КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 4, с. 37–44 **https://www.sibran.ru**

ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 624.139 DOI: 10.15372/KZ20230404

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЛУБИННЫХ СЕЗОННЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Г.В. Аникин[1], А.А. Ишков[2,3,*]

[1]*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия*
[2]*Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия*
[3]*ООО "ПетроТрейс", 115114, Москва, ул. Летниковская, 10, стр. 4, Россия*

**Автор для контакта, a.a.ishkov@yandex.ru*

Предлагается аналитическое решение задачи функционирования глубинных сезонных охлаждающих устройств в предположении о квазистационарном режиме замораживания грунта испарителем системы. Рассмотрен случай применения предложенного решения для одной из конструктивных конфигураций глубинного сезонного охлаждающего устройства на талых грунтах с разной теплопроводностью при метеорологических условиях г. Салехарда. Получены зависимости радиуса промерзания грунта вокруг трубы испарителя от глубины для разных интервалов времени работы системы. Возможно применение аналитической модели на этапе проектирования для оценки и оптимизации конструкции рассматриваемой системы термостабилизации в тех или иных геокриологических зонах для разных теплофизических характеристик грунтов с учетом агрегатного состояния воды в них.

Ключевые слова: *вечная мерзлота, грунт, тепломассоперенос, глубинное сезонное охлаждающее устройство, моделирование.*

***Ссылка для цитирования*:** Аникин Г.В., Ишков А.А. Аналитическое решение задачи функционирования глубинных сезонных охлаждающих устройств для оценки их эффективности // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 4, с. 37–44. DOI: 10.15372/KZ20230404.

ANALYTICAL SOLUTION OF THE PROBLEM OF OPERATION OF DEEP SEASONAL COOLING DEVICES TO ASSESS THEIR EFFICIENCY

G.V. Anikin[1], A.A. Ishkov[2,3,*]

[1]*Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Malygina St. 86, Tyumen, 625026 Russia*
[2]*Tyumen Industrial University, Volodarskogo St. 38, Tyumen, 625000 Russia*
[3]*LLC "PetroTrace", Letnikovskaya St. 10, bldg 4, Moscow, 115114 Russia*

**Corresponding author, a.a.ishkov@yandex.ru*

The article offers an analytical solution to the problem of operation of deep seasonal cooling devices (deep SCD) based on the assumption of quasi-stationary regime of soil freezing by the system evaporator. The case of application of the proposed solution for one of the design configurations of a deep SCD on thawed soils with different thermal conductivity under the weather conditions of Salekhard city is considered. We obtained the values of the radius of soil freezing around the evaporator tube as a function of depth at different time intervals of system operation. The present analytical model can be easily applied at the design stage to evaluate and optimize the design of the applied thermal stabilization system in particular geocryological zones for different thermophysical characteristics of soils, taking into account the aggregate state of water in them.

Keywords: *permafrost, soil, heat and mass transfer, deep seasonal cooling device, modeling.*

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия активно проводится разработка нефтяных и газовых месторождений, расположенных в северных широтах России. Данный регион характеризуется преобладанием многолетнемерзлых грунтов (ММГ), что создает определенные трудности при строительстве инфраструктуры на таких территориях. Нарушение температурного режима ММГ может привести к растеплению грунтов, их просадке, нарушению прочностных свойств и последующему возникно-

© Г.В. Аникин, А.А. Ишков, 2023

вению рисков нарушения целостности объектов, в том числе с разливом углеводородов. Для того чтобы избежать указанных проблем, необходимо сохранять температуру грунтов на определенном уровне, который не превышает температуры фазового перехода поровой воды в них. Для этих целей широко используются сезонные охлаждающие устройства (СОУ), которые работают на основе естественной циркуляции теплоносителя (хладагента) внутри системы. Список типов сооружений, для которых применение СОУ может оказаться критическим с точки зрения сохранения ММГ, обширен: площадные сооружения, линейные объекты, плотины, нефтяные скважины, железнодорожное полотно и т. д.

При строительстве площадных объектов и применении сезонных охлаждающих устройств чаще всего можно встретить два варианта:

1) использование проветриваемого подполья с бетонными сваями в совокупности с одиночными СОУ;

2) системы термостабилизации площадного действия с горизонтальным испарителем [*Феклистов и др., 2008*].

Для линейных объектов широкое применение получили СОУ, вмонтированные в основания несущих элементов либо по всей длине трубопровода, либо в местах с распространением высокотемпературных ММГ.

Однако такие объекты, как нефтяные скважины, имеющие зачастую существенную положительную температуру устья, являются технологическим вызовом для систем температурной стабилизации грунтов. В литературе есть примеры обустройства устья скважин вертикальными естественно действующими системами (ВЕТ) производства “Фундаментстройаркос”, с глубиной охлаждающих труб до 60 м, что позволяет сократить расстояние между устьями скважин с 20 до 12 м [*Системы..., 2014*].

В настоящей статье рассматривается работа глубинных СОУ, однако не в типичном их представлении как один СОУ (самостоятельная единица температурной стабилизации грунтов), а как массив глубинных СОУ, соединенных единой системой (испаритель, соединительные трубы, конденсатор с высокой эффективной поверхностью теплосъема).

Поскольку наиболее сложные процессы среди всех видов СОУ происходят в глубинных СОУ, имеющих максимальную длину испарителя до 100 м, очевидно, что процессы тепломассопереноса в них будут иметь сложный характер.

В работе получено аналитическое решение функционирования массива глубинных СОУ, соединенных в единый конструктивный узел с конденсатором с большой эффективностью теплообмена. Полученное решение может быть применено для экспресс-оценки эффективности функционирования описанной конфигурации глубинных СОУ.

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ И МОДИФИКАЦИЯ ГЛУБИННЫХ СОУ

Как было сказано выше, сезонные охлаждающие устройства являются одним из наиболее эффективных методов, применяемых для предотвращения растепления многолетнемерзлых грунтов при техногенном вмешательстве.

Такие устройства представляют собой холодильные агрегаты, которые работают за счет низких температур атмосферного воздуха в холодный период года и не требуют дополнительных энергетических затрат в процессе эксплуатации. Это особенно важно для удаленных районов, где обычно отсутствуют линии электропередач [*Укрепление..., 1969; Александров и др., 1983*].

Существует множество различных видов сезонных охлаждающих устройств, которые постоянно совершенствуются и модифицируются [*Основы..., 1999; Долгих и др., 2011*]. Тем не менее все они могут быть классифицированы в соответствии с четырьмя основными видами:

1) индивидуальные термостабилизаторы;

2) системы температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем;

3) системы температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем и охлаждающими вертикальными трубками;

4) глубинные СОУ.

В настоящей работе рассматривается функционирование глубинных СОУ, включая новую предложенную модификацию. Классические глубинные СОУ представляют собой герметичную неразъемную сварную конструкцию, заправленную хладагентом, и имеют два типоразмера диаметром подземной части (испарителя) 57 и 89 мм, а также различную глубину погружения в 60, 70, 80, 90 и 100 м [*Долгих и др., 2011*]. В качестве теплоносителя используется двуокись углерода, так как это наиболее эффективный хладагент [*Ишков, Аникин, 2019*].

Внутренние процессы, происходящие в сезонных охлаждающих устройствах, весьма сложные [*Аникин и др., 2008, 2013*].

Концептуально работу глубинного СОУ можно описать следующим образом: при понижении температуры воздуха ниже температуры грунта давление насыщенных паров в конденсаторе уменьшается, что, в свою очередь, снижает давление в испарителе. Температура в испарителе при этом остается постоянной за счет теплового потока, который поступает из грунта. Установившееся давление в испарителе становится меньше, чем давление насыщенных паров, что вызывает кипение теплоносителя и его циркуляцию по контуру

системы СОУ. Смесь парообразного и жидкого (в виде капель, взвешенных в газе) хладагента поступает в конденсатор, где происходит конденсация паров на более холодном конденсаторе. Конденсат вместе с принесенной паром жидкой фазой под действием силы тяжести стекает обратно в испаритель. Стоит отметить, что парообразование в испарителе сопровождается оттоком теплоты из грунта, а конденсация пара в конденсаторе, наоборот, выделением теплоты, которая затем рассеивается в атмосферу.

Эффективность глубинного СОУ напрямую зависит от интенсивности циркуляции теплоносителя по системе и внутренних условий конвективных процессов [*Аникин и др., 2013*]. Основными характеристиками двухфазного потока служат такие величины, как скорость жидкого и газообразного теплоносителя, массовое и объемное газосодержания, числа Рейнольдса жидкого и газообразного теплоносителя. Большинство приведенных выше характеристик для систем глубинных СОУ неизвестны, но по натурным наблюдениям есть возможность определить температуры СОУ в зависимости от глубины в различные моменты времени [*Долгих и др., 2011; Паздерин, 2011*].

Однако все это справедливо для случая классического глубинного СОУ с конструкцией “труба в трубе” и одним конденсаторным блоком на каждом СОУ. Описанное в работе глубинное сезонно действующее охлаждающее устройство несколько отличается от классического. Ключевым моментом является то, что предлагается использовать один конденсаторный блок с большой поверхностью оребрения и, как следствие, с большей эффективностью. Кроме того, трубы испарителя представляют собой не конструкцию “труба в трубе”, а обычную цилиндрическую трубу. Такая конструкция существенно проще и лишена недостатка закупоривания межкольцевого пространства пузырьками газа при активном кипении хладагента. Также для более эффективного функционирования представленной системы по пути движения жидкой фазы хладагента по подводящей линии к трубам испарителя глубинного СОУ соблюден гидравлический уклон вниз (около 5°), а на линии отвода газовой фазы – аналогичный уклон вверх, чтобы пузырьки газа быстрее уходили вверх в конденсатор. В процессе кипения хладагента в испарителе (второй трубы) происходит процесс тепломассопереноса за счет гравитационного уравновешивания – пузырьки газа всплывают вверх, более холодный хладагент из подводящей линии опускается вниз (вследствие разных плотностей). В работе рассмотрена система с одним глубинным элементом.

Концепция работы описанной системы по части запуска системы отличается от конструкции “труба в трубе” еще одним условием, которое необходимо соблюдать. Так, для данной системы давление в испарителе на определенной глубине равно давлению насыщенных паров в конденсаторе плюс гидростатическое давление столба жидкого хладагента. Таким образом, если выполняется условие, что давление насыщенных паров в испарителе на глубине H ($t_{ev}(H)$) больше, чем давление равновесия (насыщения), то начинается кипение хладагента. Охлаждение грунта также происходит за счет поглощения теплоты парообразования хладагента в испарителе. Пузырьки газа движутся по испарителю и трубам коллектора в конденсатор, где происходит их конденсация с отведением теплоты фазовых переходов в атмосферу. Конструкция продумана так, чтобы пузырьки двигались в конденсатор без препятствий, т. е. без образования газовых пробок. Описанный механизм, как видно, отличается от действующего в классической системе “труба в трубе”, где существенную роль играет свободная конвекция жидкости.

Далее рассмотрим математическую постановку задачи для аналитического решения функционирования глубинного СОУ и оценки эффективности.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЛУБИННЫХ СОУ

В процессе функционирования глубинного СОУ вокруг цилиндрической трубы испарителя образуется ореол мерзлого грунта. В случае, когда граница мерзлого грунта движется много медленнее, чем устанавливается температура внутри данного цилиндра, для решения уравнения теплопроводности при нахождении распределения температуры грунта рассмотрим стационарное решение

$$\frac{1}{r}\frac{d\left(r\dfrac{dt(r,H)}{dr}\right)}{dr}=0.$$

Здесь r – радиальная координата, м; $t(r)$ – распределение температуры по радиальной координате, °C; H – глубина, м.

Решение данного уравнения записывается в виде [*Аникин, Ишков, 2022*]:

$$t(r,H)=C\cdot\ln\left(\frac{r}{b}\right)+t_{ev}(H),$$

где C – константа интегрирования; b – радиус трубы испарителя, м; $t_{ev}(H)$ – температура на границе трубы испарителя и грунта на глубине H, °C.

Обозначим радиус промерзания грунта вокруг трубы испарителя по глубине СОУ как функцию $R_0(H)$. Тогда получаем

$$C=\frac{t_{bf}-t_{ev}(H)}{\ln\left(R_0(H)/b\right)},$$

где t_{bf} – температура фазового перехода, °C.

Рассмотрим тепловой поток (dQ, Дж), который поступает со стороны грунта к единице длины испарителя dH в единицу времени $d\tau$:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t(r,H)}{\partial r} 2\pi r dH d\tau = \\ = -2\pi\lambda \frac{t_{\text{bf}} - t_{\text{ev}}(H)}{\ln\left(R_0(H)/b\right)} dH d\tau, \quad (1)$$

где τ – время, сут; λ – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/(м·°С).

Знак минус в выражении (1) означает, что тепловой поток направлен в противоположную относительно радиальной координаты сторону.

Количество теплоты, выделяемое грунтом за счет фазового перехода "вода–лед" при замерзании цилиндра радиусом R_0 и высотой dH, равно

$$dQ = -\gamma r_x \left(w_{\text{tot}} - w_{\text{w}}\right) 2\pi R_0(H) d\left(R_0(H)\right) dH, \quad (2)$$

где γ – плотность скелета грунта, кг/м^3; r_x – латентная теплота фазового перехода, Дж/кг; w_{tot} – суммарная влажность грунта, д.е.; w_{w} – влажность грунта за счет незамерзшей воды.

Приравнивая выражения (1) и (2), получаем

$$d\tau = \frac{1}{\lambda\left(t_{\text{bf}} - t_{\text{ev}}(H)\right)} \gamma r_x \left(w_{\text{tot}} - w_{\text{w}}\right) \times \\ \times R_0(H) \ln\left(\frac{R_0(H)}{b}\right) d\left(R_0(H)\right). \quad (3)$$

Заметим, что в начальный момент времени, когда СОУ еще на запустился в работу, радиус замороженного грунта будет равен радиусу испарителя (т. е. грунт – полностью талый), что можно формализовать в виде следующего выражения:

$$R_0(H) = b \text{ при } \tau = 0. \quad (4)$$

Таким образом, проводя интегрирование выражения (3) с учетом граничного условия (4), получаем

$$\tau\left(t_{\text{bf}} - \overline{t_{\text{ev}}(H)}\right) = \frac{\gamma r_x \left(w_{\text{tot}} - w_{\text{w}}\right) b^2}{\lambda} \int_1^{\frac{R_0(H)}{b}} x \ln(x) dx, \\ \overline{t_{\text{ev}}(H)} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} t_{\text{ev}}(H, \tau') d\tau', \quad (5)$$

где $\overline{t_{\text{ev}}(H)}$ – средняя температура испарителя на глубине H за время τ работы СОУ.

Поскольку известно решение табличного интеграла [*Бронштейн, Семендяев, 1986*]

$$\int x \ln(x) dx = \frac{x^2}{2} \ln(x) - \frac{x^2}{4},$$

то выражение (5) запишется в виде

$$\tau = \frac{\gamma r_x \left(w_{\text{tot}} - w_{\text{w}}\right)}{\lambda\left(t_{\text{bf}} - t_{\text{ev}}(H)\right)} \times \\ \times \left(\frac{R_0(H)^2}{2} \ln\left(\frac{R_0(H)}{b}\right) - \frac{R_0(H)^2}{4} + \frac{b^2}{4} \right). \quad (6)$$

Как следует из работы [*Ишков, Аникин, 2019*], температуры конденсатора и испарителя связаны между собой следующим соотношением:

$$t_{\text{ev}}(H) = t_{\text{con}} + \frac{\rho_L g H}{dp_h(t)/dt} = t_{\text{a}} + \Delta t + \frac{\rho_L g H}{dp_h(t)/dt}, \\ \Delta t = t_{\text{con}} - t_{\text{a}}. \quad (7)$$

Здесь t_{con} – температура конденсатора, °С; t_{a} – температура атмосферы, °С; ρ_L – плотность жидкого хладагента, кг/м^3; $dp_h(t)/dt$ – производная от давления насыщенных паров по температуре, Па; g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Рассмотрим случай первого приближения, когда выполняется условие, что температура конденсатора стремится к температуре атмосферного воздуха. Другими словами, эффективность работы конденсаторной части высока:

$$\Delta t << |t_{\text{a}}|. \quad (8)$$

Тогда выражение (6) с учетом (7) и (8) можно записать в виде

$$\tau = \frac{\gamma r_x \left(w_{\text{tot}} - w_{\text{w}}\right)}{\lambda\left(t_{\text{bf}} - \overline{t}_{\text{a}} + \frac{\rho_L g H}{dp_h(t)/dt}\right)} \times \\ \times \left(\frac{R_0(H)^2}{2} \ln\left(\frac{R_0(H)}{b}\right) - \frac{R_0(H)^2}{4} + \frac{b^2}{4} \right),$$

где $\overline{t}_{\text{a}}$ – средняя температура атмосферы за время τ, °С.

Как следует из (1), полная тепловая мощность U, которую грунт отдает трубе испарителя, при выполнении условия (8) равна

$$U = \int_{H_0}^{H_{\max}} 2\pi\lambda \frac{t_{\text{bf}} - t_{\text{a}}}{\ln\left(R_0(H)/b\right)} dH, \quad (9)$$

где H_0 – расстояние от поверхности жидкого хладагента в конденсаторе до поверхности грунта, м; $H_{\max}$ – расстояние от поверхности жидкого хладагента в конденсаторе до нижней точки трубы испарителя, м.

В то же время полная тепловая мощность сезонного охлаждающего устройства может быть записана в виде

$$U = S\eta\alpha\left(t_{\text{con}} - t_{\text{a}}\right) = S\eta\alpha\Delta t, \quad (10)$$

где S – суммарная площадь оребрения конденсатора, м^2; η – коэффициент эффективности ребер, д.е.; α – коэффициент теплоотдачи ребер, Вт/(м^2·°С).

Коэффициент теплоотдачи можно рассчитать по формуле [*Ройзен, Дулькин, 1977*]:

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

Здесь s – расстояние между ребрами конденсатора, м; d – диаметр трубы, на которую надето ребро конденсатора, м; h – расстояние от стенки трубы до внешней кромки ребра, м; $\lambda_a(t)$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С); $\nu_a(t)$ – кинематическая вязкость воздуха, Па·с; v_a – скорость ветра, м/с.

Из соотношений (9) и (10) можно найти величину Δt:

$$\Delta t = \frac{N}{S\eta\alpha}\int_{H_0}^{H_{max}} 2\pi\lambda\frac{t_{bf} - t_a}{\ln\left(R_0(H)/b\right)}dH,$$

где N – число испарителей, присоединенных к одному конденсатору.

Таким образом, система уравнений полностью замкнута и может быть применена для решения задачи нахождения радиуса промерзания грунта вокруг трубы испарителя глубинного сезонно действующего охлаждающего устройства в зависимости от глубины. Для решения этой системы трансцендентных уравнений применяется математический инструмент в виде функционала программного комплекса MathCAD. В данном случае используется функция *root*, которая вычисляет корень (т. е. значение, при котором функция обращается в нуль) с установленной точностью.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГЛУБИННЫХ СОУ

После того как была формализована задача формирования фронта замерзания от глубинного сезонно действующего устройства, рассмотрим пример его работы при метеорологических условиях города Салехарда. Среднемесячные температуры воздуха и скорости ветра, полученные по архивным данным метеостанции Салехарда, приведены в табл. 1.

Для представленной в работе системы характеристики конденсатора имеют следующие значения: d = 32 мм, s = 7 мм, h = 34 мм, S = 100 м^2 [*Аникин, Ишков, 2022*]. Глубина подземной части (испарителя) составляет 120 м. Начальная температура грунта составляет 0 °С (т. е. в начале расчета весь массив грунта находится в талом состоянии). Вязкость и теплопроводность воздуха зависят от температуры атмосферы и задаются согласно справочным данным [*Бабичев и др., 1991*]. В качестве хладагента принят диоксид углерода. Рассмотрен случай установки глубинного СОУ в грунт без присутствия внешних источников тепла (например, скважина или трубопровод).

Таблица 1. **Среднемесячные значения температуры (t_a) и скорости ветра (v_a), полученные по архивным данным метеостанции г. Салехарда**

Месяц	t_a, °С	v_a, м/с
Октябрь	–2.5	2.7
Ноябрь	–13.4	2.5
Декабрь	–17.6	2.1
Январь	–22.9	2.2
Февраль	–19.2	2.2
Март	–12.7	2.8
Апрель	–5.5	3.2

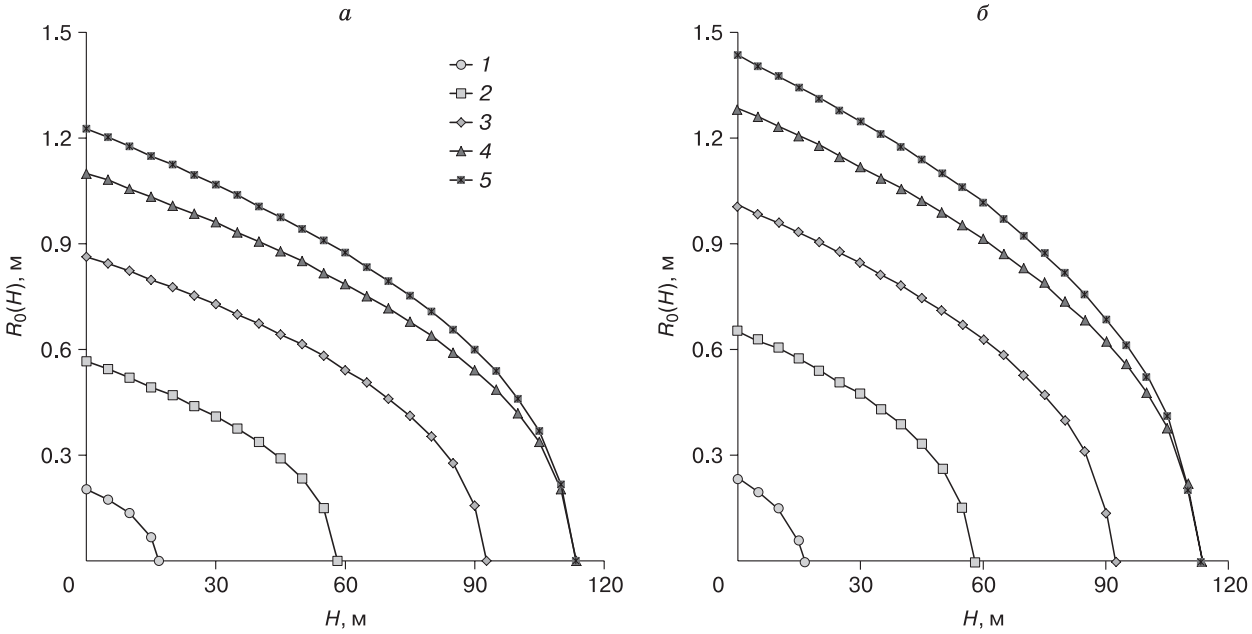
Теплофизические свойства талого и мерзлого грунта, принятые для всех аналитических расчетов, имеют значения: γ = 1600 кг/м^3, w_0 = 0, w = 0.2, λ_{th} = 1.4, 2.0 Вт/(м·°С), λ_{fr} = 1.7, 2.2 Вт/(м·°С).

Таким образом, при заданных выше параметрах в приближении (8) находим зависимости радиуса промерзания от глубины $R_0(H)$ в различные моменты времени. Результаты расчетов представлены на рисунке и в табл. 2, 3.

Согласно полученным данным, можно отметить, что промерзание грунта вокруг трубы испарителя глубинного СОУ происходит в любой момент времени до определенной глубины. Это обусловлено тепловой мощностью системы, поскольку она напрямую зависит от характеристик конденсатора и, что главное в данном случае, от температуры атмосферы. В каждый момент времени система работает эффективно и может проморозить грунт только на определенную глубину, пока не произойдет стабилизация фронта промерзания до баланса входящей и исходящей для элемента массива тепловой энергии. Так, для текущей постановки задачи (конфигурации системы глубинного СОУ, климата и свойств грунта) максимальная глубина замораживания грунта составляет 113.41 м. Это глубина, ниже которой кипения хладагента происходить не будет, и он будет находиться в жидком агрегатном состоянии.

Определение шага между трубами испарителя осуществляется следующим образом. Решается задача нахождения максимального радиуса промерзания грунта на определенной глубине. Исходя из полученных данных дается рекомендация, что расстояние между трубами испарителя СОУ должно составлять два радиуса промораживания. Таким образом, достигается эффект синергии между ореолами промораживания, и между испарителями всегда будет грунт с отрицательной температурой.

Таким образом, применяя предлагаемую аналитическую модель, можно на этапе проектирования решать задачу оптимизации, где в качестве входящих параметров, с одной стороны, будут внешние параметры и параметры ММГ (скорость



Зависимость радиуса промерзания грунта от глубины в различные моменты времени τ при коэффициенте теплопроводности мерзлого грунта:

а – λ_{fr} = 1.4 Вт/(м·°С); *б* – λ_{fr} = 2 Вт/(м·°С). *1* – τ = 20 сут, *2* – τ = 60 сут, *3* – τ = 100 сут, *4* – τ = 140 сут, *5* – τ = 180 сут. На 1 октября τ = 0.

Таблица 2. **Значения радиуса промерзания грунта от глубины ($R_0(H)$, м) в различные моменты времени (τ) при λ_{fr} = 1.4 Вт/(м·°С)**

τ = 20 сут		τ = 60 сут		τ = 100 сут		τ = 140 сут		τ = 180 сут	
H, м	$R_0(H)$	H, м	$R_0(H)$	H, м	$R_0(H)$	H, м	$R_0(H)$	H, м	$R_0(H)$
0.00	0.20	0.00	0.57	0.00	0.86	0.00	1.10	0.00	1.23
5.00	0.17	5.00	0.54	5.00	0.84	5.00	1.08	5.00	1.20
10.00	0.14	10.00	0.52	10.00	0.82	10.00	1.06	10.00	1.18
15.00	0.07	15.00	0.49	15.00	0.80	15.00	1.03	15.00	1.15
20.00	0.00*	20.00	0.47	20.00	0.78	20.00	1.01	20.00	1.12
25.00	–	25.00	0.44	25.00	0.75	25.00	0.99	25.00	1.10
30.00	–	30.00	0.41	30.00	0.73	30.00	0.96	30.00	1.07
35.00	–	35.00	0.38	35.00	0.70	35.00	0.93	35.00	1.04
40.00	–	40.00	0.34	40.00	0.67	40.00	0.91	40.00	1.01
45.00	–	45.00	0.29	45.00	0.64	45.00	0.88	45.00	0.97
50.00	–	50.00	0.23	50.00	0.61	50.00	0.85	50.00	0.94
55.00	–	55.00	0.15	55.00	0.58	55.00	0.82	55.00	0.91
60.00	–	60.00	0.00*	60.00	0.54	60.00	0.79	60.00	0.87
65.00	–	65.00	–	65.00	0.51	65.00	0.75	65.00	0.83
70.00	–	70.00	–	70.00	0.46	70.00	0.72	70.00	0.79
75.00	–	75.00	–	75.00	0.41	75.00	0.68	75.00	0.75
80.00	–	80.00	–	80.00	0.35	80.00	0.64	80.00	0.71
85.00	–	85.00	–	85.00	0.28	85.00	0.59	85.00	0.66
90.00	–	90.00	–	90.00	0.16	90.00	0.54	90.00	0.60
95.00	–	95.00	–	95.00	0.00*	95.00	0.49	95.00	0.54
100.00	–	100.00	–	100.00	–	100.00	0.42	100.00	0.46
105.00	–	105.00	–	105.00	–	105.00	0.34	105.00	0.37
110.00	–	110.00	–	110.00	–	110.00	0.20	110.00	0.22
120.00	–	120.00	–	120.00	–	120.00	0.00*	120.00	0.00*

Примечание к табл. 2, 3. Значение 0* означает радиус глубинного СОУ, поскольку это минимальное значение радиуса в текущей постановке задачи.

Таблица 3. **Значения радиуса промерзания грунта от глубины ($R_0(H)$, м) в различные моменты времени (τ) при λ_{fr} = 2.0 Вт/(м·°С)**

τ = 20 сут		τ = 60 сут		τ = 100 сут		τ = 140 сут		τ = 180 сут	
H, м	$R_0(H)$	H, м	$R_0(H)$	H, м	$R_0(H)$	H, м	$R_0(H)$	H, м	$R_0(H)$
0.00	0.23	0.00	0.65	0.00	1.01	0.00	1.28	0.00	1.43
5.00	0.20	5.00	0.63	5.00	0.99	5.00	1.26	5.00	1.41
10.00	0.15	10.00	0.61	10.00	0.96	10.00	1.23	10.00	1.38
15.00	0.06	15.00	0.58	15.00	0.93	15.00	1.21	15.00	1.35
20.00	0.00*	20.00	0.54	20.00	0.91	20.00	1.18	20.00	1.31
25.00	–	25.00	0.51	25.00	0.88	25.00	1.15	25.00	1.28
30.00	–	30.00	0.48	30.00	0.85	30.00	1.12	30.00	1.25
35.00	–	35.00	0.43	35.00	0.81	35.00	1.08	35.00	1.21
40.00	–	40.00	0.39	40.00	0.78	40.00	1.06	40.00	1.18
45.00	–	45.00	0.33	45.00	0.75	45.00	1.02	45.00	1.14
50.00	–	50.00	0.26	50.00	0.71	50.00	0.99	50.00	1.10
55.00	–	55.00	0.15	55.00	0.67	55.00	0.95	55.00	1.06
60.00	–	60.00	0.00*	60.00	0.63	60.00	0.91	60.00	1.02
65.00	–	65.00	–	65.00	0.59	65.00	0.87	65.00	0.97
70.00	–	70.00	–	70.00	0.53	70.00	0.83	70.00	0.92
75.00	–	75.00	–	75.00	0.47	75.00	0.79	75.00	0.87
80.00	–	80.00	–	80.00	0.40	80.00	0.74	80.00	0.82
85.00	–	85.00	–	85.00	0.31	85.00	0.68	85.00	0.76
90.00	–	90.00	–	90.00	0.14	90.00	0.62	90.00	0.69
95.00	–	95.00	–	95.00	0.00*	95.00	0.56	95.00	0.61
100.00	–	100.00	–	100.00	–	100.00	0.48	100.00	0.53
105.00	–	105.00	–	105.00	–	105.00	0.38	105.00	0.41
110.00	–	110.00	–	110.00	–	110.00	0.22	110.00	0.20
120.00	–	120.00	–	120.00	–	120.00	0.00*	120.00	0.00*

ветра, температура воздуха, инженерно-геологические элементы и их теплофизические свойства), а с другой – внутренние (характеристики конденсаторной части, тип хладагента, глубина испарителя). В качестве целевого параметра выступает температурное поле, а задачей оптимизации является минимизация значений температур с целью организации бесперебойной эксплуатации того или иного объекта инфраструктуры при условии минимальных денежных затрат.

ВЫВОДЫ

Разработана аналитическая модель функционирования глубинного СОУ, которая базируется на интегральном методе с допущением квазистационарного продвижения фронта замерзания грунта.

Приведен пример использования модели для оценки эффективности работы глубинных СОУ в метеорологических условиях г. Салехарда. Рассмотрена одна из конструктивных конфигураций системы для грунтов с различной теплопроводностью. Получены значения радиуса промерзания грунта вокруг трубы испарителя в зависимости от глубины и интервала времени работы системы.

Представленная аналитическая модель может применяться на этапе проектирования для оценки и оптимизации конструкции рассмотренной системы термостабилизации (глубина СОУ, параметры конденсатора, хладагент) в тех или иных геокриологических зонах для разных теплофизических характеристик мерзлых грунтов.

Литература

Александров Ю.А. Термосваи в строительстве на Севере / Ю.А. Александров, С.С. Вялов, С.Э. Городецкий и др. Л., Стройиздат, 1983, 230 с.

Аникин Г.В., Ишков А.А. Использование аналитического решения функционирования системы “ГЕТ” для экспресс-оценки эффективности ее работы // Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 4, с. 59–67.

Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А. Расчет динамики промерзания грунта под воздействием одиночного термосифона // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 1, с. 51–55.

Аникин Г.В., Поденко Л.С., Вакулин А.А. Расчет динамики промерзания грунта вокруг вертикального парожидкостного термостабилизатора // Вестн. Тюм. гос. ун-та, 2008, № 6, с. 42–49.

Бабичев А.П. Физические величины. Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский. М., Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.

Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. 13-е изд., испр. М., Наука, 1986, 544 с.

Долгих Г.М., Окунев С.Н., Мельникова Е.А. и др. Глубинные коллекторные СОУ – новый шаг при строительстве

уникальных объектов на примере Вилюйской ГЭС-3 // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. по инженерному мерзлотоведению, посвящ. XX-летию создания ООО НПО "Фундаментстройаркос". Тюмень, Сити-Пресс, 2011, с. 25–31.

Ишков А.А., Аникин Г.В. Сопоставление характеристик работы системы "ГЕТ", заправленной аммиаком и диоксидом углерода // Материалы нац. науч.-техн. конф. с междунар. участием "Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации)". Тюмень, Тюм. индустр. ун-т, 2019, с. 112–114.

Основы геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1999, 526 с.

Паздерин Д.С. Натурные исследования глубинных СОУ в условиях опытно-промышленного полигона // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов, посвящ. XX-летию создания ООО НПО "Фундаментстройаркос", "Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера" (Тюмень,19–20 апр. 2011 г.). Тюмень, 2011, с. 47–51.

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

Системы температурной стабилизации грунтов оснований в криолитозоне: Актуальные вопросы исследований, расчетов, проектирования, производства, строительства, авторского надзора и мониторинга / Под ред. Г.М. Долгих. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2014, 217 с.

Укрепление мерзлых оснований охлаждением / Под ред. С.И. Гапеева. Л., Стройиздат, 1969, 104 с.

Феклистов В.Н., Долгих Г.М., Окунев С.Н. и др. Исследование охлаждающей системы типа "ГЕТ" для термостабилизации грунтовых оснований // Материалы Междунар. конф. "Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения" (Тюмень, 21–24 апр. 2008 г.). Тюмень, 2008, т. 2, с. 165–168.

References

Aleksandrov Yu.A., Vyalov S.S., Gorodetsky S.E. et al. Termosvai v stroitelstve na Severe [Thermoshafts in Construction in the North]. Leningrad, Stroyizdat, 1983, 230 p. (in Russian).

Anikin G.V., Ishkov A.A. Use of analytical solution of functioning of the "HET" system for express estimation of the efficiency of its work. Earth's Cryosphere, 2022, vol. XXVI, No. 4, p. 59–67.

Anikin G.V., Plotnikov S.N., Spasennikova K.A. Calculation of soil freezing rate under the influence of a solitary thermosyphon. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2013, vol. XVII, No. 1, p. 51–55.

Anikin G.V., Podenko L.S., Vakulin A.A. Calculation of soil freezing dynamics around vertical vapor-liquid thermal stabilizer. Vestnik Tyumen State Univ., 2008, No. 6, p. 42–49.

Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovsky A.M. Fizicheskie velichiny [Physical Quantities. Reference]. Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 p. (in Russian).

Bronstein I.N., Semendyaev K.A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchaschikhsya VTUZov [Handbook of Mathematics for Engineers and Students of Higher Technical Institutions]. 13th ed. revised. Moscow, Nauka, 1986, 544 p. (in Russian).

Dolgikh G.M., Okunev S.N., Melnikova E.A. et al. Deep collector-drainage SOU – a new step in the construction of unique objects on the example of the Vilyui HPP-Z. In: Materials of the Int. Sci. and Pract. Conf. on Permafrost Engng, dedicated to the XX anniversary of the Foundationstroyarkos LLC. Tyumen, City-Press, 2011, p. 25–31 (in Russian).

Ishkov A.A., Anikin G.V. Comparison of the characteristics of the "GET" system filled with ammonia and carbon dioxide. In: Proc. of the Nat. Sci. and Techn. Conf. with international participation "Geology and oil and gas bearing capacity of West Siberian megabasin (experience, innovations)". Tyumen, Tyumen Industr. Univ., 2019, p. 112–114 (in Russian).

Osnovy geokriologii. Pt 5. Inzhenernaya geokriologiay [Fundamentals of Geocryology. Part 5. Engineering Geocryology]. E.D. Ershov (Ed.). Moscow, Moscow University Press, 1999, 526 p. (in Russian).

Pazderin D.S. Full-scale studies of deep SCD in conditions of experimental-industrial polygon. In: Materials of the All-Rus. Sci. and Pract. Conf. of Young Scientists and Specialists, dedicated to the XX anniversary of the Foundationstroyarkos LLC, "Strategy of innovative development, construction and development of the Far North regions" (Tyumen, Apr. 19–20, 2011). Tyumen, 2011, p. 47–51 (in Russian).

Royzen L.I., Dulkin I.N. Teplovoi raschet orebrennykh poverkhnostei [Thermal calculation of ribbed surfaces]. Moscow, Energiya, 1977, 244 p. (in Russian).

Systems of Soil Temperature Stabilization in the Cryolithozone: Actual Issues of Research, Calculations, Design, Production, Construction, Author's Supervision and Monitoring. G.M. Dolgikh (Ed.). Novosibirsk, Acad. Publ. House "Geo", 2014, 217 p. (in Russian).

Ukreplenie merzlykh osnovanij okhlazhdeniem [Strengthening of frozen bases by cooling]. S.I. Gapeev (Ed.). Leningrad, Stroyizdat, 1969, 104 p. (in Russian).

Feklistov V.N., Dolgikh G.M., Okunev S.N. et al. Investigation into HET thermosyphons for soil stabilization. In: Resources of Polar and Highland Areas. State and Prospects of Geocryology (Tyumen, Apr. 21–24, 2008). Tyumen, 2008, p. 165–168 (in Russian).

Поступила в редакцию 1 ноября 2022 г.,
после доработки – 31 мая 2023 г.,
принята к публикации 27 июня 2023 г.