sidnyaev N.I., Il'ina Y.S. The Influence of Nonstationary Temperature Fields in a Permafrost Zone on Foundation Basements. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015. V. 52. № 3, pp. 163-170.
- [18] Sun Z, Zhao L, Hu G, et al. Modeling permafrost changes on the Qinghai-Tibetan plateau from 1966 to 2100: A case study from two boreholes along the Qinghai-Tibet engineering corridor. *Permafrost and Periglacial Processes*. <https://doi.org/10.1002/ppp.2022>.
- [19] Gavrilov A, Pavlov V, Fridenberg A, et al. The Current State and 125 Kyr History of Permafrost in the Kara Sea Shelf: Modeling Constraints. *Cryosphere Discussions*. September 2019:1, p1-28. doi:10.5194/tc-2019-112.
- [20] Ponomarev E.I., Ponomareva T.V. The Effect of Postfire Temperature Anomalies on Seasonal Soil Thawing in the Permafrost Zone of Central Siberia Evaluated Using Remote Data. *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. V. 11, is. 4, pp. 420-427.
- [21] Tao Tang, Tao Ma, Xiaoming Huang, Qiuming Xiao, Hao Wang, Guangji Xu. Investigation of Thermal Cooling Effectiveness of RRVCS for Permafrost Protection under Wide Expressway Embankment. *Advances in Civil Engineering*. July 2018:1-11. doi:10.1155/2018/2196459.
- [22] Dhakal S, Gupta I. Predictive Modeling of Thermogenic Methane Hydrate Formation and Geobody Distribution – Results from Numerical Simulations. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. January 2020. doi:10.1016/j.jngse.2020.103154.
- [23] Wu H, Liu J, Zhang X. Feasibility Study on Use of Cellular Concrete for Air Convection Embankment on Permafrost Foundations in Fairbanks, Alaska. *Transportation Geotechnics*. January 2020. doi:10.1016/j.trgeo.2020.100317.
- [24] Maksimenko V.A., Evdokimov V.S. Ground Heat Stabilizer Work Research in Year-round Operation Mode. *Procedia Engineering*. 2015;113:282-286. doi:10.1016/j.proeng.2015.07.266.
- [25] Ma W, Mu Y, Zhang J, Yu W, Zhou Z, Chen T. Lateral thermal influences of roadway and railway embankments in permafrost zones along the Qinghai-Tibet Engineering Corridor. *Transportation Geotechnics*. 2019;21. doi:10.1016/j.trgeo.2019.100285.
- [26] Lei D, Lin H, Chen Y, Cao R, Wen Z. Effect of Cyclic Freezing-Thawing on the Shear Mechanical Characteristics of Nonpersistent Joints. *Advances in Materials Science & Engineering*. November 2019:1-14. doi:10.1155/2019/9867681.
- [27] Li G, Wang F, Ma W, et al. Field observations of cooling performance of thermosyphons on permafrost under the China-Russia Crude Oil Pipeline. *Applied Thermal Engineering*. 141(2018):688-696. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.06.005.

Modeling the dynamics of the temperature field of soils around gas pipelines in the permafrost zone

A.A. Fedotov, P.V. Khrapov, Yu. V. Tarasyuk

Abstract - The initial-boundary-value problem for the non-stationary two-dimensional heat conduction equation in a limited region, modeling the unsteady distribution of soil temperature in the vicinity of the main gas pipeline in the permafrost zone, is considered. The parameters of the mathematical model are selected in accordance with experimental data on the transportation of gas in areas of permafrost distribution. Modeling of the temperature field is carried out for 30 years from the start of operation of the gas pipe. The problem is solved numerically by the finite element method with counting parameters selected as a result of methodological calculations. Settlements begin on January 1 of the first year of operation of the gas pipeline. To analyze the temperature field near the pipe at certain points in time, we plotted the temperature dependence along the horizontal axis at a distance of 10 cm from the top of the pipe and 10 cm from the bottom of the pipe. At a distance of 10 cm from the far right point of the pipe, temperature dependences are plotted in depth along the vertical axis. As moments of time, moments are selected that are characteristic of the temperature field of the soil during the summer periods of pipe operation: the middle of the 1st, 5th, 10th, 15th, 20th, and 30th years of observation. It is shown that the operation of the pipe with the selected parameters does not lead to the appearance of areas with a positive temperature in the permafrost soil around the pipe. The established temperature regime ensures trouble-free operation of the main gas pipeline.

Key words – heat equation; temperature field; finite element method; gas main; permafrost soil; cryolithozone.

REFERENCES

- [1] STO Gazprom 2-3.1-071-2006. The regulation of the organization of work on geotechnical monitoring of gas facilities in the permafrost zone. - M.: IRC Gazprom, 2006. - 26 p.
- [2] STO Gazprom 2-3.1-072-2006. Regulations for conducting geotechnical monitoring of gas facilities in the permafrost zone. - M.: IRC Gazprom, 2006. - 62 p.
- [3] Dzyuba S.A. Information-analytical system of geotechnical monitoring and control of the Yamal-Torzhok gas trunkline. Abstract. dis. ... cand. tech. sciences. - M., 2006. - 22 p.
- [4] Marakhtanov V.P., Topchiev A.G. Technology of geotechnical monitoring of gas pipelines in the

territory of the permafrost zone of Western Siberia. The successes of modern science. 2016. No. 9, p. 131-136.

- [5] Krylov D. A., Sidnyaev N. I., Fedotov A. A. Mathematical modeling of the distribution of temperature fields. *Mathematical modeling*. 2013, Volume 25. No. 7, p. 3–27.
- [6] Krylov D. A., Fedotov A. A. Temperature regime of permafrost soil under a building with a pile foundation. *Bulletin of MSTU. N.E. Bauman. Ser. Natural Sciences*. 2013. No. 3, p. 106–116.
- [7] Vabishchevich P.N., Varlamov S.P., Vasiliev V.I., Vasilieva M.V., Stepanov S.P. Numerical simulation of the temperature field of the permafrost soil base of the railway. *Mathematical modeling*. 2016, Volume 28, No. 10, p. 110–124.
- [8] Vasiliev V.I., Vasilieva M.V., Sirditov I.K., Stepanov S.P., Tseeva A.N. Mathematical modeling of the temperature regime of soils of the foundations of foundations in the conditions of permafrost. *Bulletin of MSTU. N.E. Bauman. Ser. Natural Sciences*. 2017. No. 1, p. 142-159. doi: 10.18698 / 1812-3368-2017-1-142-159.
- [9] Khrustalev L.N. *Fundamentals of geotechnics in cryolithozone*. M.: Publishing House of Moscow State University, 2005, 542 p.
- [10] RSN 67–87. *Engineering surveys for construction. Making a forecast of changes in the temperature regime of permafrost soils by numerical methods*. M.: Gosstroy of the RSFSR, 1987. 40 p.
- [11] Koronovsky N.V. *General geology*. M.: Publishing house “Book House University”. 2006, 528 p.
- [12] PJSC Gazprom [electronic resource]. URL: <https://www.gazprom.ru/projects/bovanenkovo-ukhta/> (date of access: 29.01.2020).
- [13] Norrie D and J de Vries. *An Introduction to Finite Element Analysis*. (Moscow: Mir) , 1981, p. 304 (in Russian).
- [14] Formalev V.F., Reviznikov D.L. *Numerical methods*. M.: Fizmatlit, 2004, 400 p.
- [15] Larry D. Hinzman, Douglas J. Goering, and Douglas L. Kane. A distributed thermal model for calculating soil temperature profiles and depth of thaw in permafrost regions. *Journal of geophysical research*, vol. 103, No. D22, pages 28,975-28,991, November 27, 1998. <https://doi.org/10.1029/98JD01731>

- [16] J. Weismuller¹, U. Wollschlager, J. Boike, X. Pan, Q. Yu, and K. Roth. Modeling the thermal dynamics of the active layer at two contrasting permafrost sites on Svalbard and on the Tibetan Plateau. *The Cryosphere*, 5, 741–757, 2011. <https://doi.org/10.5194/tc-5-741-2011>
- [17] Sidnyaev N.I., Il'ina Y.S. The Influence of Nonstationary Temperature Fields in a Permafrost Zone on Foundation Basements. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015. V. 52. № 3, pp. 163-170.
- [18] Sun Z, Zhao L, Hu G, et al. Modeling permafrost changes on the Qinghai-Tibetan plateau from 1966 to 2100: A case study from two boreholes along the Qinghai-Tibet engineering corridor. *Permafrost and Periglacial Processes*. <https://doi.org/10.1002/ppp.2022>.
- [19] Gavrilov A, Pavlov V, Fridenberg A, et al. The Current State and 125 Kyr History of Permafrost in the Kara Sea Shelf: Modeling Constraints. *Cryosphere Discussions*. September 2019:1, p1-28. doi:10.5194/tc-2019-112.
- [20] Ponomarev E.I., Ponomareva T.V. The Effect of Postfire Temperature Anomalies on Seasonal Soil Thawing in the Permafrost Zone of Central Siberia Evaluated Using Remote Data. *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. V. 11, is. 4, pp. 420-427.
- [21] Tao Tang, Tao Ma, Xiaoming Huang, Qiuming Xiao, Hao Wang, Guangji Xu. Investigation of Thermal Cooling Effectiveness of RRVCs for Permafrost Protection under Wide Expressway Embankment. *Advances in Civil Engineering*. July 2018:1-11. doi:10.1155/2018/2196459.
- [22] Dhakal S, Gupta I. Predictive Modeling of Thermogenic Methane Hydrate Formation and Geobody Distribution – Results from Numerical Simulations. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. January 2020. doi:10.1016/j.jngse.2020.103154.
- [23] Wu H, Liu J, Zhang X. Feasibility Study on Use of Cellular Concrete for Air Convection Embankment on Permafrost Foundations in Fairbanks, Alaska. *Transportation Geotechnics*. January 2020. doi:10.1016/j.trgeo.2020.100317.
- [24] Maksimenko V.A., Evdokimov V.S. Ground Heat Stabilizer Work Research in Year-round Operation Mode. *Procedia Engineering*. 2015;113:282-286. doi:10.1016/j.proeng.2015.07.266.
- [25] Ma W, Mu Y, Zhang J, Yu W, Zhou Z, Chen T. Lateral thermal influences of roadway and railway embankments in permafrost zones along the Qinghai-Tibet Engineering Corridor. *Transportation Geotechnics*. 2019;21. doi:10.1016/j.trgeo.2019.100285.
- [26] Lei D, Lin H, Chen Y, Cao R, Wen Z. Effect of Cyclic Freezing-Thawing on the Shear Mechanical Characteristics of Nonpersistent Joints. *Advances in Materials Science & Engineering*. November 2019:1-14. doi:10.1155/2019/9867681.
- [27] Li G, Wang F, Ma W, et al. Field observations of cooling performance of thermosyphons on permafrost under the China-Russia Crude Oil Pipeline. *Applied Thermal Engineering*. 141(2018):688-696. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.06.005.