

УДК 550.36:620.91
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4531
Шифр специальности: 2.4.6

Растепление многолетнемерзлых пород при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири

В.Ю. Половников[✉], Е.Е. Бульба, С.Д. Шелемехова, Е.В. Любивый

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]polovnikov@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обеспечивается широко известными тезисами об энергетической безопасности и переходе на альтернативные источники энергии, снижении выбросов в окружающую среду и энергосбережении в различных отраслях за счет использования геотермальной энергии. Отдельный интерес представляет исследование тепловых режимов месторождений геотермальных источников энергии, расположенных в зонах распространения многолетнемерзлых пород. Работа геотермальных скважин в многолетнемерзлых породах связана не только с опасностью обвалов приустьевой зоны, но и с разрушением конструкций скважин с выводом их из эксплуатации на длительные промежутки времени. **Цель:** численный анализ процессов теплопереноса в зоне размещения геотермальных скважин с учетом реальных характеристик типичного геологического разреза для прогнозирования растепления многолетнемерзлых пород в Восточной Сибири. **Объект:** типичная конструкция геотермальной скважины, основные элементы которой (колонны, кондуктор и направления) выполнены из цемента. **Методы:** простой итерационный цикл совместно с методами двух «дробных шагов» по схеме расщепления и метода прогонки для решения задачи методом конечных разностей. В узловых точках, принадлежащих к нескольким областям, теплофизические характеристики рассчитывались как среднеарифметические. Адекватность результатов численного анализа подтверждается варьированием сеточных параметров, балансом энергии на границах области расчета и сопоставлением результатов исследований с литературными данными. **Результаты.** Выполнен анализ процессов теплопереноса при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири с учетом изменяющихся по глубине реальных характеристик многолетнемерзлых пород. Выявлено, что радиусы растепления многолетнемерзлых пород для условий Восточной Сибири составляют 12–17 м. Показана целесообразность учета зависимости теплофизических характеристик пород/грунтов в соответствии с параметрами геологического разреза при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов, использующих геотермальную энергию.

Ключевые слова: геотермальная энергия, геотермальная скважина, растепление многолетнемерзлых пород, теплоперенос, математическое моделирование

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-29-00464).

Для цитирования: Растепление многолетнемерзлых пород при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири / В.Ю. Половников, Е.Е. Бульба, С.Д. Шелемехова, Е.В. Любивый // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 30–38. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4531

UDC 550.36:620.91
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4531

Thawing of permafrost rocks when exploiting geothermal wells in Eastern Siberia

V.Yu. Polovnikov[✉], E.E. Bulba, S.D. Shelemekhova, E.V. Lyubiviy

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]polovnikov@tpu.ru

Abstract. Relevance. Ensured by well-known theses about energy security and transition to alternative energy sources, reducing environmental emissions and energy saving in various industries through the use of geothermal energy. The study of the thermal regimes of deposits of geothermal energy sources located in zones of permafrost is of particular interest. The operation of geothermal wells in permafrost is associated not only with the danger of collapses in the wellhead zone, but also with the destruction of well structures with the withdrawal of their operation for long periods of time. **Aim.** Numerical analysis of heat transfer in the area where geothermal wells are located, taking into account the real characteristics of a typical geological section to predict the thawing of permafrost in Eastern Siberia. **Object.** Typical geothermal well design, the main elements of which (columns, conductor and directions) are made of cement. **Methods.** The simple iteration cycle was used in conjunction with the methods of two fractional steps according to the splitting scheme and the sweep method to solve the problem by the finite difference method. At nodal points belonging to several areas, the thermophysical characteristics were calculated as arithmetic averages. The adequacy of the results of the numerical analysis is confirmed by varying the grid parameters, the energy balance at the boundaries of the calculation area, and comparing the research results with literature data. **Results.** The authors have carried out the analysis of heat transfer during the operation of geothermal wells in Eastern Siberia, taking into account the actual characteristics of permafrost rocks that vary with depth. It was revealed that the radii of thawing of permafrost for the conditions of Eastern Siberia are 12–17 meters. The feasibility of taking into account the dependence of the thermophysical characteristics of rocks/soils in accordance with the parameters of the geological section during the design, construction and operation of objects using geothermal energy is shown.

Keywords: geothermal energy, geothermal well, permafrost thawing, heat transfer, mathematical modeling

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-29-00464.

For citation: Polovnikov V.Yu., Bulba E.E., Shelemehova S.D., Lyubivy E.V. Thawing of permafrost rocks when exploiting geothermal wells in Eastern Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 30–38. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4531

Введение

Проведенный в [1] анализ показывает, что проблема загрязнения окружающей среды объективно существует, и мировое сообщество должно осуществлять какие-то действия с целью снижения антропогенной нагрузки. При этом в [1] отмечается, что ни ветрогенераторы, ни солнечные панели в обозримом будущем не смогут внести сколь-нибудь значимый вклад в энергоснабжение. Этот пессимистический прогноз согласуется с [2–4], где для условий различных стран указывается на необходимость масштабного использования альтернативной энергетики с целями, не ограниченными заботой об окружающей среде.

Одним из путей решения этой задачи является устойчиво растущее во всем мире [5–7] использование геотермальных источников тепла. Актуальность использования указанного вида природных ресурсов обеспечивается широко известными тезисами об энергетической безопасности и переходе на альтернативные источники энергии, снижении выбросов в окружающую среду и энергосбережении в различных отраслях за счет использования геотермальной энергии [8–10]. Ярчайшим успешным примером повсеместного использования геотермальной энергии является Исландия [11, 12], где, например, отопление домохозяйств за счет геотермальных ресурсов приближается к 100 %.

По прогнозу [13] к 2025 г. в мире будет производиться около 20 ГВт геотермальной энергии (при этом доля РФ всего 96 МВт). При этом оценки, приведенные в [13], говорят о том, что потенциал геотермального тепла в РФ в 8–12 раз превышает

потенциал всех углеводородов, а сбалансированное развитие рассматриваемого вида природных ресурсов может коренным образом преобразить энергетику страны.

В настоящее время основные тренды в рассматриваемой области сводятся к развитию технологий геотермальных тепловых насосов [14–16], геотермальных электрических станций (традиционных и с использованием бинарных циклов) [17–19] и использованию глубинной энергии недр [20–22].

Отдельный интерес представляет исследование тепловых режимов месторождений геотермальных источников энергии, расположенных в зонах распространения многолетнемерзлых пород. На территории России такими зонами, как правило, являются территории, удаленные от крупных промышленных источников энергоснабжения. Работа геотермальных скважин в многолетнемерзлых породах связана не только с опасностью обвалов приустьевой зоны, но и с разрушением конструкций скважин с выводом их из эксплуатации на длительные промежутки времени.

Цель работы – численный анализ процессов теплопереноса в зоне размещения геотермальных скважин с учетом реальных характеристик типичного геологического разреза для прогнозирования растепления многолетнемерзлых пород в Восточной Сибири.

Постановка задачи

При проведении численного анализа процессов теплопереноса при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири моделировалось теп-

ловое состояние наиболее распространенного в РФ вида нефтяных скважин, основные элементы которого (колонны, кондуктор и направления) выполнены из цемента (рис. 1).

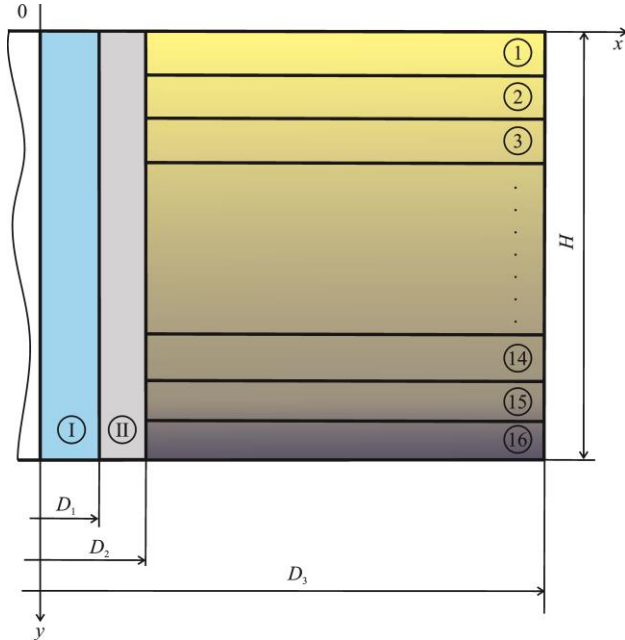


Рис. 1. Схема области решения: I – трубопровод; II – цементные колонны, кондуктор и направления; 1–16 – слои породы/грунта (табл. 1)

Fig. 1. Scheme of the solution area: I – pipeline; II – cement columns, conductor and directions; 1–16 – rock/soil layers (Table 1)

Начальным условием при постановке задачи являлось условие постоянной температуры в рассматриваемой области решения. Такое состояние соответствует отсутствию прокачки энергоносителя по трубопроводу I (рис. 1). Далее по трубопроводу I начинает выходить энергоноситель. Причем температура энергоносителя выше начальной температуры в рассматриваемой области. В этих условиях предполагается, что выход энергоносителя является достаточно интенсивным для установления на внутренней поверхности трубы постоянной температуры, которая равна температуре энергоносителя.

Допущения, при которых решалась рассматриваемая задача, являются широко распространенными [23–30], не требующими специальных пояснений, и сводятся к следующим положениям.

- не учитывается зависимость теплофизических свойств от температуры;
- учитывается только кондуктивный перенос тепла;
- выполняются условия симметрии, идеальной тепловой изоляции и теплового контакта;
- не учитывается термическое сопротивление стенки трубопровода и возможные фазовые переходы.

Математическая модель

Процессы переноса тепла описывались уравнениями теплопроводности в цилиндрической системе координат. Ось симметрии трубопровода I являлась началом координатной системы.

На поверхности D_1 , в соответствии с постановкой задачи, вводилось условие постоянства температуры, а на поверхности D_3 предполагалось, что градиент температур равен нулю. В местах соприкосновения слоев выполнялись условия идеального теплового контакта. На верхней границе рассматриваемой системы (рис. 1) при $y=0$ теплоотвод осуществляется в условиях свободной конвекции, а на нижней границе ($y=H$) тепловой поток равен нулю.

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_i}{\partial x} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right); i = \text{II}, 1-16. \quad (1)$$

$$T_i = T_0 = \text{const}; i = \text{II}, 1-16. \quad (2)$$

$$T = T_1. \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha (T - T_{ex}). \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (6)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial x}; T_i = T_j; i, j = \text{II}, 1-16; i \neq j. \quad (7)$$

Обозначения: c – теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; T – температура, К; τ – время, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); x, y – координаты, м; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); ex – наружный; 0 – начальный момент времени; II, 1–16 – номера областей расчета (рис. 1).

Следует отметить, что задача (1)–(7) описывает достаточно реальные условия эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири при отсутствии в описанных выше допущениях принципиальных ограничений.

Метод решения и исходные данные

Традиционно для решения задач, подобных рассматриваемой в настоящей работе, используется обратный анализ [23, 24] или решение задачи Стефана [25, 26]. Однако достаточно большое количество узлов пространственно-временной сетки, связанное с геометрическими параметрами (размер расчетной области около 50×50 м), и существенная длительность расчета (30 лет) потребо-

вали отказаться от широко распространенных подходов к решению рассматриваемой задачи. Был использован простой итерационный цикл совместно с методами двух «дробных шагов» по схеме расщепления и прогонки для решения задачи методом конечных разностей. В узловых точках, принадлежащих к нескольким областям, теплофизические характеристики рассчитывались как среднеарифметические.

Исследования проводились для типичной скважины, основные элементы которой (колонны, кондуктор и направления) выполнены из цемента. Теплофизические свойства цемента принимались равными следующим значениям: $\lambda=0,99$ Вт/(м·К); $\rho=1830$ кг/м³; $c=1900$ Дж/(кг·К). Геометрические

параметры были равны: $D_1=0,073$ м; $D_2=0,53$ м; $D_3=50$ м, $H=50$ м (рис. 1).

Последовательность залегания пород/грунтов в рассматриваемой области решения (рис. 1) и их теплофизические свойства приняты в соответствии с типичным геологическим разрезом в Восточной Сибири [27] и приведены в табл. 1.

Температура в начальный момент времени принималась равной $T_0=272,7$ К, а на верхней границе области расчета (при $y=0$) – $T_{ex}=273,15$ К. Такие значения T_0 и T_{ex} являются типичными для условий Восточной Сибири [27]. Значение коэффициента теплоотдачи в граничном условии (5) являлось постоянным и было равно $\alpha=20$ Вт/(м²·К), а величина T_1 в условии (3) изменялась от 298,15 до 373,15 К.

Таблица 1. Теплофизические характеристики пород/грунтов по усредненному геологическому разрезу [27]

Table 1. Thermophysical characteristics of rocks/soils according to the averaged geological section [27]

Номер слоя Layer number	Порода/грунт Rock/soil	Глубина залегания, м Depth, m		λ , Вт/(м·К)/W/(m·K)	c , Дж/(кг·К)/J/(kg·K)	ρ , кг/м ³ /kg/m ³
1	Суглинки, техногенный грунт Loams, technogenic soil	0	2,6	1,74	870	2000
2	Суглинок щебенистый, пластично-мерзлый, слабольдистый массивной криотекстуры Crushed loam, plastically frozen, slightly icy, massive cryotexture	2,6	5,0	1,57	1142	2110
3	Щебенистый грунт с суглинистым заполнителем, пластично-мерзлый, слабольдистый, корковой криотекстуры Crushed stone soil with loamy filler, plastically frozen, slightly icy, crusty cryotexture	5,0	15,0	2,33	972	2180
4	Щебенистый грунт с суглинистым заполнителем, пластично-мерзлый, слабольдистый, корковой криогенной текстуры Crushed stone soil with loamy filler, plastically frozen, slightly icy, crusty cryogenic texture	15,0	20,0	1,8	851	2220
5	Щебенистый грунт с включением глыб, твердомерзлый слабольдистый корковой криотекстуры Crushed soil with inclusions of blocks, hard-frozen, slightly icy, crusty cryotexture	20,0	25,0	3,12	995	2270
6	Алеврит низкой прочности, выветрелый, трещиноватый, морозный Siltstone of low strength, weathered, fractured, frosty	25,0	30,0	3,0	892	2130
7	Доломит пониженной прочности, трещиноватый, кавернозный, выветрелый, морозный Dolomite of reduced strength, fractured, cavernous, weathered, frosty	30,0	32,0	1,94	1009	2130
8	Алеврит пониженной прочности, трещиноватый, выветрелый, морозный Siltstone of reduced strength, fractured, weathered, frosty	32,0	35,0	2,35	952	2100
9	Песчаник пониженной прочности, трещиноватый, выветрелый Sandstone of reduced strength, fractured, weathered	35,0	37,0	1,9	915	2130
10	Доломит малопрочный, трещиноватый, кавернозный, выветрелый Low-strength dolomite, fractured, cavernous, weathered	37,0	40,0	1,94	1103	2040
11	Алеврит пониженной прочности, трещиноватый Siltstone of reduced strength, fractured	40,0	42,0	2,35	952	2100
12	Доломит малопрочный, трещиноватый, кавернозный Low-strength dolomite, fractured, cavernous	42,0	44,0	1,82	1071	2040
13	Алеврит низкой прочности, трещиноватый Siltstone of low strength, fractured	44,0	45,0	1,9	892	2130
14	Песчаник пониженной прочности, трещиноватый Sandstone of reduced strength, fractured	45,0	47,0	2,35	915	2130
15	Доломит средней прочности, трещиноватый Medium strength dolomite, fractured	47,0	48,0	1,57	928	2510
16	Алеврит пониженной прочности, трещиноватый Siltstone of reduced strength, fractured	48,0	50,0	1,5	952	2100

Результаты численного моделирования

На рис. 2–5 и в табл. 2 представлены наиболее типичные результаты численного анализа процессов теплопереноса при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири с учетом изменения теплофизических свойств пород/грунтов по глубине.

Моделирование выполнено для тридцатилетнего периода эксплуатации геотермальной скважины как одного из типичных сроков работы рассматриваемого объекта. При этом основное внимание было сконцентрировано на влиянии нестационарности теплопереноса и значений температуры энергоносителя T_1 на интенсификацию процессов переноса тепла.

Адекватность результатов численного анализа подтверждается варьированием сеточных параметров, балансом энергии на границах области расчета и сопоставлением результатов исследований с литературными данными. Сеточные параметры, выбираемые из условий сходимости и устойчивости решений, составляли от 1 до 10 мм для шага по координате и не более 1 с для шага по времени. Отклонение по балансу энергии составляло не более 0,5 %.

Сопоставление результатов исследования с известными работами, например, [27–30], по анализу растепления многолетнемерзлых пород при эксплуатации нефтяных скважин позволяет говорить об их хорошем качественном согласовании. При этом следует отметить, что геометрия области решения в настоящей работе соответствует описан-

ной в [27], а характер изменения температурных полей идентичный.

На рис. 2–5 показаны изотермические линии 273,15 К в рассматриваемой области решения в различные моменты времени в зависимости от температуры энергоносителя T_1 .

Характер изменения координат изотермических линий 273,15 К в рассматриваемой области решения (рис. 2–5) позволяет сделать вывод об их зависимости от теплофизических характеристик пород/грунтов в соответствии с усредненным геологическим разрезом (табл. 1). При этом, как показывают результаты исследования (рис. 2–5), с течением времени и увеличением температуры энергоносителя T_1 радиус растепления ожидаемо возрастает. Этот результат важен в практическом плане: поскольку позволяет обоснованно выбирать схему размещения эксплуатируемых в многолетнемерзлых породах геотермальных скважин. Размещение геотермальных скважин, базирующееся на использовании математической модели (1)–(7), приведет к обоснованному выбору расстояний между соседними скважинами и иными сооружениями.

В табл. 2 сгруппированы результаты численного анализа по максимальному радиусу растепления многолетнемерзлых пород/грунтов в рассматриваемой области решения при различных температурах энергоносителя для тридцатилетнего периода эксплуатации геотермальной скважины.

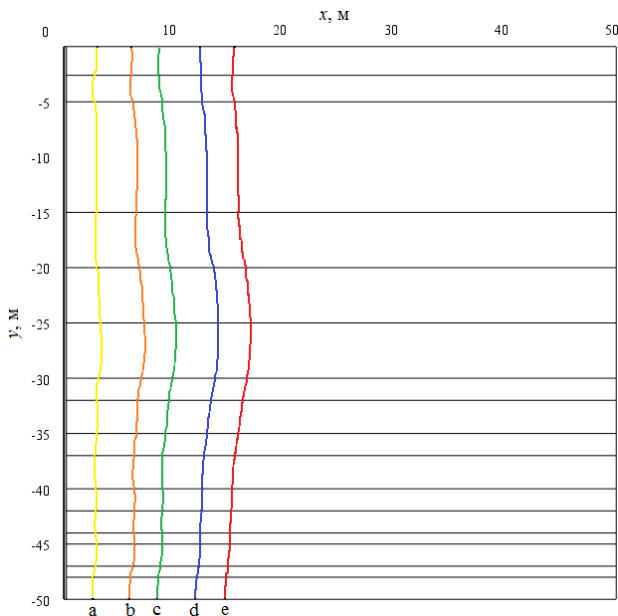


Рис. 2. Изотермические линии 273,15 К в рассматриваемой области решения при $T_1=373,15$ К: а) 1 год; б) 5 лет; в) 10 лет; д) 20 лет; е) 30 лет

Fig. 2. Isothermal lines 273.15 K in the considered region of the solution at $T_1=373.15$ K: a) 1 year; b) 5 years; c) 10 years; d) 20 years; e) 30 years

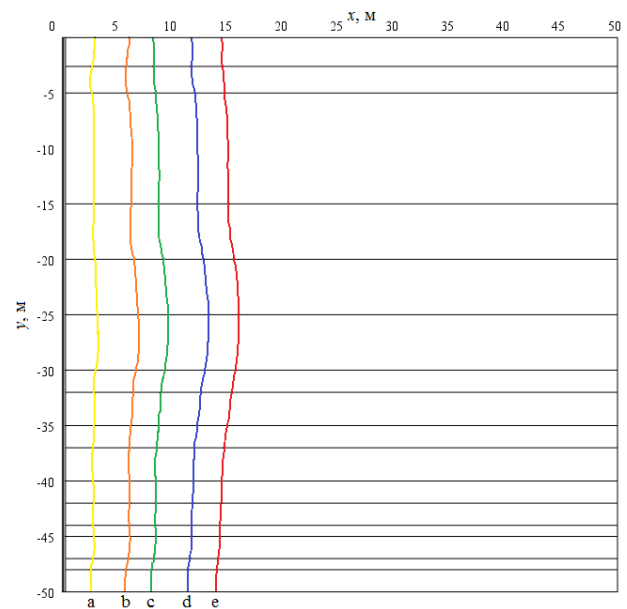


Рис. 3. Изотермические линии 273,15 К в рассматриваемой области решения при $T_1=348,15$ К: а) 1 год; б) 5 лет; в) 10 лет; д) 20 лет; е) 30 лет

Fig. 3. Isothermal lines 273.15 K in the considered region of the solution at $T_1=348.15$ K: a) 1 year; b) 5 years; c) 10 years; d) 20 years; e) 30 years

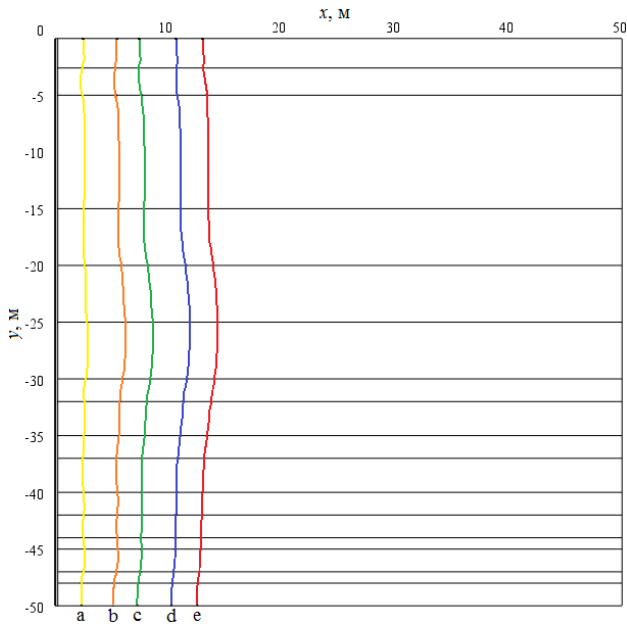


Рис. 4. Изотермические линии 273,15 К в рассматриваемой области решения при $T_1=323,15$ К: а) 1 год; б) 5 лет; в) 10 лет; д) 20 лет; е) 30 лет
Fig. 4. Isothermal lines 273.15 K in the considered region of the solution at $T_1=323.15$ K: a) 1 year; b) 5 years; c) 10 years; d) 20 years; e) 30 years

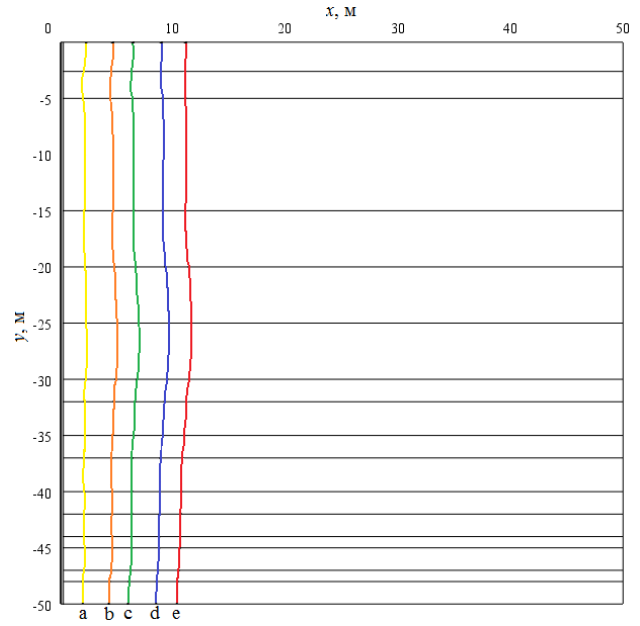


Рис. 5. Изотермические линии 273,15 К в рассматриваемой области решения при $T_1=298,15$ К: а) 1 год; б) 5 лет; в) 10 лет; д) 20 лет; е) 30 лет
Fig. 5. Isothermal lines 273.15 K in the considered region of the solution at $T_1=298.15$ K: a) 1 year; b) 5 years; c) 10 years; d) 20 years; e) 30 years

Таблица 2. Максимальный радиус растепления пород/грунтов

Table 2. Maximum thawing radius of rocks/soils

T_1 , К	373,15	348,15	323,15	298,15
Максимальный радиус растепления, м	16,93	15,89	14,36	11,68
Maximum thawing radius, m	16,93	15,89	14,36	11,68

Радиусы растепления многолетнемерзлых пород (табл. 2) для условий Восточной Сибири являются существенными, составляют 12–17 м и должны учитываться при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов, использующих геотермальную энергию.

Следует отметить, что приведенные (табл. 2) величины радиусов растепления многолетнемерзлых пород являются максимально возможными, поскольку при проведении настоящего исследования не учитывалось снижение температуры энергоносителя при длительной эксплуатации из-за снижения теплового дебита геотермальных скважин.

сителя при длительной эксплуатации из-за снижения теплового дебита геотермальных скважин.

Заключение

Выполнен анализ процессов теплопереноса при эксплуатации геотермальных скважин в Восточной Сибири с учетом изменяющихся по глубине реальных характеристик многолетнемерзлых пород.

Выявлено, что радиусы растепления многолетнемерзлых пород для условий Восточной Сибири составляют 12–17 м.

Показана целесообразность учета зависимости теплофизических характеристик пород/грунтов в соответствии с параметрами геологического разреза при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов, использующих геотермальную энергию, для прогнозирования растепления многолетнемерзлых пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бульба Е.Е., Кузнецов Г.В., Швайбович М.И. Оценка перспектив использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии в ближайшие двадцать лет // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 164–172.
- Solaun K., Cerdá E. Climate change impacts on renewable energy. A review of quantitative projections // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – Vol. 116. – Article 109415.
- Development of renewable energy sources in the European Union in the context of sustainable development policy / P. Bórawski, R. Wyszomierski, A. Beldycka-Bórawska, B. Mickiewicz, B. Kalinowska, J.W. Dunn, T. Rokicki // Energies. – 2022. – № 15. – Article 1545.
- Zahedi R., Zahedi A., Ahmadi A. Strategic study for renewable energy policy, optimizations and sustainability in Iran // Sustainability. – 2022. – Vol. 14 (4). – Article 2418.

5. Lund J.W., Toth A.N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review // *Geothermics*. – 2021. – Vol. 90. – № 101915. – P. 1–31.
6. Геотермальная энергетика России: ресурсная база, электроэнергетика, теплоснабжение (обзор) / В.А. Бугузов, Г.В. Томаров, А.Б. Алхасов, Р.М. Алиев, Г.Б. Бадавов // *Теплоэнергетика*. – 2022. – № 1. – С. 3–17.
7. Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н. Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов // *Георесурсы*. – 2020. – Т. 22. – № 4. – С. 113–122.
8. Dincer I., Acar C. A review on clean energy solutions for better sustainability // *International Journal of Energy Research*. – 2015. – Vol. – 39. – № 5. – P. 585–606.
9. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 39. – P. 748–764.
10. Thorsteinsson H.H., Tester J.W. Barriers and enablers to geothermal district heating system development in the United States // *Energy Policy*. – 2010. – Vol. 38. – № 2. – P. 803–813.
11. Stober I., Bucher K. *Geothermal energy*. 2nd ed. – Cham: Springer International Publ., 2021. – 390 p.
12. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems / M. Soltani, M.F. Kashkooli, A. Dehghani-Sani, A. Kazemi, N. Bordbar, M. Farshchi, M. Elmi, K. Gharali, B.M. Dusseault // *Sustainable cities and society* – 2019. – Vol. 44. – P. 793–818.
13. Hutterer G.W. Geothermal power generation in the world 2015–2020. Update Report, Review // *Proceedings of the World Geothermal Congress 2020+1*. – Reykjavik, Iceland, 2021. – Article 01017.
14. Atam E., Helsen L. Ground-coupled heat pumps: Part 1 – Literature review and research challenges in modeling and optimal control // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 54. – P. 1653–1667.
15. Геотермальный тепловой насос в концепции пассивного дома / В.А. Костенко, Н.М. Гафиятуллина, А.А. Семчук, М.И. Куколев // *Инженерно-строительный журнал*. – 2016. – № 8 (68). – С. 18–25.
16. Моделирование работы тепловых насосов. Проблемы и перспективы / А.В. Толстых, Ю.Н. Дорошенко, В.В. Пенявский, И.О. Халимов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2022. – Т. 24. – № 2. – С. 125–137.
17. Understanding the Chena Hot Springs, Alaska, geothermal system using temperature and pressure data from exploration boreholes / K. Erkan, G. Holdmann, W. Benoit, D. Blackwell // *Geothermics*. – 2008. – Vol. 37. – № 6. – P. 565–585.
18. Томаров Г.В., Шипков А.А. Геотермальная комбинированная бинарная электростанция с системой перегрева пара вторичного вскипания: выбор оптимальных рабочих тел // *Теплоэнергетика*. – 2019. – № 11. – С. 63–71.
19. DiPippo R. Combined and hybrid geothermal power systems // *Geothermal Power Generation*. – 2016. – Vol. 1. – P. 391–420.
20. Hosseinnia S.M., Sorin M. Numerical approach for sizing vertical ground heat exchangers based on constant design load and desired outlet temperature // *Journal of Building Engineering*. – 2022. – № 48. – Article 103932.
21. Li J., Dai C., Lei H. The influence of thermal boundary conditions of wellbore on the heat extraction performance of deep borehole heat exchangers // *Geothermics*. – 2022. – № 100. – Article 102325.
22. Tiwari A.K., Kumar A., Basu P. The influence of thermal interaction on energy harvesting efficiency of geothermal piles in a group // *Applied Thermal Engineering*. – 2022. – № 200. – Article 117673.
23. Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis / G. Russo, A. Corbo, F. Cavuoto, S. Autuori // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2015. – Vol. 50. – P. 226–238.
24. Viggiani G.M.B., De Sanctis L. Geotechnical aspects of underground railway construction in the urban environment: the examples of Rome and Naples // *Geological Society Engineering Geology Special Publication*. – 2009. – Vol. 22. – № 1. – P. 215–240.
25. Myers T.G., Hennessy M.G., Calvo-Schwarzwälder M. The Stefan problem with variable thermophysical properties and phase change temperature // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 149. – Article 118975.
26. Artificial ground freezing: a review of thermal and hydraulic aspects / M.A. Alzoubi, M. Xu, F.P. Hassani, S. Poncet, A. Sasmito // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2020. – Vol. 104. – Article 103534.
27. Половников В.Ю., Цыганкова Ю.С. Радиус растепления многолетнемерзлых пород при эксплуатации нефтяных скважин в Восточной Сибири // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2014. – № 1. – С. 38–43.
28. Полозков К.А., Филиппов В.П., Полозков А.В. Теплоизоляция конструкций скважин и расчет теплопередачи через диафрагмы, соединяющие двустенные теплоизолированные трубы в многолетнемерзлых породах // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2011. – № 8. – С. 9–16.
29. Полозков А.В., Полозков К.А., Гафтуняк П.И. Теплоизоляция конструкций скважин и расчет их теплообмена с многолетнемерзлыми породами // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2011. – № 10. – С. 15–22.
30. Полозков К.А. Выбор расстояний между кустовыми эксплуатационными скважинами в зонах ММП // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2008. – № 3. – С. 21–29.

Информация об авторах

Вячеслав Юрьевич Половников, доктор технических наук, профессор Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. polovnikov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5504-0411>

Елена Евгеньевна Бульба, кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. bulba@tpu.ru

Софья Дмитриевна Шелемехова, аспирант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. shelemehovaaa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9898-8867>

Егор Вадимович Любимый, аспирант Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. evl27@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0009-8908-2041>

Поступила в редакцию: 11.01.2024

Поступила после рецензирования: 22.01.2024

Принята к публикации: 10.04.2024

REFERENCES

1. Bulba E.E., Kuznetsov G.V., Shvaybovich M.I. Assessment of the prospects for using unconventional renewable energy sources in the next twenty years. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 164–172. (In Russ.)
2. Solaun K., Cerdá E. Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, vol. 116, Article 109415.
3. Bórawski P., Wyszomierski R., Beldycka-Bórawska A., Mickiewicz B., Kalinowska B., Dunn J.W., Rokicki T. Development of renewable energy sources in the European Union in the context of sustainable development policy. *Energies*, 2022, vol. 15, Article 1545.
4. Zahedi R., Zahedi A., Ahmadi A. Strategic study for renewable energy policy, optimizations and sustainability in Iran. *Sustainability (Switzerland)*, 2022, vol. 14 (4), Article 2418.
5. Lund J.W., Toth A.N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 2021, vol. 90, no. 101915, pp. 1–31.
6. Butuzov V.A., Tomarov G.V., Alkhasov A.B., Aliev R.M., Badavov G.B. Geothermal energy of Russia: resources, electric power generation, and heat supply (a review). *Thermal Engineering*, 2022, vol. 69 (1), pp. 3–17. (In Russ.)
7. Shulyupin A.N., Varlamova N.N. Current trends in the development of geothermal resources. *Georesursy*, 2020, vol. 22 (4), pp. 113–122. (In Russ.)
8. Dincer I., Acar C. A review on clean energy solutions for better sustainability. *International Journal of Energy Research*, 2015, vol. 39, no. 5, pp. 585–606.
9. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 748–764.
10. Thorsteinsson H.H., Tester J.W. Barriers and enablers to geothermal district heating system development in the United States. *Energy Policy*, 2010, vol. 38, no. 2, pp. 803–813.
11. Stober I., Bucher K. *Geothermal Energy*. 2nd ed. Cham, Springer International Publ., 2021. 390 p.
12. Soltani M., Kashkooli M.F., Dehghani-Saniy A., Kazemi A., Bordbar N., Farshchi M., Elmi M., Gharali K., Dusseault B.M. A comprehensive study of geothermal heating and cooling systems. *Sustainable Cities and Society*, 2019, vol. 44, pp. 793–818.
13. Hutter G.W. Geothermal power generation in the world 2015–2020. Update Report, Review. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2020+1*. Reykjavik, Iceland, 2021. Article 01017.
14. Atam E., Helsen L. Ground-coupled heat pumps: Part 1 – Literature review and research challenges in modeling and optimal control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 54, pp. 1653–1667.
15. Kostenko V.A., Gafiyatullina N.M., Semchuk A.A., Kukolev M.I. Geothermal heat pump in the passive house concept. *Magazine of Civil Engineering*, 2016, no. 8, pp. 18–25. (In Russ.)
16. Tolstykh A.V., Doroshenko Yu.N., Penyavskii V.V., Khalimov I.O. Simulation of heat pump operation. problems and prospects. *Journal of Construction and Architecture*, 2022, vol. 24, no. 2, pp. 125–137. (In Russ.)
17. Erkan K., Holdmann G., Benoit W., Blackwell D. Understanding the Chena Hot Springs, Alaska, geothermal system using temperature and pressure data from exploration boreholes. *Geothermics*, 2008, vol. 37, no. 6, pp. 565–585.
18. Tomarov G.V., Shipkov A.A. Geothermal combined binary power plant with flash steam superheating system: choice of optimal working fluids. *Teploenergetika*, 2019, no. 11, pp. 63–71. (In Russ.)
19. DiPippo R. Combined and hybrid geothermal power systems. *Geothermal Power Generation*, 2016, vol. 1, pp. 391–420.
20. Hosseinnia S.M., Sorin M. Numerical approach for sizing vertical ground heat exchangers based on constant design load and desired outlet temperature. *Journal of Building Engineering*, 2022, no. 48, Article 103932.
21. Li J., Dai C., Lei H. The influence of thermal boundary conditions of wellbore on the heat extraction performance of deep borehole heat exchangers. *Geothermics*, 2022, no. 100, Article 102325.
22. Tiwari A.K., Kumar A., Basu P. The influence of thermal interaction on energy harvesting efficiency of geothermal piles in a group. *Applied Thermal Engineering*, 2022, no. 200, Article 117673.
23. Russo G., Corbo A., Cavuoto F., Autuori S. Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, vol. 50, pp. 226–238.
24. Viggiani G.M.B., De Sanctis L. Geotechnical aspects of underground railway construction in the urban environment: the examples of Rome and Naples. *Geological Society Engineering Geology Special Publication*, 2009, vol. 22, no. 1, pp. 215–240.
25. Myers T.G., Hennessy M.G., Calvo-Schwarzwälder M. The Stefan problem with variable thermophysical properties and phase change temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 149, Article 118975.
26. Alzoubi M.A., Xu M., Hassani F.P., Poncet S., Sasmito A. Artificial ground freezing: a review of thermal and hydraulic aspects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, vol. 104, Article 103534.
27. Polovnikov V.Yu., Tcygankova Yu.S. Radius of permafrost thawing while operating oil wells in the east Siberia. *Stroitelstvo nefitanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2014, no. 1, pp. 38–43. (In Russ.)
28. Polozkov K.A., Philippov V.P., Polozkov A.V. Thermal insulation of a well structure and calculation of heat transfer via diaphragms connecting double-wall thermal-insulated casing pipes in conditions of permafrost. *Stroitelstvo nefitanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2011, no. 8, pp. 9–16. (In Russ.)

29. Polozkov A.V., Polozkov K.A., Gaftuniak P.I. Heat insulation of well structures and calculation of their heat exchange with permafrost rock. *Stroitelstvo nefiannykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2011, no. 10, pp. 15–22. (In Russ.)
30. Polozkov K.A. Selection of distances between cluster production wells in permafrost zones. *Stroitelstvo nefiannykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2008, no. 3, pp. 21–29. (In Russ.)

Information about the authors

Viacheslav Yu. Polovnikov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. polovnikov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5504-0411>

Elena E. Bulba, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. bulba@tpu.ru

Sofia D. Shelemekhova, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. shelemehovaaa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9898-8867>

Egor V. Lyubivy, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. evl27@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0009-8908-2041>

Received: 11.01.2024

Revised: 22.01.2024

Accepted: 10.04.2024