

ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК: 624.139
DOI: 10.15372/KZ20240203
EDN: WSGJQE

ОХЛАЖДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГРУНТОВ ПОД ЗДАНИЯМИ И СООРУЖЕНИЯМИ

Г.В. Аникин*, К.А. Спасенникова

Институт криосферы Земли Тюменский филиал РАН, 625000, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия

*Автор для контакта; e-mail: anikin@ikz.ru

Предложено устройство новой конструкции для температурной стабилизации мерзлых грунтов. Преимуществом предлагаемой системы является возможность установки испарительной части системы под строящиеся и эксплуатируемые объекты, ремонта и замены отдельных труб испарителей без демонтажа всего устройства с сохранением его высокой промораживающей способности. Для оценки эффективности предлагаемой системы разработана аналитическая математическая модель ее функционирования. Проведено моделирование функционирования сезонного охлаждающего устройства для климатических условий арктических городов (Варандей, Салехард, Игарка). Показано, что данным устройством всегда можно заморозить грунт под аварийными зданиями и сооружениями.

Ключевые слова: вечная мерзлота, грунт, сезонное охлаждающее устройство, конденсатор, трубопровод, испаритель.

Ссылка для цитирования: Аникин Г.В., Спасенникова К.А. Охлаждающие устройства, предназначенные для восстановления несущей способности грунтов под зданиями и сооружениями // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 2, с. 24–32. DOI: 10.15372/KZ20240203. EDN: WSGJQE.

COOLING DEVICES DESIGNED TO RESTORE THE LOADING CAPACITY OF SOILS UNDER BUILDINGS AND STRUCTURES

Г.В. Аникин*, К.А. Спасенникова

Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Malygina St. 86, Tyumen, 625000 Russia

*Corresponding author; e-mail: anikin@ikz.ru

A new constructive device for temperature stabilization of frozen soils is suggested. The advantage of the proposed system is the ability to install the evaporative part of the system under construction and operating facilities. The difference from analogs is the ability to repair and replace individual evaporator pipes without dismantling the entire device while maintaining its high freezing capacity. To assess the efficiency of the proposed system, an analytical mathematical model of its functioning has been developed. The modeling of the functioning of the seasonal cooling device for the climatic conditions of the Arctic cities Varandey, Salekhard, and Igarka has been carried out. It is shown that this device can always freeze the soil under emergency buildings and structures.

Keywords: permafrost, soil, seasonal cooling unit, condenser, pipeline, evaporator.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сохраняется тенденция увеличения глубины протаивания вечной мерзлоты. Не последнюю роль в этом процессе играет и циклическое потепление. О потеплении свидетельствуют быстрое уменьшение ледового покрова Арктики, рост толщины сезонноталого слоя криолитозоны, уменьшение продолжительности

затяжения снежного покрова и другие индикаторы [Росгидромет, 2020].

Однако не стоит забывать о тепловых аномалиях городского климата, которые оказывают заметное влияние как на экономику, так и на экологию города [Esau *et al.*, 2019]. В городах тепловые потоки приводят к увеличению глубины сезонно-

го протаивания, что, в свою очередь, создает угрозу объектам инфраструктуры – уменьшается несущая способность фундаментов [Росгидромет, 2008]. Таким образом, встает проблема сохранения грунтов, залегающих в основании зданий и сооружений, в мерзлом состоянии. На данный момент одним из наиболее эффективных средств охлаждения и замораживания грунтов в условиях распространения вечной мерзлоты являются сезонные охлаждающие устройства (СОУ), подробное описание и принцип действия которых приведены в работах [Долгих и др., 2008; Аникин и др., 2011; Аникин, Спасенникова, 2012]. Ранее в публикациях [Долгих и др., 2013, 2014, 2015; Аникин и др., 2017а, б; Горелик, Хабитов, 2019; Горелик и др., 2019] проводилось численное моделирование работы СОУ для оценки эффективности их применения в тех или иных геокриологических условиях с целью выбора наиболее оптимального варианта системы. В настоящей работе представлена новая точка зрения на конструкцию системы температурной стабилизации мерзлых грунтов, запатентованная авторами [Патент RU 197180 U1, 2020]. Главным преимуществом предлагаемой модели СОУ является возможность установки испарителей под строящиеся и эксплуатируемые здания (сооружения) на мерзлых грунтах, а также возможность выполнять ремонт и замену отдельных труб испарителей без демонтажа всего устройства, при сохранении его высокой промораживающей способности. Для оценки эффективности предлагаемой системы разработана аналитическая модель ее функционирования.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСТАНОВКИ

Устройство для температурной стабилизации (рис. 1) представляет собой установленный на вышке конденсатор. Трубопровод подачи теплоносителя выполнен в виде вертикальной трубы, переходящей в горизонтальную, далее наклонный трубопровод отводит теплоноситель. Расположенные в основании сооружения под поверхностью земли испарители присоединены к наклонному трубопроводу. Трубопровод подачи и трубопровод отвода теплоносителя образуют замкнутый через конденсатор контур.

От конденсатора жидкий теплоноситель (двуокись углерода, аммиак или другой хладагент) по трубам подачи поступает в наклонный трубопровод, из которого он стекает в испарители. Забравший тепло хладагент (теплоноситель) в виде пузырьков газа движется вверх под действием силы Архимеда и поступает в трубопровод отвода теплоносителя, далее двухфазная смесь теплоносителя поступает в конденсатор. Газообразный теплоноситель конденсируется в конденсаторе, после чего жидкую фазу хладагента поступает в испарители, в которых происходит его испарение, охлаждающее окружающий его грунт. Цикл многократно повторяется.

Устройство для температурной стабилизации оснований сооружений [Патент RU 197180 U1, 2020] может использоваться при строительстве на вечномерзлых грунтах жилых и промышленных зданий, а также позволяет производить укрепление оснований зданий и сооружений, находящихся в аварийном состоянии.

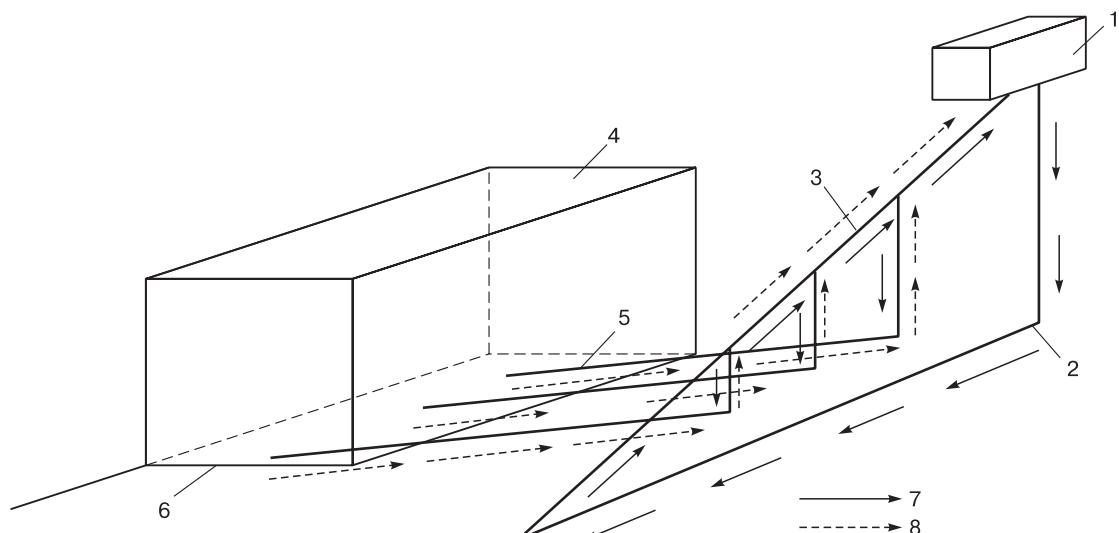


Рис. 1. Общий вид установки, предназначенной для укрепления оснований под действующими сооружениями, построеннымными на вечной мерзлоте.

1 – конденсатор; 2 – трубопровод подачи теплоносителя; 3 – трубопровод отвода теплоносителя; 4 – сооружение; 5 – испаритель; 6 – уровень земли; 7 – поток жидкости; 8 – поток газа.

Для оценки эффективности работы системы рассмотрим разработанную математическую модель.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ

Пусть вокруг трубы с радиусом b и длиной L имеется замороженный грунт, представляющий собой цилиндр радиусом R_0 (рис. 2).

В первом приближении будем считать фронт промерзания неподвижным, тогда температура грунта внутри промерзшего цилиндра дается уравнением

$$\frac{1}{r} \frac{d(rdt(r)/dr)}{dr} = 0, \quad (1)$$

где t – температура, $^{\circ}\text{C}$; r – радиальная координата системы цилиндрических координат (расстояние от центра трубы испарителя до рассматриваемой точки грунта). Решение уравнения (1) записывается в следующем виде:

$$t(r) = C \ln(r) + C_1, \quad (2)$$

где C и C_1 – константы, которые необходимо определить.

Границные условия для рассматриваемой задачи записываются как

$$t(b) = t_{\text{ev}}, \quad t(R_0) = t_{\text{bf}}. \quad (3)$$

Здесь b – радиус трубы испарителя; R_0 – радиус границы промерзания; $t(b)$ – температура при $r = b$; $t(R_0)$ – температура при $r = R_0$; t_{ev} – температура испарителя; t_{bf} – температура фазового перехода. Из выражений (2), (3) получаем

$$t_{\text{bf}} - t_{\text{ev}} = C \ln\left(\frac{R_0}{b}\right) \rightarrow C = \frac{t_{\text{bf}} - t_{\text{ev}}}{\ln(R_0/b)}.$$

Тепловой поток dU , который подводится к элементу испарительной трубы длиной dL , по абсолютной величине равен

$$dU = \lambda \frac{\partial t}{\partial r} 2\pi r dL = 2\pi\lambda \frac{(t_{\text{bf}} - t_{\text{ev}})}{\ln(R_0/b)} dL, \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта. Полная тепловая мощность охлаждающей

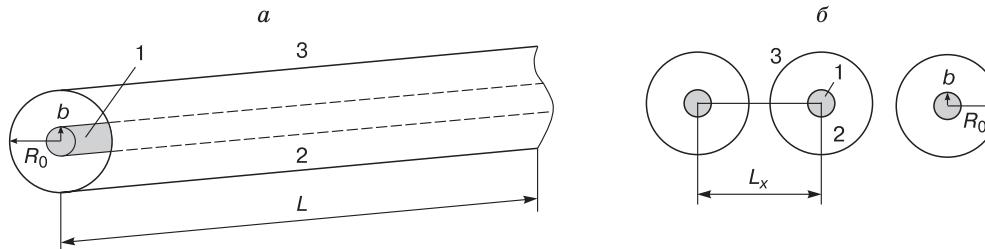


Рис. 2. Вид трубы испарителя сбоку (а) и с торца (б).

1 – испаритель; 2 – замороженный грунт; 3 – незамороженный грунт; L_x – расстояние между трубами испарительной системы.

системы (U_{tot}) лимитируется эффективностью конденсаторной части ($\alpha S \eta$) и равна

$$U_{\text{tot}} = \alpha S \eta (t_{\text{con}} - t_a), \quad (5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи поверхности конденсатора; S – площадь поверхности конденсатора; η – коэффициент эффективности ребер конденсатора; t_{con} – температура конденсатора; t_a – температура атмосферы.

Как следует из работы [Аникин, Спасенникова, 2014], температуры конденсатора и испарителя связаны между собой соотношением

$$t_{\text{ev}} = t_{\text{con}} + \frac{\rho_L g H}{(dP/dt)}, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения; H – высота подъема конденсатора над испарителем; ρ_L – плотность жидкого хладагента; P – давление насыщенных паров хладагента при температуре t . Для H имеем

$$H = H_0 + L \sin \varphi, \quad (7)$$

где H_0 – высота конденсатора над поверхностью грунта; L – расстояние от поверхности грунта до рассматриваемой точки испарителя; φ – угол между трубой испарителя и поверхностью грунта. С учетом (5)–(7) получаем

$$t_{\text{ev}} = t_a + \frac{U_{\text{tot}}}{\alpha S \eta} + \frac{\rho_L g (H_0 + L \sin \varphi)}{dP/dt}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (4), находим

$$dU = 2\pi\lambda \frac{\left(t_{\text{bf}} - t_a - \frac{U_{\text{tot}}}{\alpha S \eta} - \frac{\rho_L g (H_0 + L \sin \varphi)}{dP/dt} \right)}{\ln(R_0/b)} dL.$$

Проводя интегрирование по L , получаем

$$U = \frac{\ln(R_0/b)}{2\pi\lambda} = \\ = \left(t_{\text{bf}} - t_a - \frac{U_{\text{tot}}}{\alpha S \eta} - \frac{\rho_L g H_0}{dP/dt} \right) L_0 - \frac{\rho_L g (L_0^2 \sin \varphi)}{2dP/dt},$$

или, что то же самое:

$$U \frac{\ln(R_0/b)}{2\pi\lambda} = \left(t_{bf} - t_a - \frac{U_{tot}}{\alpha S \eta} - \frac{\rho_L g \bar{H}}{dP/dt} \right) L_0, \quad (9)$$

$$\bar{H} = H_0 + 0.5 L_0 \sin \varphi,$$

где L_0 – длина трубы испарителя (см. рис. 1).

Умножив обе части выражения (9) на число труб испарителя N , получим

$$U_{tot} \frac{\ln(R_0/b)}{2\pi\lambda} = \left(t_{bf} - t_a - \frac{U_{tot}}{\alpha S \eta} - \frac{\rho_L g \bar{H}}{dP/dt} \right) L_{tot}. \quad (10)$$

Здесь учтено, что выполняются соотношения:

$$U_{tot} = UN, L_{tot} = LN.$$

Из выражения (10) находим величину полной тепловой мощности:

$$U_{tot} = \left(t_{bf} - t_a - \frac{\rho_L g \bar{H}}{dP/dt} \right) \left/ \left(\frac{1}{\alpha S \eta} + \frac{\ln(R_0/b)}{2\pi\lambda L_{tot}} \right) \right. \quad (11)$$

Теперь рассмотрим интегральное решение. Количество тепла от фазового перехода, выделяемое грунтом при замерзании цилиндра радиусом R_0 и длиной L_{tot} , записывается в виде

$$Q_{bf} = \sigma \pi R_0^2 L_{tot}, \quad \sigma = \sigma_0 \gamma (w - w_0),$$

где Q_{bf} – теплота фазового перехода, Дж; σ_0 – удельная теплота плавления льда, Дж/кг; γ – плотность скелета породы, кг/м³; w – полная влажность породы; w_0 – влажность за счет незамерзшей воды; σ – теплота замерзания одного кубического метра грунта.

Величина тепла Q_t , которое уходит из системы за счет изменения температуры, имеет вид

$$Q_t = \int_b^{R_0} \left(c_1 (t_0 - t_{bf}) + c_2 (t_{bf} - t(r)) \right) L_{tot} 2\pi r dr. \quad (12)$$

Решение уравнения (1) может быть записано как

$$t(r) = \frac{t_{bf} - t_{ev}}{\ln(R_0/b)} \ln\left(\frac{r}{b}\right) + t_{ev}, \quad (13)$$

где $t(r)$ – температура на расстоянии r от трубы испарителя, °C; c_1 – объемная теплоемкость талого грунта, Дж/(м³·°C); c_2 – объемная теплоемкость мерзлого грунта, Дж/(м³·°C); t_0 – начальная температура грунта, °C.

Подставляя (13) в (12), получим

$$Q_t = \left(c_1 (t_0 - t_{bf}) + c_2 (t_{bf} - t_{ev}) \right) L_{tot} \pi R_0^2 - \\ - c_2 L_{tot} \frac{t_{bf} - t_{ev}}{\ln(R_0/b)} \int_b^{R_0} \ln\left(\frac{r}{b}\right) 2\pi r dr.$$

Таким образом, уравнение баланса энергии запишется в виде

$$\int_0^{\tau} U_{tot}(\tau') d\tau' = Q_t + Q_{bf}, \quad (14)$$

где τ – время, сут.

Дифференцируя обе части уравнения (14) по τ , получаем

$$U_{tot} = \frac{dR_0}{d\tau} \left(\frac{\partial(Q_t + Q_{bf})}{\partial R_0} \right). \quad (15)$$

Решение интеграла, приведенного ниже, можно записать в виде

$$\int_b^{R_0} \ln\left(\frac{r}{b}\right) 2\pi r dr = \\ = 2\pi b^2 \int_1^{\frac{R_0}{b}} x \ln(x) dx = 2\pi b^2 \left(F\left(\frac{R_0}{b}\right) - F(1) \right), \quad (16)$$

где $F(x)$ – функция, которая задается выражением

$$F(x) = \frac{x^2}{2} \ln(x) - \frac{x^2}{4}. \quad (17)$$

Таким образом, правая часть уравнения (15) с учетом выражений (16), (17) запишется в виде

$$\frac{\partial(Q_t + Q_{bf})}{\partial R_0} = 2\pi R_0 L_{tot} \left(\sigma + c_1 (t_0 - t_{bf}) \right) + \\ + c_2 L_{tot} \frac{t_{bf} - t_{ev}}{\left(\ln(R_0/b) \right)^2} \frac{2\pi b^2 \left(F(R_0/b) - F(1) \right)}{R_0}. \quad (18)$$

Заметим, что в выражении (18) можно сделать следующую замену:

$$2\pi b^2 \left(F\left(\frac{R_0}{b}\right) - F(1) \right) = \pi R_0^2 \ln\left(\frac{R_0}{b}\right) - \pi \frac{R_0^2}{2} + \frac{\pi b^2}{2}.$$

Тогда получаем

$$\frac{\partial(Q_t + Q_{bf})}{\partial R_0} = 2\pi R_0 L_{tot} \left(\sigma + c_1 (t_0 - t_{bf}) + \right. \\ \left. + c_2 (t_{bf} - t_{ev}) \frac{\left(\ln(R_0/b) - 0.5 + 0.5 b^2/R_0^2 \right)}{2 \left(\ln(R_0/b) \right)^2} \right). \quad (19)$$

Для оценки корректности полученного решения необходимо доказать сходимость правой части уравнения (19) при $R_0 \rightarrow b$.

Полагая $R_0 = b + x$, находим

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(R_0/b) - 0.5 + 0.5b^2/R_0^2}{2(\ln(R_0/b))^2} =$$

$$= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{x - 0.5x^2 - 0.5 + 0.5(1 - 2x + 6x^2)}{2x^2} = \frac{2.5}{2}.$$

Таким образом, выражение (19) сходится к конечному, положительному значению.

Для упрощения полученных выражений введем функцию $\varphi(x)$:

$$\varphi(x) = \frac{\ln x - 0.5 + 0.5/x^2}{(\ln x)^2}. \quad (20)$$

Тогда из (11), (15), (19) и (20) получаем дифференциальное уравнение

$$\left(t_{\text{bf}} - t_{\text{a}} - \frac{\rho_L g \bar{H}}{dP/dt} \right) \left/ \left(\frac{1}{\alpha S \eta} + \frac{\ln(R_0/b)}{2\pi \lambda L_{\text{tot}}} \right) \right. =$$

$$= \frac{dR_0}{d\tau} 2\pi R_0 L_{\text{tot}} \left(\sigma + c_1(t_0 - t_{\text{bf}}) + c_2(t_{\text{bf}} - t_{\text{ev}}) \varphi \left(\frac{R_0}{b} \right) \right),$$

или, что то же самое:

$$d\tau \left(t_{\text{bf}} - t_{\text{a}} - \frac{\rho_L g \bar{H}}{dP/dt} \right) = dR_0 \frac{2\pi R_0}{\lambda} \left(\frac{\lambda L_{\text{tot}}}{\alpha S \eta} + \frac{\ln(R_0/b)}{2\pi} \right) \times$$

$$\times \left(\sigma' + c_2(t_{\text{bf}} - t_{\text{ev}}) \varphi \left(\frac{R_0}{b} \right) \right). \quad (21)$$

Здесь величина σ' задается соотношением

$$\sigma' = \sigma + c_1(t_0 - t_{\text{bf}}).$$

Таблица 1. Среднемесячные значения температуры воздуха (t_{a}) и скорости ветра (v_{a}) по населенным пунктам

Месяц	Варандей		Салехард		Игарка	
	t_{a} , °C	v_{a} , м/с	t_{a} , °C	v_{a} , м/с	t_{a} , °C	v_{a} , м/с
Январь	-14.7	6.9	-22.9	2.2	-26.1	3.1
Февраль	-18.9	6.3	-19.2	2.2	-18.2	2.6
Март	-13.0	6.2	-12.7	2.8	-14.6	2.9
Апрель	-7.1	5.7	-5.5	3.2	-1.9	3.2
Май	-1.5	5.6	1.1	3.4	3.9	3.4
Июнь	6.1	5.6	11.6	3.5	11.4	3.1
Июль	10.8	5.8	16.0	2.9	15.8	2.8
Август	9.2	6.1	11.5	2.9	11.2	2.8
Сентябрь	6.5	5.7	6.3	2.9	7.1	3.1
Октябрь	1.5	6.9	-2.5	2.7	-4.2	3.3
Ноябрь	-7.8	5.7	-13.4	2.5	-19.2	2.8
Декабрь	-21.3	2.8	-17.6	2.1	-24.4	3.2

Рассмотрим случай, когда выполняется условие

$$c_2(t_{\text{bf}} - t_{\text{ev}}) \varphi \left(\frac{R_0}{b} \right) \ll \sigma', \quad \alpha = \text{const.}$$

Тогда уравнение (21) может быть проинтегрировано в явном виде:

$$\tau \left(t_{\text{bf}} - \bar{t}_{\text{a}}(\tau) - \frac{\rho_L g \bar{H}}{dP/dt} \right) = \frac{\pi (R_0^2 - b^2)}{\lambda} A \sigma' +$$

$$+ \frac{b^2}{\lambda} \left(\left(\frac{R_0^2}{2b^2} \ln \left(\frac{R_0}{b} \right) - \frac{R_0^2}{4b^2} \right) + 0.25 \right) \sigma'. \quad (22)$$

Здесь величины \bar{t}_{a} и A задаются следующими соотношениями:

$$\bar{t}_{\text{a}}(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau t_{\text{a}}(\tau') d\tau', \quad A = \frac{\lambda L_{\text{tot}}}{\alpha S \eta}.$$

Таким образом, получено аналитическое решение, которое можно применить для оценки эффективности функционирования приведенной в работе системы.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Рассмотрим далее замораживание грунтов описанной установкой для различных климатических зон. Для этого были взяты метеорологические параметры, которые получены нами путем осреднения архивных данных [<https://rp5.ru>] метеорологических станций арктических городов Варандей, Салехард и Игарка (табл. 1).

Стоит отметить, что анализ эффективности работы установки будет осуществлен для ряда варьируемых параметров, таких как температура воздуха, скорость ветра, теплопроводность мерзлого грунта, суммарная длина труб испарителя. Конечно, параметров может быть значительно больше, однако были выбраны именно те, которые оказывают наибольшее влияние на эффективность работы системы.

Динамика температуры воздуха и скорости ветра своя для каждого района, для которого будет проведен расчет функционирования предлагаемой системы. Расчет времени действия установки для каждого из них, кроме Варандея, ведется с начала октября – первого месяца с отрицательной температурой. Для Варандея расчет начинается с ноября.

В качестве выходного параметра, который будет оцениваться и по которому будет сделан вывод об эффективности или неэффективности работы системы, выступает радиус замороженного грунта вокруг трубы испарителя. Критерием эффективности работы системы будем считать такой радиус ореола замороженного грунта $R_0(\tau)$, при котором

Таблица 2. Зависимость радиуса промерзания (R_0) от времени (τ) для Салехарда при различной длине испарительной системы (L_{tot}) и коэффициенте теплопроводности мерзлого грунта $\lambda = 2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$

τ , сут	R_0 , м		
	$L_{\text{tot}} = 300$	$L_{\text{tot}} = 1000$	$L_{\text{tot}} = 3000$
0	0.016	0.016	0.016
20	0.232	0.186	0.129
40	0.422	0.347	0.247
60	0.616	0.514	0.372
80	0.790	0.664	0.486
100	0.943	0.797	0.587
120	1.089	0.924	0.684
140	1.199	1.020	0.758
160	1.281	1.092	0.813
180	1.341	1.145	0.853
200	1.369	1.169	0.872

ореолы промораживания от двух параллельно залегающих труб испарителя сомкнутся, т. е. будет выполняться условие

$$R_0(\tau) = \frac{L_x}{2},$$

где L_x – расстояние между трубами испарительной системы (см. рис. 2, б).

При проведении всех расчетов считалось, что $\gamma = 1600 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c_1 = 2.8 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$, $c_2 = 1.8 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$, $w_0 = 0$, $w = 0.2$.

Коэффициент теплоотдачи между конденсатором и атмосферой, согласно [Ройзен, Дулькин, 1977], задается выражением

$$\alpha(t) = 0.105 \frac{\lambda_a(t)}{s} \left(\frac{d}{s} \right)^{-0.54} \left(\frac{h}{s} \right)^{-0.14} \left(\frac{vs}{v_a(t)} \right)^{0.72},$$

где s – расстояние между ребрами конденсатора, м; d – диаметр труб конденсатора, м; h – длина ребра конденсатора, м; $\lambda_a(t)$ – теплопроводность воздуха, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$; $v_a(t)$ – кинематическая вязкость воздуха, $\text{Па} \cdot \text{с}$; v – скорость ветра, $\text{м}/\text{с}$.

Для представленной в работе установки характеристики конденсатора имеют следующие значения: $d = 32 \text{ мм}$, $s = 7 \text{ мм}$, $h = 34 \text{ мм}$. Вязкость и теплопроводность воздуха зависят от температуры атмосферы и задаются согласно справочным данным [Бабичев и др., 1991].

Решая уравнение (22) для метеорологических параметров Салехарда, получаем распределения радиуса замораживания грунта в зависимости от времени, приведенные в табл. 2.

Решая уравнение (22) для метеорологических параметров Варандея, получаем распределения радиуса замораживания грунта в зависимости от времени из табл. 3.

Таблица 3. Зависимость радиуса промерзания (R_0) от времени (τ) для Варандея при различной длине испарительной системы (L_{tot}) и коэффициенте теплопроводности мерзлого грунта $\lambda = 2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$

τ , сут	R_0 , мм		
	$L_{\text{tot}} = 300$	$L_{\text{tot}} = 1000$	$L_{\text{tot}} = 3000$
0	0.016	0.016	0.016
20	0.199	0.172	0.130
40	0.354	0.312	0.243
60	0.511	0.456	0.360
80	0.660	0.592	0.472
100	0.791	0.713	0.573
120	0.918	0.830	0.670
140	1.050	0.952	0.772
160	1.153	1.047	0.852
180	1.227	1.116	0.910
200	1.271	1.157	0.944

Решая уравнение (22) для метеорологических параметров Игарки, получаем распределения радиуса замораживания грунта в зависимости от времени, приведенные в табл. 4.

Для лучшего представления данных на рис. 3 дано сравнение аналитического решения (22) с точным дифференциальным решением (21) для трех арктических городов.

Таким образом, на рис. 3, а–в видно, что аналитическое решение (22) отличается менее чем на 7 % от точного дифференциального решения (21) и его можно применять для оценки эффективности функционирования систем температурной стабилизации мерзлых грунтов.

Согласно полученным данным, если расстояние между трубами испарительной системы составляет 1 м, то весь грунт замерзнет за 100 дней,

Таблица 4. Зависимость радиуса промерзания (R_0) от времени (τ) для Игарки при различной длине испарительной системы (L_{tot}) и коэффициенте теплопроводности мерзлого грунта $\lambda = 2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$

τ , сут	R_0 , м		
	$L_{\text{tot}} = 300$	$L_{\text{tot}} = 1000$	$L_{\text{tot}} = 3000$
0	0.016	0.016	0.016
20	0.294	0.243	0.173
40	0.515	0.434	0.318
60	0.740	0.631	0.469
80	0.939	0.806	0.604
100	1.102	0.950	0.716
120	1.245	1.077	0.816
140	1.340	1.161	0.882
160	1.415	1.228	0.934
180	1.478	1.283	0.978
200	1.491	1.295	0.987

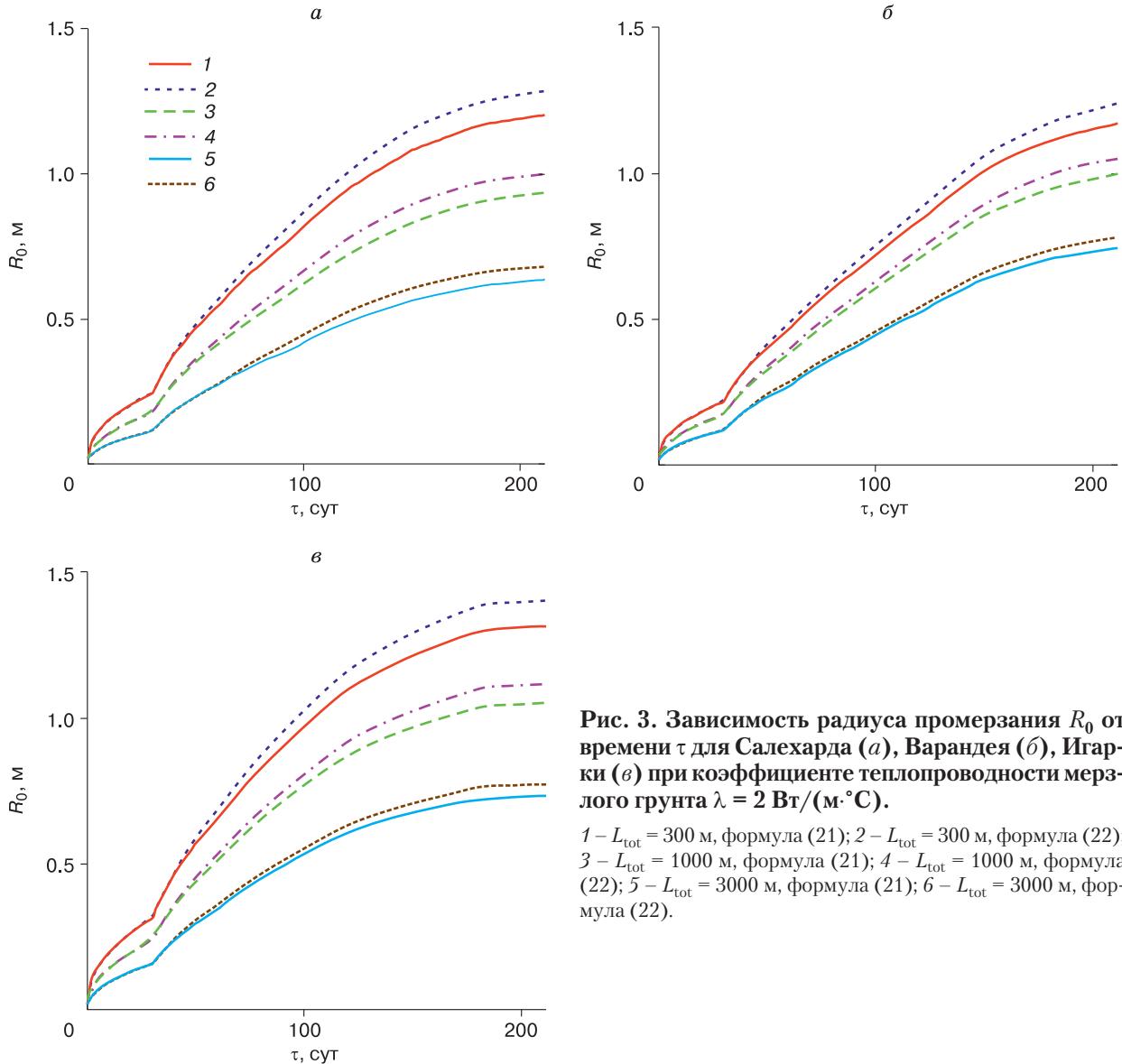


Рис. 3. Зависимость радиуса промерзания R_0 от времени τ для Салехарда (a), Варандея (b), Игарки (c) при коэффициенте теплопроводности мерзлого грунта $\lambda = 2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$.

1 – $L_{tot} = 300 \text{ м}$, формула (21); 2 – $L_{tot} = 300 \text{ м}$, формула (22); 3 – $L_{tot} = 1000 \text{ м}$, формула (21); 4 – $L_{tot} = 1000 \text{ м}$, формула (22); 5 – $L_{tot} = 3000 \text{ м}$, формула (21); 6 – $L_{tot} = 3000 \text{ м}$, формула (22).

т. е. за половину времени зимнего сезона, поскольку радиус промерзания будет за это время, как правило, больше 0.5 м.

Для оценки практической значимости рассмотрим объем замороженного грунта при расстоянии между трубами испарительной системы 1 м:

$$V_{\text{tot}} = \pi R_0^2 L_0 N = \pi R_0^2 L_{\text{tot}}.$$

Таким образом, при площади оребрения конденсаторной части 100 м^2 , за 100 суток работы предлагаемой системы температурной стабилизации грунтов с общей длиной испарительной части 3000 м для Салехарда $R_0 = 0.587 \text{ м}$, $V_{\text{tot}} = 3246 \text{ м}^3$, для Варандея $R_0 = 0.573 \text{ м}$, $V_{\text{tot}} = 3093 \text{ м}^3$, для Игарки $R_0 = 0.716 \text{ м}$, $V_{\text{tot}} = 4829 \text{ м}^3$.

ВЫВОДЫ

1. В работе представлено новое с точки зрения конструкции устройство для температурной стабилизации мерзлых грунтов, ключевым преимуществом которой является возможность установки испарительной части системы под строящиеся и эксплуатируемые объекты.

2. Преимуществом данной системы является возможность выполнения ремонта и замены отдельных труб испарителей без демонтажа всего устройства с сохранением его высокой промораживающей способности.

3. Приведена аналитическая математическая модель функционирования описанной системы. Выполнена оценка эффективности предлагаемой системы путем моделирования функционирова-

ния сезонного охлаждающего устройства различной конструкции для климатических условий арктических городов – Варандей, Салехард, Игарка.

4. Показано, что с помощью установки предлагаемой системы всегда можно заморозить большую площадь грунта под аварийными зданиями и сооружениями.

Благодарности. Работа выполнена в Институте криосфера Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0007).

Литература

Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А. Компьютерное моделирование тепломассопереноса в системах горизонтального охлаждения грунтов // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 1, с. 33–39.

Аникин Г.В., Спасенникова К.А. Компьютерное моделирование системы охлаждения грунта под резервуаром с нефтью // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 2, с. 60–64.

Аникин Г.В., Спасенникова К.А. О выборе хладагента для сезонных охлаждающих устройств типа “GET” // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 31–33.

Аникин Г.В., Спасенникова К.А., Ишков А.А., Плотников С.Н. Усовершенствование метода стохастического прогнозирования работы горизонтальной естественно-действующей трубчатой системы // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2017а, № 6, с. 30–34.

Аникин Г.В., Спасенникова К.А., Плотников С.Н., Ишков А.А. Метод стохастического прогнозирования нахождения температуры грунтов с помощью систем “GET” // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2017б, № 1, с. 35–40.

Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. Физические величины. Справочник / Ред. И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов. М., Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.

Горелик Я.Б., Романюк С.Н., Хабитов А.Х. Учет совместного теплового действия скважин в кусте при расчете параметров области протаивания мерзлых грунтов // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 2, с. 79–87.

Горелик Я.Б., Хабитов А.Х. Об эффективности применения термостабилизаторов при строительстве на многолетнемерзлых грунтах // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2019, т. 5, № 3, с. 25–46.

Долгих Г.М., Аникин Г.В., Рило И.П., Спасенникова К.А. Статистическое моделирование работы системы “GET”, установленной в основании нефтяного резервуара // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 1, с. 70–77.

Долгих Г.М., Окунев С.Н., Аникин Г.В., Спасенникова К.А. Численный расчет нестационарных температурных полей в системе “резервуар с нефтью – сезонное охлаждающее устройство” // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 3, с. 70–75.

Долгих Г.М., Окунев С.Н., Аникин Г.В., Спасенникова К.А., Залесский К.В. Сравнение экспериментальных данных и численного моделирования работы охлаждающей системы “GET” на примере пожарного депо Банкорского месторождения // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 1, с. 65–69.

Долгих Г.М., Окунев С.Н., Поденко Л.С., Феклистов В.Н. Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений // Материалы Междунар. конф. “Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения”. Тюмень, ООО НПО “ФСА”, 2008, с. 34–39.

Патент RU 197180 U1. Российская Федерация: МПК E02D 3/115 (2006.01). Устройство для температурной стабилизации оснований сооружений / Аникин Г.В., Мельников В.П., Андрианов И.Е., Спасенникова К.А.; патентообладатели Аникин Г.В., Мельников В.П., Андрианов И.Е., Спасенникова К.А.; № 2019136458; заявл. 12.11.2019; опубл. 08.04.2020, Бюл. № 10.

Ройзен Л.И. Тепловой расчет обработанных поверхностей / Л.И. Ройзен, И.Н. Дулькин. М., Энергия, 1977, 244 с.

Росгидромет, 2008: Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Ред. А.И. Бедрицкий и др. М., Росгидромет, 2008, т. 1, 230 с.; т. 2, 291 с.

Росгидромет, 2020: Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. М., Росгидромет, 2020, 97 с.

Esau I., Miles V., Varentsov M., Konstantinov P., Melnikov V. Spatial structure and temporal variability of a surface urban heat island in cold continental climate // Theor. Appl. Climatol., 2019, vol. 137, p. 2513–2528.

URL: https://rp5.ru/Погода_в_мире (дата обращения: 28.09.2020).

References

Anikin G.V., Plotnikov S.N., Spasennikova K.A. Computer simulation of heat-mass exchange in the systems of horizontal ground cooling. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2011, vol. XV, No. 1, p. 33–39 (in Russian).

Anikin G.V., Spasennikova K.A. Computer modelling of the ground cooling system under the oil reservoir. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2012, vol. XVI, No. 2, p. 60–64 (in Russian).

Anikin G.V., Spasennikova K.A., Plotnikov S.N., Ishkov A.A. Improving the stochastic forecasting method of a naturally-acting horizontal tubular system. Soil Mech. Foundat. Eng., 2018, vol. 54, No. 6, p. 414–419.

Anikin G.V., Spasennikova K.A., Plotnikov S.N., Ishkov A.A. Method of stochastic prediction of soil temperatures with GET systems. Soil Mech. Foundat. Eng., 2017, vol. 54, No. 1, p. 65–70.

Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovsky A.M. Fizicheskie velichiny [Physical quantities]. Handbook. I.S. Grigoriev, E.Z. Meilikhov (eds.). Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 p. (in Russian).

Gorelik J.B., Romanyuk S.N., Khabitov A.K. Constraining thaw boundary around multiple wells with regard to their joint thermal effect. Earth's Cryosphere, 2019, vol. XXIII, No. 2, p. 67–73.

Gorelik J.B., Khabitov A.K. On the efficiency of adapting the thermostabilizers for building activity in permafrost. Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovaniye. Neft', gaz, energetika [Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, gas, energy], 2019, vol. 5, No. 3, p. 25–46 (in Russian).

Dolgikh G.M., Anikin G.V., Rilo I.P., Spasennikova K.A. Statistical modelling of “GET” system installed at the base of oil reservoir. Earth's Cryosphere, 2015, vol. XIX, No. 1, p. 61–68.

Dolgikh G.M., Okunev S.N., Anikin G.V., Spasennikova K.A. Numerical calculation of unsteady temperature fields system “oil tank – seasonal cooling device”. *Kriosfera Zemli* [Earth’s Cryosphere], 2013, vol. XVII, No. 3, p. 70–75 (in Russian).

Dolgikh G.M., Okunev S.N., Anikin G.V., Spasennikova K.A., Zalesskiy K.V. Comparison of experimental data and numerical modelling data of the work of “GET” cooling system on the example of fire depot of the Vankorsky field. *Kriosfera Zemli* [Earth’s Cryosphere], 2014, vol. XVIII, No. 1, p. 65–70 (in Russian).

Dolgikh G.M., Okunev S.N., Podenko L.S., Feklistov V.N. Reliability, efficiency and controllability of system temperature stabilization of permafrost soils of the foundations of buildings and structures. In: *Resources of Polar and Highland Areas. State and Prospects of Geocryology: Proc. Int. Conf. Tyumen, OOO NPO FSA*, 2008, p. 34–39 (in Russian).

Patent RU 197180 U1. Ustrojstvo dlya temperaturnoj stabilizacii osnovaniy sooruzhenij [A device for temperature stabilization of the foundations of structures]. Anikin G.V., Melnikov V.P., Andrianov I.E., Spasennikova K.A. Russian Fed-

eration: MPK E02D 3/115 (2006.01). Patent Holders Anikin G.V., Melnikov V.P., Andrianov I.E., Spasennikova K.A.; No. 2019136458. Claimed 12.11.2019. Published 08.04.2020, Bull. No. 10 (in Russian).

Rojzen L.I., Dul’kin I.N. *Teplovoye raschet orebrennyh povерхностей* [Thermal design of ribbed surfaces]. Moscow, Energiya, 1977, 244 p. (in Russian).

Roshydromet, 2008: Assessment report on climate changes and their consequences on the territory of the Russian Federation. A.I. Bedritskiy et al. (eds.). Moscow, Rosgidromet, 2008, vol. 1, 230 p.; vol. 2, 291 p. (in Russian).

Roshydromet, 2020: Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2019. Moscow, Rosgidromet, 2020, 97 p. (in Russian).

Esau I., Miles V., Varentsov M., Konstantinov P., Melnikov V. Spatial structure and temporal variability of a surface urban heat island in cold continental climate. *Theor. Appl. Climatol.*, 2019, vol. 137, p. 2513–2528.

URL: https://rp5.ru/Pogoda_v_mire (last visited: 28.09.2020).

Поступила в редакцию 27 декабря 2021 г.,
после доработки – 12 января 2024 г.,
принята к публикации 17 января 2024 г.