

ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 624.139
DOI: 10.15372/KZ20240503
EDN: PVSPPJ

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АКТИВНОЙ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ: РОССИЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ, ИССЛЕДОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В.П. Мельников^{1–4}, А.А. Ишков^{4,5,*}, Г.В. Аникин^{1,2}

¹Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625000, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия

²Автономная некоммерческая организация “Губернская академия”, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия

³Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия

⁴Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия

⁵ООО “РН-КрасноярскНИПИнефть”, 660098, Красноярск, ул. 9 Мая, 65Д, Россия

*Автор для контакта; e-mail: a.a.ishkov@yandex.ru

Дан подробный обзор применяемых методов активной температурной стабилизации мерзлых грунтов с акцентом на системы температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем. Приведен накопленный опыт отечественных и зарубежных авторов в области одиночных сезонно-охлаждающих устройств. Показан механизм действия как одиночных сезонно-охлаждающих устройств, так и систем температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем. В работе также представлена новая экспериментальная установка термостабилизации мерзлых грунтов с горизонтальным испарителем, на которой был проведен ряд экспериментов по исследованию потоков хладагента в контуре циркуляции предлагаемой системы при различных тепловых режимах, действующих на испарительную часть. Приведены описание полномасштабного стенда и принцип подачи положительной температуры на испарительную часть системы с целью моделирования отведения тепла от грунта с последующим рассеиванием его в атмосферу через развитую поверхность конденсатора. В настоящее время в системах данного вида в качестве хладагента используется аммиак, а в работе в качестве теплоносителя выступает диоксид углерода. Доказано, что мощность установки, работающей на диоксиде углерода, может быть значительно больше, чем мощность установки на аммиаке. Проведенные исследования и полученные результаты позволяют оптимизировать выбор конфигурации системы температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем под тот или иной объект строительства. Применение разработанной системы температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем, ввиду ее лучшей эффективности по сравнению с аналогами, позволит значительно сократить риски растепления мерзлых грунтов на объектах эксплуатации.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, системы температурной стабилизации грунтов, диоксид углерода, экспериментальные исследования, импульсный режим течения, хладагент.

Ссылка для цитирования: Мельников В.П., Ишков А.А., Аникин Г.В. Современные методы активной термостабилизации мерзлых грунтов: российские разработки, исследования и перспективы // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 5, с. 21–37. DOI: 10.15372/KZ20240503. EDN: PVSPPJ.

METHODS OF ACTIVE THERMAL STABILIZATION OF FROZEN GROUND: RUSSIAN DEVELOPMENTS, RESEARCH, AND PROSPECTS

V.P. Melnikov^{1–4}, A.A. Ishkov^{4,5,*}, G.V. Anikin^{1,2}

¹Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Malygina St. 86, Tyumen, 625026 Russia

²Autonomous non-commercial organization “Gubernaya Akademiya”, Malygina St. 86, Tyumen, 625026 Russia

³Tyumen State University, Volodarskogo St. 6, Tyumen, 625003 Russia

⁴Tyumen Industrial University, Volodarskogo St. 38, Tyumen, 625000 Russia

⁵LLC “RN-KrasnoyarskNIPIneft”, 9 Maya St. 65D, Krasnoyarsk, 660098 Russia

*Corresponding author; e-mail: a.a.ishkov@yandex.ru

This paper provides a detailed review of the methods of active temperature stabilization of frozen soils with an emphasis on stabilization systems with a horizontal evaporator. The experience of Russian and foreign

authors in the field of single seasonal cooling devices is presented. The range of seasonal cooling devices applied in Russia and the objects, at which they are installed, are considered. The mechanism of action of both single cooling devices and temperature stabilization systems with a horizontal evaporator is shown. The paper also presents a new experimental installation for thermal stabilization of frozen ground with a horizontal evaporator, on which a number of experiments have been conducted to study refrigerant flows in the circulation circuit of the proposed system under different thermal conditions affecting the evaporator. A description of a full-scale stand is given, and the principle of supplying positive temperature to the evaporator in order to simulate heat removal from the ground and its further dissipation into the atmosphere is described. At present, systems of this type usually use ammonia as a refrigerant; in the proposed system, carbon dioxide is used. It has been shown that the capacity of the installation based on carbon dioxide can be significantly higher than that based on ammonia. The study results make it possible to optimize the configuration of the ground temperature stabilization system with a horizontal evaporator for particular construction sites. The efficiency of the developed system is much better compared to the analogues, which significantly reduces the risk of thawing of frozen ground at operational sites. This is especially relevant at hazardous production facilities working with harmful substances, the ingress of which into the soil imposes a significant ecological trace.

Keywords: permafrost soils, ground temperature stabilization systems, carbon dioxide, experimental research, pulsed flow regime, refrigerant.

ВВЕДЕНИЕ

Ввиду возрастания масштабов строительства объектов гражданского и промышленного назначения на территориях распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) проблема нарушения их естественного температурного режима и потери ими несущей способности приобретает все большую актуальность. В результате изменения прочностных свойств ММГ при оттаивании основания фундаментов сооружений подвержены риску деформации и последующего разрушения [Мельников и др., 2009; Попов, Самсонова, 2011; Hwang, 1976; Farouki, 1986; Holubec, 2010].

Одним из наиболее важных параметров, отвечающих за устойчивость ММГ, является величина запаса отрицательной температуры грунта. Известно, что чем ниже температура мерзлого грунта, тем выше его прочностные свойства. Так, при понижении температуры мерзлого грунта с -0.3 до -1.0 °С его несущая способность (при свайном типе строительства) увеличивается в 2.5 раза. Если же температуру понизить до -2.0 °С, то величина несущей способности возрастает до 3.8 раза [Вялов и др., 1979; Макаров, 1985; Различные области..., 1985]. Если грунт более мелкодисперсный, требуется более низкая температура для увеличения его несущей способности. Можно сделать вывод, что несущая способность грунтов в большей степени зависит от их температуры, чем от литологического состава. Однако существенное влияние на способность поровой воды совершать фазовый переход “вода–лед” оказывает засоленность грунтов [Комаров, 2003]. Зачастую такие осложняющие факторы, как мелкодисперсность и засоленность поровой воды, встречаются одновременно. Например, на п-ове Ямал, где практически повсеместно инженерно-геокриологический разрез представлен суглинками со значительной степенью засоленности [Дубина и др., 1996].

Освоение новых территорий в субарктических зонах осложняется нарушением естественных условий (температурного и влажностного режимов грунтов) при возведении на многолетнемерзлых грунтах инженерных сооружений [Попов и др., 2010].

В настоящей работе приведен обзор текущих методов температурной стабилизации грунтов.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ АКТИВНОЙ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Для того чтобы придать устойчивость мерзлым грунтам в случае высокотемпературных ММГ и предотвратить растепление ММГ при воздействии на них тепловых потоков от введенных сооружений, были разработаны специальные устройства – сезонно-действующие охлаждающие устройства (СОУ) [Дан, Рей, 1979; Тепловые трубы..., 1972; Чи, 1981; Эва и др., 1982; Тепловые трубы..., 1985]. Эти устройства охлаждают грунт в холодное время года, а аккумулированный за этот период холод не дает грунту растепиться в теплое время года. По этой причине такие устройства также называют тепловыми диодами и аккумуляторами холода [Различные области..., 1985].

Устройства подобного (по своему действию) рода применялись в атомной и металлургической промышленности для охлаждения высокотемпературных конструктивных частей: атомных реакторов и доменных печей [Елисеев, Сергеев, 1971; Ивановский и др., 1978, 1980; Васильев, 1981; Пиоро и др., 1991]. Однако удельные тепловые нагрузки на эти конструктивные элементы имеют порядок тысяч и десятков тысяч ватт на метр, в то время как в грунтах тепловой поток, характерный для процессов теплообмена в грунтах оснований сооружений, составляет 10–20 Вт/м [Горелик, 2015].

Впервые в России применять данные СОУ для замораживания грунтов и сохранения их в мерзлом состоянии предложили Б.М. Блиер и М.М. Цинман [*Способ...*, 1945]. В последующем эту идею развивал С.И. Гапеев [1957].

В настоящее время для защиты ММГ от протаивания в период их эксплуатации применяются различные способы их термической изоляции. Можно выделить два основных подхода к сохранению мерзлого состояния грунтов: без применения и с применением температурной стабилизации.

К первой группе можно отнести строительство фундаментов с проветриваемыми подпольями, применение различных теплоизоляционных материалов (вспененные эпоксидные смолы, полиэтилен, винилпласт, фторопласт, пенополиуретан, пенополистирол, пенофенопласт и др.), а также охлаждающие трубы и каналы [*Различные области...*, 1985].

Вторая группа относится к применению различных типов СОУ. Часто встречаются комбинации этих подходов. Например, в основании нефтяных резервуаров, как правило, укладывается слой пенополиуретана непосредственно над системами температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем, чтобы минимизировать тепловой поток от резервуара с горячей нефтью. Также возможен вариант строительства фундаментов с проветриваемыми подпольями с комплектацией системами температурной стабилизации грунтов (ТСГ) с горизонтальным испарителем.

Главным условием строительства с применением указанных подходов является выполнение ряда требований: надежность, эффективность и возможность экстренного вмешательства в процесс. Таким образом, именно комбинирование активной термостабилизации с теплоизоляционными материалами позволяет достичь выполнения каждого из приведенных выше пунктов.

В настоящее время при строительстве и дальнейшей эксплуатации чаще всего используются парожидкостные СОУ в связи с тем, что они не требуют энергетических затрат и являются наиболее эффективными и надежными. Их эффективность обусловлена тем, что они обеспечивают высокую интенсивность внутренних процессов теплопереноса, а надежность определяется относительной простотой конструкции и монтажа.

Классификация сезонно-действующих охлаждающих устройств

На данный момент существует несколько типов и модификаций СОУ, однако их можно классифицировать по нескольким основным видам [*Гамзаев, Кроник, 2016*]:

- 1) одиночные термостабилизаторы (термосифоны);
- 2) системы температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем;

3) вертикальные естественно действующие трубчатые системы (ВЕТ);

4) глубинные сезонно-действующие охлаждающие устройства.

Одиночные термостабилизаторы

Одиночные (или индивидуальные) термостабилизаторы представляют собой герметичную сварную конструкцию, заправленную легкокипящим рабочим агентом – хладагентом.

Основные используемые хладагенты: углекислота (R744), аммиак (R717), различные марки фреонов (R11, R12, R13, R14, R134A, R22) и др. Отличительной особенностью хладагента является возможность кипения (фазовых переходов I рода) при отрицательных температурах. Глубина подземной части (испарителя) может достигать 15 м [*Вялов и др., 1983; Регулирование...*, 1983; *Макаров, 1985; Горелик, Селезнев, 2016*]. Высота надземной части с алюминиевым оребрением (конденсатора) составляет до 3 м. Изобретателем такого типа устройств является Е.Л. Лонг [*Long, 1963*]. Это устройство также получило название “охлаждающая трубка Лонга”. Способы установки термостабилизатора в грунт могут быть различными в зависимости от решаемых задач. Чаще всего термосифоны устанавливаются вертикально, наклонно или слабонаклонно.

За рубежом наибольшее распространение получили именно индивидуальные термостабилизаторы [*Long, 1963; Haynes, Zarling, 1988; Hayley, Horne, 2008*]. Они используются в районах распространения вечной мерзлоты начиная с 1960-х годов на Аляске и с середины 1970-х годов в Канаде. В этих районах в качестве хладагента для термосифонов обычно выступает углекислота [*Yarmak, Long, 2002*]. Термосифоны используются для стабилизации грунтов в основании фундаментов в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов как слитого, так и прерывистого типов по разрезу. В основном они применяются для стабилизации ММГ, начиная от линий железнодорожного сообщения и заканчивая трубопроводами, нефтебазами, автомобильными дорогами, опорами мостов и зданиями [*Permafrost...*, 1981; *Holubec, 2008*].

Основными конструктивными компонентами термосифона являются труба испарителя, расположенная в грунте, конденсатор с развитой поверхностью оребрения, термоизоляция трубы испарителя до глубины сезонного слоя (рис. 1).

Термосифоны забирают теплоту из грунта и отдают ее в атмосферу через оребрение конденсатора каждый раз, когда температура воздуха ниже температуры грунта на некоторую величину, пропорциональную сумме термического сопротивления хладагента и конструкции [*Аникин, Спасенникова, 2014*]. Обычно хладагентом является диоксид углерода, который находится под давлением

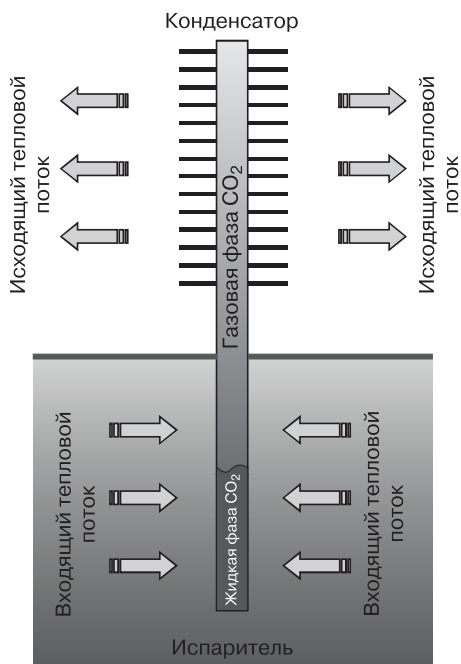


Рис. 1. Принципиальная схема термосифона [Yar-mak, Long, 2002].

20.70–47.37 атм. Принцип работы термосифона следующий. Из грунта на испаритель действует тепловой поток, что приводит к закипанию и испарению жидкой фазы хладагента. Так как в течение зимы температура воздуха ниже, чем температура грунта, то в результате этого хладагент, находящийся в газовой фазе в конденсаторе, конденсируется и стекает вниз по стенкам термосифона в виде капель жидкости. Таким образом, тепло извлекается из грунта, на котором построено сооружение, и рассеивается в атмосферу в течение всей зимы или до тех пор, пока температура воздуха ниже температуры грунта под сооружением. Летом холод сохраняется под сооружением благодаря слою теплоизоляции, расположенной над вертикальным окончанием трубы испарителя (рис. 2).

Важно, что в каждом сечении трубы термостабилизатора выполняется условие фазового равновесия, которое имеет вид

$$p = p_{LG}(T),$$

где $p_{LG}(T)$ – зависимость давления насыщенных паров хладагента от температуры, Па.

Кривые фазового равновесия при различных температурах обладают следующим свойством:

$$T_1 > T_2 \rightarrow p_{LG}(T_1) > p_{LG}(T_2). \quad (1)$$

Отсюда следует, что если температура испарителя больше температуры конденсатора, то, со-

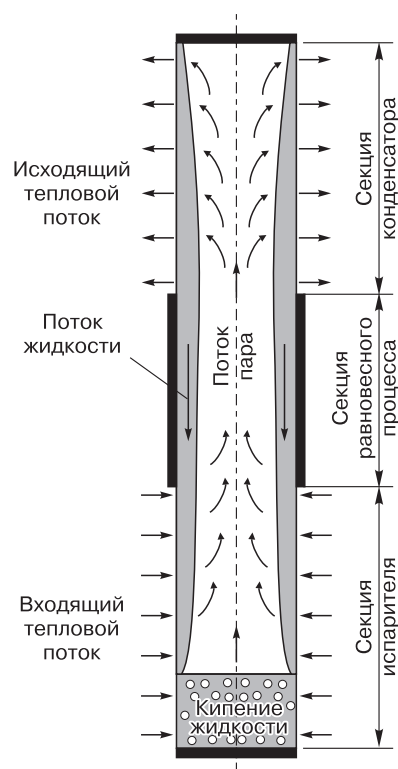


Рис. 2. Схематическая иллюстрация формирования фаз и циркуляции потоков теплоносителя [El-Genk, Saber, 1997].

ответственно, давление в испарителе больше, чем в конденсаторе. Вследствие разности давлений пар поднимается из испарителя в конденсатор, где конденсируется и уже в жидком состоянии под действием сил гравитации стекает назад в испаритель. Данный процесс повторяется циклично до тех пор, пока выполняется условие (1).

Ключевым фактором работоспособности СОУ является то, что при закипании (конденсации) хладагента поглощается (выделяется) латентная теплота фазового перехода, заданная выражениями

$$U_{\text{boil}} = G_L r_{LG}(T_{\text{ev}}), U_{\text{cond}} = G_G r_{LG}(T_{\text{cond}}), \quad (2)$$

где $U_{\text{boil}}, U_{\text{cond}}$ – тепловая энергия, забираемая испарителем у грунта при закипании и передаваемая атмосфере от конденсатора при конденсации, Вт; $T_{\text{ev}}, T_{\text{cond}}$ – температуры в испарителе и конденсаторе, °C; $r_{LG}(T_{\text{ev}}), r_{LG}(T_{\text{cond}})$ – латентная теплота фазового перехода при закипании и конденсации при соответствующих температурах T_{ev} и T_{cond} , Дж/кг; G_L, G_G – массовые расходы жидкости и пара в единицу времени, л/ч.

Несмотря на то что за рубежом чаще всего устанавливаются одиночные термостабилизаторы с различным окончанием испарительной части,

встречаются термосифоны, испаритель которых представляет собой петлю, соединенную с конденсатором (Flat Loop-TF) [Yarmak, Long, 2002] (рис. 3).

Надежность этой системы была проверена в Виннипеге зимой 1993/94 г. и сопоставлена со слабонаклонными термосифонами, установленными рядом. После функционирования в течение зимы было обнаружено, что объем застывшего грунта вокруг Flat Loop-TF в 1.4 раза больше, чем у слабонаклонного термостабилизатора, и это доказывает его большую холодопроизводительность.

Вероятно, это обусловлено тем, что между слабонаклонным термостабилизатором и Flat Loop-TF имеется два принципиальных различия: 1) Flat Loop-TF устанавливается на подготовленном гранулированном основании; 2) диаметр трубы испарителя Flat Loop-TF составляет обычно 50 мм и имеет вид петли, в то время как у наклонного термостабилизатора испаритель представлен трубой 100-миллиметрового диаметра.

Функционирование термостабилизаторов достаточно хорошо изучено в работах, где рассмотрены температурные режимы функционирования и гидравлические свойства двухфазного потока хладагента [Елисеев, Сергеев, 1971; Тепловые трубы..., 1972; Петухов и др., 1974; Ивановский и др., 1978, 1980; Дан, Рей, 1979; Васильев, 1981; Чи, 1981; Эва и др., 1982; Различные области..., 1985; Тепловые трубы..., 1985; Васильев, Киселев, 1987; Вилемас и др., 1988; Пиоро, Пиоро, 1989; Пиоро и др., 1991; El-Genk, Saber, 1997]. Данные устройства отлично себя зарекомендовали, однако для условий России их эффективности не всегда достаточно ввиду масштабного гражданского и промышленного строительства в субарктической зоне. Поэтому были изобретены более эффективные системы температурной стабилизации грунтов, речь о которых пойдет ниже.

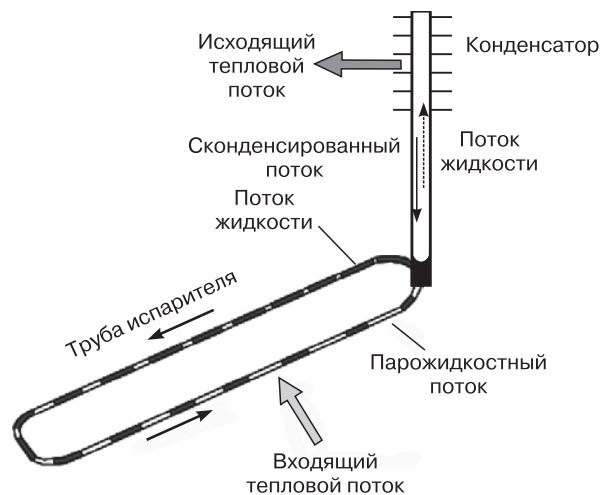


Рис. 3. Принципиальная схема Flat Loop-TF [Yarmak, Long, 2002].

Система температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем

Частным случаем такой системы является горизонтальная естественно действующая трубчатая система (ГЕТ) (рис. 4).

Системы данного вида, использующие в качестве хладагента аммиак, были разработаны ООО НПО “ФундаментСтройАркос” в начале 1990-х годов [Долгих и др., 2004] и нашли массовое применение при строительстве на мерзлых грунтах в России. В частности, можно привести пример обустройства таких месторождений, как Ванкорское нефтегазоконденсатное (560 шт.), Бованенковское НГКМ (289 шт.), Харасавэйское НГКМ (175 шт.), Самбургское ГКМ (164 шт.), Новоуренгойское НГКМ (127 шт.), Юрхаровское НГКМ (104 шт.) и многие другие. Всего НПО “ФундаментСтройАркос” было установлено более 2000 систем тем-

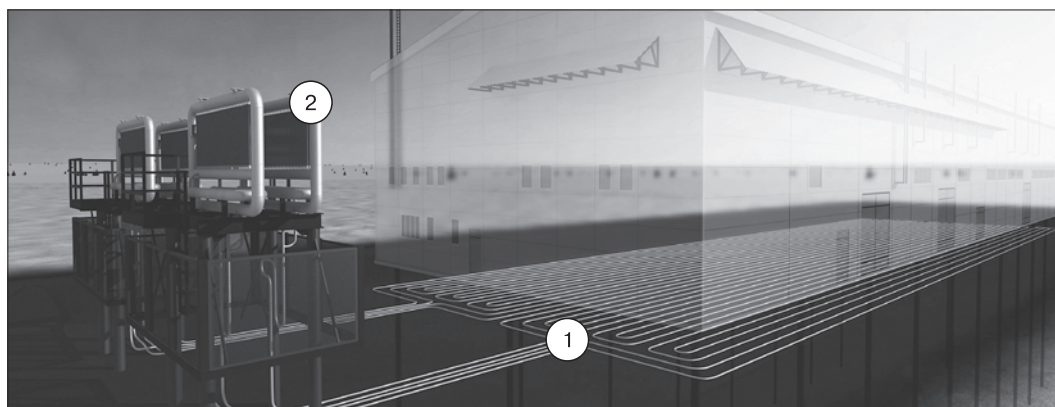


Рис. 4. Система ГЕТ [Системы..., 2014]:

1 – испаритель; 2 – конденсатор.

пературной стабилизации с горизонтальным окончанием испарителя.

Система представляет собой стальную конструкцию с тремя функциональными блоками: испаритель, конденсатор и ускоритель циркуляции. Испаритель выполнен в виде криволинейной конструкции с поворотами на $90\text{--}180^\circ$. Конденсатор имеет развитую поверхность оребрения площадью около 110 м^2 . Ускоритель циркуляции – труба диаметром, большим, чем испаритель, в которой происходит отделение паров хладагента от взвешенных капель за счет силы тяжести. Системы ТСГ с горизонтальным испарителем находят широкое применение при строительстве сооружений на свайном основании, с полами по грунту, резервуаров с основанием на отсыпке и др. (рис. 5).

Главным достоинством данной системы является способность замораживать большие объемы грунта под сооружениями, построенными на вечномёрзлых грунтах. В частности, для регионов с практически отсутствующими ветрами, например Якутии [Васильев, Торговкин, 1996; Павлов, 2003], имеется возможность установки промышленных холодильных машин на решетку оребрения конденсатора. Это увеличивает теплообмен между конденсатором и атмосферой, что, в свою очередь, увеличивает эффективность функционирования систем ТСГ.

Принцип запуска и дальнейшей работы системы такой же, как и в одиночном термостабилизаторе. Однако в случае функционирования систем ТСГ с горизонтальным испарителем и жидкость, и пар движутся в одном направлении. Таким образом, двухфазная парожидкостная смесь поступает в ускоритель циркуляции, где хладагент, находящийся в жидкой фазе, под действием силы тяжести стекает обратно в испаритель, а хладагент, находящийся в газовой фазе, поднимается в конденсатор, где конденсируется, отдавая теплоту,

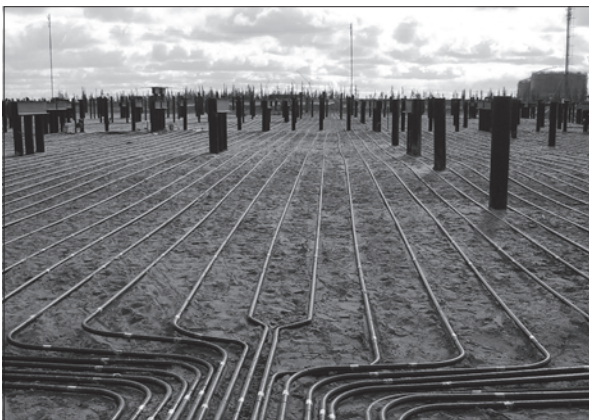


Рис. 5. Система типа “ГЕТ” в основании производственного здания. Ванкорское нефтегазоконденсатное месторождение [Долгих и др., 2004].

выделяемую при фазовом переходе, атмосфере через развитую решетку оребрения в соответствии с формулой (2). Далее сконденсированный и охлажденный хладагент под действием силы тяжести стекает обратно в испаритель.

Длина испарительной части в системе ТСГ с горизонтальным испарителем в основном составляет не более 400 м. Это связано с количеством хладагента, заправляемого в конденсаторный блок. Вообще, длина охлаждающих труб может достигать 800 м, данный подход применим на автомобильных и железных дорогах, где тепловые нагрузки на испарительную часть имеют малые значения. Но в этом случае необходимо дозaprавлять систему хладагентом.

Высота конденсаторного блока относительно охлаждающих труб обычно составляет 2,5 м, но может быть и выше. Это зависит от конструкции основания, длины охлаждающих труб и снеготаносов. Однако при высокоподнятых конденсаторных блоках необходимо учитывать дополнительные потери в системах. Теоретическому исследованию функционирования систем ТСГ с горизонтальным испарителем, а также циркуляции хладагента внутри установки посвящен ряд работ [Феклистов, 2008; Долгих, Окунев, 2011; Долгих и др., 2011a]. В [Рило, 2019] описан эксперимент, в ходе которого исследовались особенности протекания двухфазного процесса кипения хладагента в термосифоне, который выступает в роли термостабилизатора грунта, что помогает поддерживать определенную температуру в мерзлых грунтах. Экспериментальная установка была представлена системой типа “ГЕТ” с испарителем диаметром 33,7 мм и длиной горизонтальной части 300 м.

Были проанализированы режимы работы системы, включая зависимости параметров температуры, давления, перепада и градиента давления от плотности теплового потока. Был исследован обширный диапазон тепловой нагрузки – от 5 до 30 Вт/м. Эксперимент показал, что внутри испарительной части системы могут возникать пульсации давления, локальное выделение тепла и тепловые потоки, что указывает на сложность протекающих процессов. В ходе исследования были определены гидравлические потери в системе типа “ГЕТ”. Ключевым выводом работы является получение условий оптимальной организации теплообмена, при выполнении которых произойдет снижение температуры стенки испарителя на несколько градусов, что увеличит перепад температурного напора между мерзлым грунтом и стенкой испарителя и, как следствие, мощность и эффективность системы.

Вертикальная естественно действующая трубчатая система

На рис. 6 представлен общий вид вертикальной естественно действующей трубчатой системы

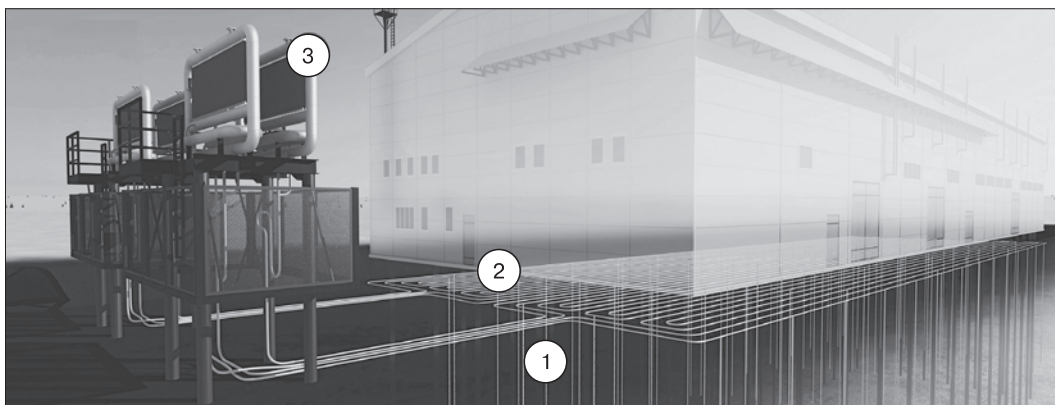


Рис. 6. Вертикальная естественно действующая трубчатая система [Долгих и др., 2004].

1 – вертикальные охлаждающие трубы, 2 – испаритель, 3 – конденсатор.

(ВЕТ), которая разработана на базе ООО НПО “ФундаментСтройАркас”.

Основным отличием системы ВЕТ от систем ТСГ с горизонтальным испарителем является наличие вертикальных охлаждающих труб в необходимых расчетных точках горизонтального испарителя. Длина этих труб варьируется в интервале 10–12 м, количество труб может достигать 30 шт. [Долгих и др., 2004]. За счет установки вертикальных трубок достигается более объемный эффект, поскольку грунт промораживается как за счет действия горизонтального испарителя, так и благодаря вертикальным охлаждающим трубам.

Глубинные сезонно-действующие охлаждающие устройства

Глубинные сезонно-действующие охлаждающие устройства предназначены для температурной стабилизации грунтов, залегающих в основании автомобильных дорог, плотин, а также для замораживания очаговой мерзлоты. Глубинное СОУ представляет собой герметичную неразъемную сварную конструкцию, заправленную хладагентом. Глубина подземной части, в зависимости от объекта замораживания, может достигать 100 м [Системы..., 2014].

Глубинные СОУ (рис. 7) имеют два размера диаметра подземной части (испарителя) – 57 и 89 мм, а также различную глубину погружения: 60, 70, 80, 90 и 100 м [Долгих и др., 2011б; Рило и др., 2015].

В испарителе также используется специальное внутреннее устройство (фитиль – капиллярная структура), предназначенное для разделения потоков жидкости и газа и более равномерного распределения жидкой фазы теплоносителя по поверхности испарителя [Попов, Самсонова, 2011]. Применение таких внутренних устройств позволяет получить наилучшие характеристики тепло-

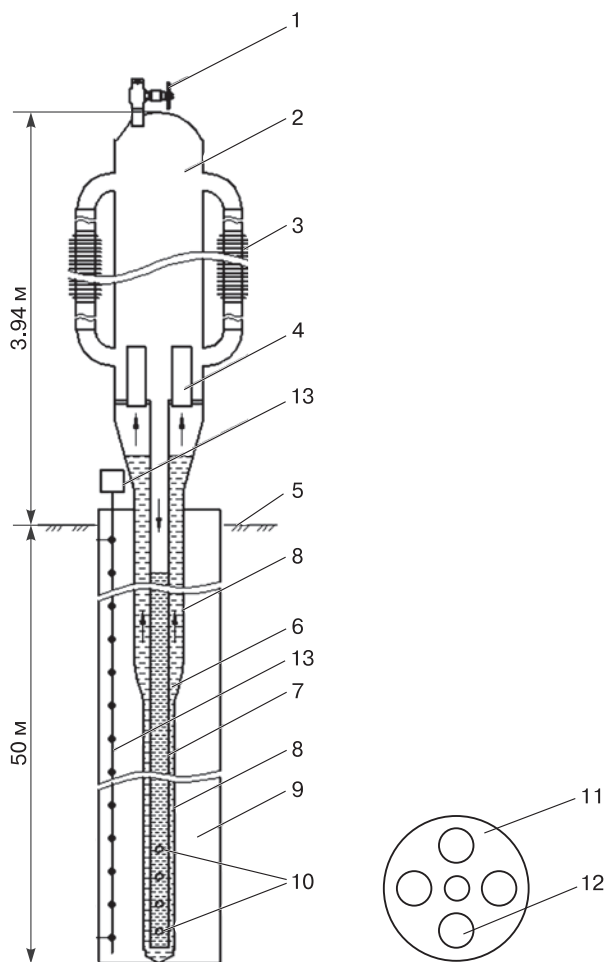


Рис. 7. Схема одиночного глубинного СОУ с глубиной погружения 50 м [Рило и др., 2015].

1 – вентиль подачи хладагента; 2 – термосифон; 3 – конденсатор; 4 – патрубки; 5 – грунт; 6 – межкольецовое пространство; 7, 8 – внешняя и внутренняя трубы; 9 – гильза; 10 – отверстия для перехода жидкого хладагента в кольцевое пространство; 11 – разделитель потока; 12 – отверстия в разделителе; 13 – термокоса.



Рис. 8. Одиночные глубинные СОУ, установленные на плотине р. Ирелях (г. Мирный) [Системы..., 2014; Спасенникова, 2015].

обмена в системе “СОУ – стенка испарителя – грунт” и увеличить полную тепловую мощность СОУ. В качестве теплоносителя используется двуокись углерода. Система монтируется и управляется на объекте установки [Долгих и др., 2011б].

Применение данных систем опробовано на Иреляхской плотине (г. Мирный) с различной глубиной погружения – 40, 50 и 80 м (рис. 8), а также на мерзлотном полигоне ООО НПО “ФундаментСтройАркас” с глубиной до 100 м [Долгих и др., 2011б; Паздерин, 2011].

В работе [Аникин, Ишков, 2023] приведена концептуальная схема нового СОУ с глубинной установкой испарительной части (глубинный напорный СОУ), а также его математическая модель функционирования. Показано, что с помощью этой модели можно оценить параметры работы глубинного напорного СОУ – от температурного режима до объемных расходных характеристик двухфазной смеси хладагента.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ТСГ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ

Согласно приведенной выше классификации систем ТСГ, можно сделать вывод, что в зависимости от объекта, где необходимо регулирование температурного режима ММП, есть варианты выбора. Так, например, нет необходимости монтировать площадную систему ТСГ с горизонтальным испарителем в основании опор трубопровода, а достаточно установить одиночный термосифон. Однако есть объекты, где необходима повышенная ответственность при планировании проектных ре-

шений, – гражданское многоэтажное строительство в субарктических широтах. Очевидно, что здесь необходимы мощные и надежные системы

Ранее проводились эксперименты с системами данного типа, где в качестве хладагента были использованы: ацетон [Горелик, 2015], аммиак [Ишков и др., 2018] и пропан. Авторами настоящей работы проведены исследования функционирования систем ТСГ на новом хладагенте – диоксиде углерода.

Таким образом, предложена экспериментальная установка, как на рис. 4, но работающая на диоксиде углерода и имеющая ряд конструктивных изменений. Выбор диоксида углерода в качестве теплоносителя обусловлен тем, что CO_2 является лучшим хладагентом для подобных установок вследствие наименьшего перепада температур между испарителем и конденсатором для запуска системы в работу [Аникин, Спасенникова, 2014]. Предлагаемые устройства начинают работать, когда грунт теплее атмосферы на десятые доли градуса, в то время как устройства, работающие на NH_3 (см. рис. 4), начинают функционировать, когда грунт теплее атмосферы на несколько градусов. Мощность установки, работающей на диоксиде углерода, может быть значительно больше, чем мощность установки на аммиаке.

Рассмотрим следующие выражения, которые позволяют рассчитать мощность систем ТСГ:

$$W = (t_{\text{cond}} - t_{\text{air}}) S \eta \alpha = \\ = ((t_{\text{cond}} - t_{\text{soil}}) + (t_{\text{soil}} - t_{\text{air}})) S \eta \alpha, \quad (3)$$

где W – мощность установки, Вт; t_{cond} – температура конденсатора, °C; t_{soil} – температура грунта на границе с трубой испарителя, °C; S – суммарная площадь оребрения конденсатора, м²; η – коэффициент эффективности ребер, д. е.; α – коэффициент теплоотдачи ребер, Вт/(м²·°C).

Как следует из [Аникин, Спасенникова, 2014], для аммиака значение разности температур $(t_{\text{cond}} - t_{\text{soil}}) = -0.53H$, для диоксида углерода равно $-0.13H$. Тогда из (3) получаем

$$W_{\text{NH}_3} = (-0.53H + (t_{\text{soil}} - t_{\text{air}})) S \eta \alpha; \quad (4)$$

$$W_{\text{CO}_2} = (-0.13H + (t_{\text{soil}} - t_{\text{air}})) S \eta \alpha. \quad (5)$$

Разделив выражение (5) на (4) и сократив числитель и знаменатель на величину $(t_{\text{soil}} - t_{\text{air}})$, получаем

$$\frac{W_{\text{CO}_2}}{W_{\text{NH}_3}} = \frac{1 - (0.13H)/(t_{\text{soil}} - t_{\text{air}})}{1 - (0.53H)/(t_{\text{soil}} - t_{\text{air}})}. \quad (6)$$

Соотношение мощностей системы ТСГ, заправленной CO_2 и NH_3 , рассчитанное по формуле (6), при перепадах температур между грунтом и

атмосферой ($t_{\text{soil}} - t_{\text{air}} = 2.65, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0$ °С составляет соответственно $W_{\text{CO}_2}/W_{\text{NH}_3} = \infty, 6.71, 2.48, 1.85, 1.27$. Высота подъема конденсаторной части составляет 5 м. Как следует из этих данных, мощность установки, работающей на диоксиде углерода, всегда значительно больше мощности установки, работающей на аммиаке, а при разнице между температурой грунта и температурой воздуха менее 2.65 °С установка на NH_3 вообще не работает, что является большим недостатком существующих установок, работающих на аммиаке.

Другими словами, отношение мощностей показывает, в том числе, что там, где необходимо было применять три установки на аммиаке, достаточно одной на диоксиде углерода, что позволяет получить существенную экономическую выгоду. Кроме того, использование CO_2 в качестве хладагента позволяет сократить количество конденсаторов и длину испарительной части, которые составляют большую часть стоимости установки охлаждения грунтов [Ишков, Аникин, 2020].

В [Ишков и др., 2019] обосновано, что системы, заправленные диоксидом углерода, работают более эффективно, что обусловлено двумя факторами: 1) меньшее значение нижней критической тепловой нагрузки (это дает большее количество рабочих дней в году относительно системы, заправленной аммиаком); 2) испарительная часть системы на диоксиде углерода имеет температуру в среднем на 1 °С ниже, чем системы на аммиаке. Полученные результаты позволяют сделать вы-

вод, что диоксид углерода в качестве теплоносителя для систем ТСГ с горизонтальным испарителем является наиболее эффективным.

Предлагаемая экспериментальная установка отличается от описанных выше тем, что трубы испарительной системы не помещены под землю, а теплоизолированы и нагреваются электрическим током. Это позволяет получать заданные тепловые нагрузки, а также зависимости между тепловой нагрузкой и такими параметрами, как температура хладагента, поток жидкости, поток пара и др.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка представляет собой герметичную конструкцию, где испаритель сообщается с конденсатором (рис. 9–11) [Мельников и др., 2019, 2020]. Испаритель представляет собой герметичную стальную трубу диаметром 32 мм, толщиной стенки 3 мм и длиной 304 м. Труба испарителя покрыта теплоизоляцией (скорлупой из пенополиуретана) диаметром 120 мм для предотвращения влияния внешних факторов. Конденсатор состоит из 48 соединенных между собой труб диаметром 102 мм и толщиной стенки 4 мм. Трубы конденсатора имеют оребрение. Каждое ребро представляет собой квадрат, изготовленный из алюминия со стороной 0.10 м. Суммарная площадь оребрения составляет 76.36 м².

Жидкость в конденсаторе имеет уровень, который может меняться в ходе проведения эксперимента (рис. 12).



Рис. 9. Общий вид экспериментальной установки:

а – испаритель (на переднем плане) и конденсатор (на заднем); *б* – конденсатор.



Рис. 10. Испарительная система экспериментальной установки.

Трубы 1 и 2 образуют такой угол с горизонтальной поверхностью, чтобы пар мог двигаться только в одном направлении от 1 к 2.

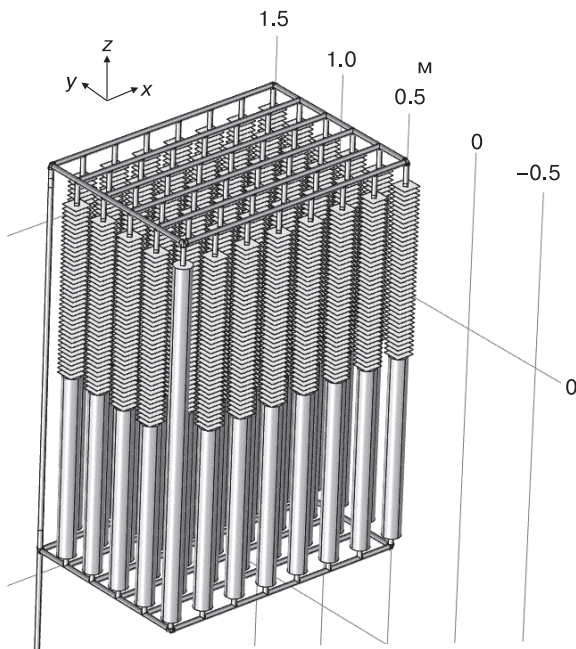


Рис. 11. Схема конденсатора горизонтальной испарительной системы.

На входе в конденсатор расположена труба (стрелка вверх слева на рис. 12), конец которой всегда находится выше уровня жидкости в конденсаторе. Она выполняет функцию гидрозатвора, обеспечивающего движение жидкости в направлении от входа в конденсатор к выходу из него. Конденсатор находится выше труб испарителя на 3.10 м. Тепловой поток на трубы испарителя осуществляется путем подачи на него электрического тока, вследствие чего они нагреваются (рис. 13).

Переменный ток подается на трубы испарителя через понижающий трансформатор. Одна клемма трансформатора соединена с точкой А, другая – с точками В. Так как труба входа в конденсатор и труба выхода из него имеют один и тот же электрический потенциал, то ток через конденсатор не течет. Температура труб испарителя измерялась термометрическими датчиками T_1 , T_2 и T_3 , расположенными в начале, середине и конце испарителя (см. рис. 13). Температура оребрения конденсатора измерялась температурными датчиками T_4 , T_5 и T_6 (см. рис. 12). Температура воздуха измерялась датчиком T_9 , вынесенным на некоторое расстояние от установки. Скорость течения жидкого хладагента на выходе из конденсатора определялась ультразвуковым расходомером StreamLux SLS-700F.

Следует отметить, что система может быть достаточно быстро и качественно собрана из доступных отечественных материалов и полностью готова к промышленному внедрению.

Ранее [Мельников и др., 2019, 2020] были проведены экспериментальные исследования функционирования разработанной системы, заправленной диоксидом углерода. На первом этапе экспериментов определялась концептуальная спо-

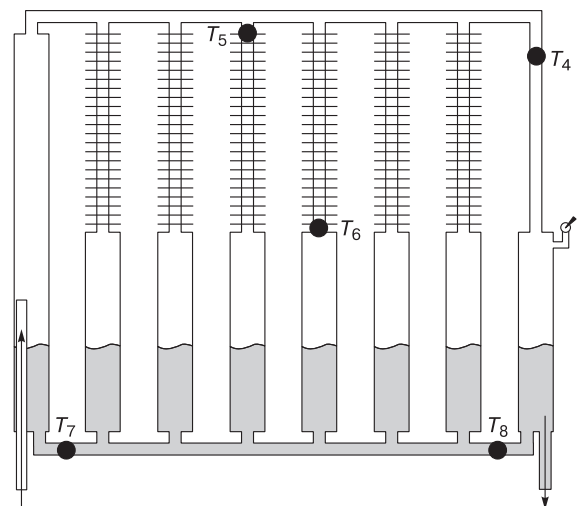


Рис. 12. Уровень жидкости в конденсаторе (серый цвет).

T_i – термометрические датчики.

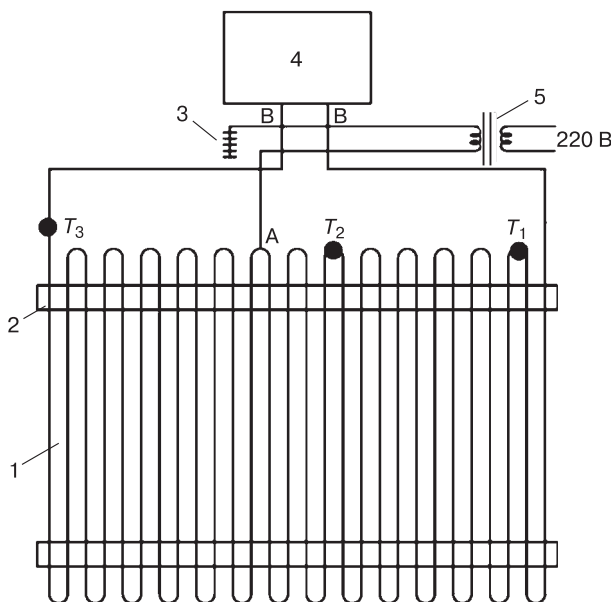


Рис. 13. Вид установки сверху.

1 – трубы в скорлупе из пенополиуретана, 2 – подложка поверхности установки системы, 3 – заземление, 4 – конденсатор, 5 – понижающий трансформатор; T_i – термометрические датчики. А, В – пояснения в тексте.

способность работы системы на CO_2 , а также изучался режим функционирования системы ТСГ. Примерно через 2 ч система выходит на работу в стационарном режиме, что позволяет системе начинать работать в первые заморозки, тогда как для систем на аммиаке необходимо большее время для выхода на режим.

После экспериментов по определению времени выхода экспериментальной установки на стационарный режим перешли ко второму этапу исследований – определению функционирования системы при различных тепловых нагрузках. В ходе проведения экспериментов при подаче тепловых нагрузок на испаритель ниже 2 кВт были зафиксированы пульсации потока жидкости из конденсатора в испаритель. Всего было проведено четыре серии экспериментов с низкими значениями тепловой нагрузки: 0.734, 1.05, 1.51 и 2.05 кВт. В результате обработки экспериментальных данных установлено, что при мощностях выше 3.60 кВт наблюдается стационарный режим течения. Это позволяет сделать вывод о наличии такого пограничного значения тепловой нагрузки на испаритель, при превышении которого хладагент (диоксид углерода) будет циркулировать более равномерно, что напрямую скажется на эффективности системы (рис. 14).

На основе полученной в рамках эксперимента информации появляется возможность выбора такой конфигурации системы ТСГ с горизонталь-

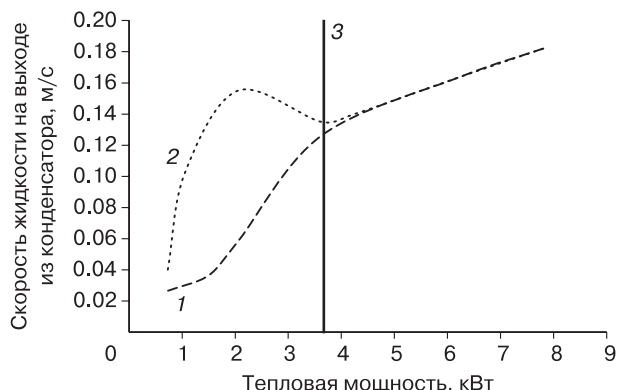


Рис. 14. Зависимость скорости жидкости на выходе из конденсатора от мощности, подаваемой на испаритель.

1 – пульсирующий режим с изменением направления скорости потока; 2 – пульсирующий режим без изменения скорости потока; 3 – тепловая нагрузка, при которой система выходит на стационарный режим работы.

ным испарителем под сооружением, чтобы не было флуктуирующего режима течения хладагента и была возможность предупредить риски растепления грунтов. Математическая модель [Ишков и др., 2018; Ишков, 2020; Ишков, Аникин, 2020] позволяет вычислить оптимальные длину испарителя, шаг укладки и число конденсаторных блоков под конкретным объектом в рассматриваемом геокриологическом районе, что будет сопряжено с оптимизацией затрат на установку систем и поддержанием их в рабочем режиме на весь срок эксплуатации.

В рамках работы [Ишков, Аникин, 2020] было рассчитано 12 вариантов конфигураций системы ТСГ с горизонтальным испарителем при укладке под резервуар с горячей нефтью на Ванкорском месторождении. В качестве параметров варьирования выступали: шаг укладки между трубами испарителя, длина испарителя, количество конденсаторных блоков. Для каждого из этих вариантов была применена стохастическая постановка по методу Монте-Карло (48 решений). В общей сложности было решено 576 прогнозных задач. Вычисления проводились на суперкомпьютере НКС-30Т Сибирского суперкомпьютерного центра. Для оценки того, является ли грунт под системой ТСГ талым или мерзлым, рассматривалась плоскость сечения, проходящая через центр резервуара параллельно трубам охлаждающей системы, т. е. в самой опасной плоскости, ввиду больших теплоточков от резервуара и отсутствия охлаждающего эффекта от дневной поверхности.

Стохастический подход позволил рассчитать вероятность нахождения грунта в талом или мерзлом состоянии под обозначенным сечением (см. таблицу).

Вероятность нахождения грунта в талом состоянии под плоскостью сечения, проходящей через центр резервуара параллельно трубам охлаждающей системы, для различных конструктивных конфигураций системы ТСГ с горизонтальным испарителем

Расстояние между трубами испарителя	0.5 м				1.0 м				1.5 м			
Общая длина труб испарителя	3214 м				1606 м				1054 м			
Количество конденсаторных блоков	10	7	4	1	10	7	4	1	10	7	4	1
Вероятность нахождения грунта в талом состоянии	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81
	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81
	99.80	99.80	99.80	99.80	99.80	99.80	99.80	99.81	99.80	99.80	99.80	99.81
	99.73	99.73	99.74	99.78	99.75	99.76	99.76	99.79	99.77	99.78	99.78	99.80
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.02	0.02	0.04	0.56	0.03	0.04	0.07	0.81	0.07	0.09	0.15	1.23
	0.09	0.12	0.20	1.84	0.19	0.24	0.38	2.76	0.43	0.52	0.79	3.99
	0.15	0.20	0.33	2.52	0.34	0.41	0.65	3.94	0.77	0.90	1.35	5.25
	0.17	0.23	0.38	2.74	0.39	0.48	0.75	4.32	0.91	1.07	1.59	5.67
	0.18	0.24	0.39	2.79	0.41	0.50	0.77	4.43	0.95	1.12	1.67	5.80
	0.18	0.24	0.39	2.81	0.41	0.50	0.78	4.47	0.97	1.14	1.70	5.85
	0.18	0.24	0.39	2.81	0.41	0.50	0.78	4.47	0.97	1.14	1.70	5.86
	0.18	0.24	0.39	2.79	0.41	0.50	0.78	4.47	0.97	1.14	1.70	5.85
	0.18	0.24	0.39	2.79	0.41	0.50	0.77	4.43	0.96	1.13	1.68	5.80
	0.17	0.23	0.38	2.74	0.39	0.48	0.75	4.32	0.92	1.09	1.61	5.68
	0.15	0.20	0.33	2.52	0.34	0.41	0.65	3.94	0.80	0.95	1.40	5.27
0.09	0.12	0.20	1.84	0.19	0.24	0.38	2.76	0.47	0.56	0.85	4.01	
0.02	0.02	0.04	0.56	0.03	0.04	0.07	0.81	0.08	0.10	0.16	1.20	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
99.73	99.73	99.74	99.78	99.75	99.76	99.76	99.79	99.79	99.79	99.79	99.81	
99.80	99.80	99.80	99.80	99.80	99.80	99.80	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	
99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	
99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	99.81	

Вероятности нахождения грунта в талом состоянии представлены на начало осени (15 сентября). По этой причине на краях расчетной области, т. е. области, на которой отсутствуют резервуар и система ТСГ и где осуществляется теплообмен с атмосферой, вероятность нахождения грунта в талом состоянии практически 100 %.

На основе полученных данных был сделан вывод, что система температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем успешно функционирует в подавляющем большинстве случаев. Единственный вариант, когда система ТСГ вызвала опасения с точки зрения надежности охлаждения мерзлых грунтов, соответствует случаю с использованием одного конденсаторного блока.

В рамках третьего этапа экспериментов был исследован характер потоков хладагента внутри системы ТСГ с горизонтальным испарителем (рис. 15). Периоды колебаний потоков жидкого диоксида углерода 0.53, 0.46, 0.43, 0.40 0.39 ч соответствуют тепловой нагрузке на испаритель 3.56, 5.08, 5.45, 7.63, 8.52 Вт/м.

По мере того как в испарителе образуется определенное количество пара, он начинает движение в конденсатор, увлекая за собой жидкость. Затем на входе в конденсатор поток усиливается и достигает максимума. Поток на выходе при этом становится положительным – система запустилась в работу.

Средняя скорость течения жидкого диоксида углерода может быть рассчитана по значению потока по формуле

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2 3600} = \frac{Q}{1.911}, \quad (7)$$

где v – скорость течения жидкого хладагента, м/с; Q – объемный поток жидкого хладагента, м³/ч; d – внутренний диаметр труб, мм ($d = 26$ мм).

Разница между объемными потоками жидкой фазы хладагента на входе и выходе из конденсатора обусловлена тем, что при стабильной работе системы ТСГ на выходе из конденсатора вся фаза будет представлена жидкостью, так как произошел фазовый переход из пара в жидкость, а на вхо-

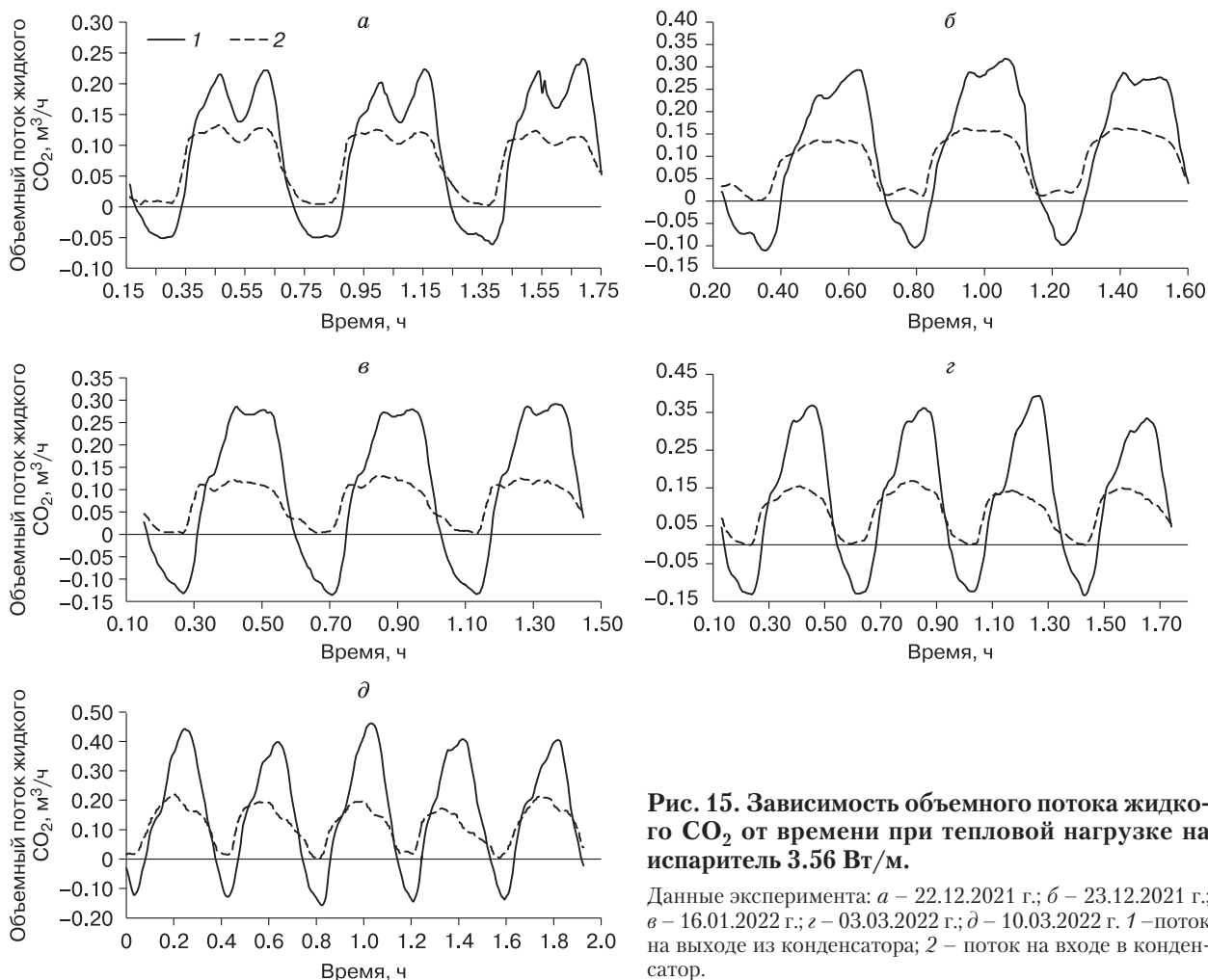


Рис. 15. Зависимость объемного потока жидкого CO_2 от времени при тепловой нагрузке на испаритель 3.56 Вт/м.

Данные эксперимента: а – 22.12.2021 г.; б – 23.12.2021 г.; в – 16.01.2022 г.; г – 03.03.2022 г.; д – 10.03.2022 г. 1 – поток на выходе из конденсатора; 2 – поток на входе в конденсатор.

де в конденсатор (в конце испарителя) часть жидкости закипела, перейдя в пар.

Как и на предыдущих этапах исследования, видна четкая периодическая структура потока хладагента во времени. Понимание этих процессов позволяет уточнить критерии применимости той или иной конфигурации системы ТСГ в любых геотехнических системах.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе дан подробный обзор применяемых методов температурной стабилизации мерзлых грунтов с акцентом на системы ТСГ с горизонтальным испарителем. Авторами предложена новая экспериментальная установка для температурной стабилизации мерзлых грунтов, работающая на диоксиде углерода и имеющая ряд конструктивных изменений, способствующих ее более эффективному функционированию относительно аналогов.

Горизонтальная испарительная система охлаждения грунта успешно функционирует (ско-

рость жидкости на выходе из конденсатора 0.156 м/с, температура испарителя выше температуры конденсатора на 0.46 °С). Низкое значение перепада температур обусловлено применением диоксида углерода в качестве хладагента с его низким термическим сопротивлением.

Система выходит на стационарный режим функционирования через 2 ч после включения. Система на диоксиде углерода значительно эффективнее охлаждает грунт, чем аналогичная система на аммиаке.

Согласно экспериментальным исследованиям на полномасштабном стенде, предложенная система запускается в работу при разнице температур между испарителем и конденсатором порядка 0.1 °С, тогда как у системы-аналога эта величина составляет несколько градусов Цельсия. Это позволяет системе запускаться в работу раньше и функционировать большее количество дней в году, что сказывается непосредственно на температуре мерзлого грунта и его несущей способности.

Обнаружено три режима течения хладагента в установке: стационарный (при больших мощностях), пульсирующий с изменением направления скорости, пульсирующий без изменения направления скорости. При всех трех режимах установка работала и эффективно отводила тепло от испарителя в атмосферу. Показано, что при тепловых нагрузках на испарительную часть выше 3.6 кВт наблюдается стационарный режим течения хладагента. Нахождение этого значения позволяет подобрать наилучшую конфигурацию системы для конкретного объекта эксплуатации.

Режим течения в диапазоне исследуемых тепловых нагрузок от 3.56 до 8.52 Вт/м имеет импульсный характер.

Применение данной системы температурной стабилизации позволяет снизить стоимость строительства на 53 % по сравнению с проветриваемым подпольем со свайным полем, а также более чем в 2 раза сократить сроки выполнения работ. Ввиду большей эффективности разработанной системы ее применение возможно в тех геокриологических зонах, где система-аналог не способна подерживать грунт в мерзлом состоянии.

Применение разработанной системы ТСГ с горизонтальным испарителем, в силу ее лучшей эффективности по сравнению с аналогами, позволит значительно сократить риски растепления мерзлых грунтов на объектах эксплуатации, что положительно скажется на охраноспособности. Особенно это актуально на опасных производствах, работающих с вредными веществами, попадание которых в грунты оставляет существенный экологический след.

***Благодарности.** Работа выполнена по госзаказу «Теплофизические, химические, механические свойства промерзающих, мерзлых и оттаивающих пород. Теоретические основы инженерного мерзлотоведения (FWRZ-2021-0007)».*

Литература

- Аникин Г.В., Ишков А.А.** Математическая модель функционирования глубинного напорного сезонно-действующего охлаждающего устройства. М., 2023. Деп. в ВИНТИ РАН 27.12.2023, № 54-В2023.
- Аникин Г.В., Спасенникова К.А.** О выборе хладагента для сезонных охлаждающих устройств типа «ГЕТ» // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 31–33.
- Васильев И.С.** Влияние климата на температуру и мощность оттаивающих почвогрунтов / И.С. Васильев, Я.И. Торговкин. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 1996, с. 37–45.
- Васильев Л.Л.** Теплообменники на тепловых трубах. Минск, Наука и техника, 1981, 143 с.
- Васильев Л.Л.** Теплообменники – утилизаторы на тепловых трубах / Л.Л. Васильев, В.Г. Киселев. Минск, Наука и техника, 1987, 200 с.
- Вилемас Ю.В.** Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи / Ю.В. Вилемас, Г.И. Воронин, Б.В. Дзюбенко. Вильнюс, Моксалас, 1988, 188 с.
- Вялов С.С.** Термосвай в строительстве на Севере / С.С. Вялов, С.Э. Городецкий, Ю.А. Александров. Л., Стройиздат, 1983, 230 с.
- Вялов С.С., Александров Ю.А., Миренбург Ю.С., Федосеев Ю.Г.** Искусственное охлаждение грунтов с помощью термосвай // Инженерное мерзлотоведение: Сб. М., Наука, 1979, с. 72–91.
- Гамзаев Р.Г., Кроник Я.А.** Системы термостабилизации грунта при строительстве в криолитозоне // Материалы пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., МГУ, с. 245–252.
- Гапеев С.И.** Рекомендуемые мероприятия и экспериментальные исследования по охлаждению многолетнемерзлых грунтов с целью их укрепления и повышения верхней границы залегания: Информ. письмо № 22. Л., Ленгипротранс, 1957, с. 2–17.
- Горелик Я.Б.** Причины неустойчивой работы двухфазного естественно-конвективного охлаждающего устройства с горизонтальным испарителем // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 4, с. 81–93.
- Горелик Я.Б., Селезнев А.А.** Об эффективности оребрения вертикальных двухфазных естественно-конвективных охлаждающих устройств для строительства на мерзлых грунтах // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 2, с. 78–89.
- Дан П.Д.** Тепловые трубы / П.Д. Дан, Д.А. Рей. М., Энергия, 1979, 272 с.
- Долгих Г.М., Долгих Д.Г., Окунев С.Н.** Технические решения по замораживанию грунтов оснований, применяемые НПО «ФундаментСтройАркас» // Материалы Междунар. конф. «Криосфера нефтегазоносных провинций» (Тюмень, 17–21 мая 2004 г.). Тюмень, 2004, с. 56.
- Долгих Г.М., Окунев С.Н.** Исследование систем температурной стабилизации грунтов на опытно-промышленном полигоне // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. по инженерному мерзлотоведению, посвящ. XX-летию создания ООО НПО «ФундаментСтройАркас». Тюмень, Сити-Пресс, 2011, с. 36–42.
- 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 // Там же, 2011а, с. 25–31.
- Долгих Г.М., Окунев С.Н., Стрижков С.Н. и др.** Исследование ТК с использованием климатических камер и в условиях опытно-промышленного полигона // Там же, 2011б, с. 88–94.
- Дубина М.М., Коновалов В.В., Черняков Ю.А.** Моделирование термомеханического взаимодействия инженерных сооружений с грунтами // Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. Новосибирск, Наука, 1996, т. 1, 136 с.
- Елисеев В.Б.** Что такое тепловая труба? / В.Б. Елисеев, Д.И. Сергеев. М., Энергия, 1971, 136 с.
- Ивановский М.Н.** Физические основы тепловых труб / М.Н. Ивановский, В.П. Сорокин, И.В. Ягодкин. М., Атомиздат, 1978, 256 с.
- Ивановский М.Н.** Технологические основы тепловых труб / М.Н. Ивановский, В.П. Сорокин, Б.А. Чулков, И.В. Ягодкин. М., Атомиздат, 1980, 160 с.
- Ишков А.А.** Математическое моделирование функционирования систем температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2020, 23 с.
- Ишков А.А., Аникин Г.В.** Определение оптимального шага укладки между трубами испарителя и количества конден-

- саторных блоков системы температурной стабилизации грунтов ГЕТ // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2020, т. 6, № 1 (21), с. 100–117.
- Ишков А.А., Аникин Г.В., Долгих Г.М., Окунев С.Н.** Сравнение результатов физико-математического моделирования системы “ГЕТ” с экспериментальными данными // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 5, с. 57–64.
- Ишков А.А., Губарьков А.А., Аникин Г.В.** Определение эффективности функционирования систем температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем, направленных разными хладагентами // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2019, т. 5, № 4, с. 37–57.
- Комаров И.А.** Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах. М., Науч. мир, 2003, 608 с.
- Макаров В.И.** Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск, Наука, 1985, 169 с.
- Мельников В.П., Аникин Г.В., Ишков А.А., Андрианов И.Е.** Исследование двухфазных потоков диоксида углерода при охлаждении грунтов горизонтальной испарительной системой // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 6, с. 47–56.
- Мельников В.П., Аникин Г.В., Ишков А.А. и др.** Исследование режимов течения диоксида углерода в системах температурной стабилизации грунтов в зависимости от тепловой нагрузки // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 3, с. 58–66.
- Мельников В.П., Дроздов Д.С., Малкова Г.В.** Климатические и криогенные факторы обустройства северных территорий // Изв. вузов. Геология и разведка, 2009, т. 15, № 6, с. 75–83.
- Павлов А.В.** Мерзлотно-климатические изменения на севере России: наблюдения, прогноз // Изв. РАН. Сер. геогр., 2003, № 6, с. 39–50.
- Паздерин Д.С.** Натурные исследования глубинных СО₂ в условиях опытно-промышленного полигона // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов “Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера” (Тюмень, 20 апреля 2011 г.). Тюмень, 2011, с. 47–51.
- Петухов Б.С.** Теплообмен в ядерных энергетических установках / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев. М., Атомиздат, 1974, 407 с.
- Пиоро И.Л.** Эффективные теплообменники с двухфазными термосифонами / И.Л. Пиоро, В.А. Антоненко, Л.С. Пиоро. Киев, Наук. думка, 1991, 248 с.
- Пиоро Л.С.** Двухфазные термосифоны и их применение в промышленности / Л.С. Пиоро, И.Л. Пиоро. Киев, Наук. думка, 1989, 136 с.
- Попов А.П., Милованов В.И., Рябов В.А.** Совершенствование способа управления криогенным ресурсом оснований при проектировании нулевых циклов зданий и сооружений // Геотехника, 2010, № 6, с. 4–22.
- Попов А.П., Самсонова В.В.** Инновационные аспекты использования естественных криогенных ресурсов для обеспечения механической безопасности зданий и сооружений в криолитозоне // Геотехника, 2011, № 5, с. 4–21.
- Различные области применения холода** / Под ред. А.В. Быкова. М., Агропромиздат, 1985, 272 с.
- Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезонно-действующих охлаждающих устройств** / Под ред. С.С. Вялова. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1983, 124 с.
- Рило И.П.** Экспериментальное исследование двухфазного процесса кипения двуокиси углерода в термостабилизаторе грунта // Нефть и газ Сибири, 2019, № 2 (35), с. 56–63.
- Рило И.П., Желудкова К.А., Клецин Д.А.** Замораживание и термостабилизация грунтов в криолитозоне // Трубопроводный транспорт: Теория и практика, 2015, № 4 (50), с. 22–27.
- 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.
- Спасеникова К.А.** Компьютерное моделирование тепло- и массопереноса в грунтах под сооружениями, построенными на вечной мерзлоте с использованием сезонных охлаждающих устройств: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2015, 19 с.
- Способ замораживания грунта:** пат. № 68155 СССР / Бликер Б.М., Цинман Б.М.; опубл. 1945, Бюл. изобр.
- Тепловые трубы** / Под ред. Э.Э. Шпильрайна. М., Мир, 1972, 421 с.
- Тепловые трубы и теплообменники с использованием пористых материалов** / Под ред. Л.Л. Васильева. Минск, ИТМО АН БССР, 1985, 178 с.
- Феклистов В.Н.** 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 апреля 2008 г.). Тюмень, 2008, т. 2, с. 165–168.
- Чи С.** Тепловые трубы: Теория и практика. М., Машиностроение, 1981, 207 с.
- Эва В.** Низкотемпературные тепловые трубы / В. Эва, И. Асакавичюс, В. Гайгалис. Вильнюс, Мокслас, 1982, 184 с.
- El-Genk M.S., Saber H.H.** Flooding limit in closed, two-phase flow thermosyphons // Int. J. Heat Mass Transfer, 1997, vol. 40, No. 9, p. 2147–2164.
- Farouki O.T.** Thermal properties of soils. Zellerfeld, Germany, TransTech Publ., 1986, 136 p.
- Hayley D.W., Horne B.** Rationalizing climate change for design of structures on permafrost: A Canadian perspective // Proc. of the Ninth Int. Conf. on Permafrost (Fairbanks, 29 June – 3 July 2008). Fairbanks, USA, Univ. Alaska, 2008, p. 681–686.
- Haynes F.D., Zarling J.P.** Thermosyphons and foundation design in cold regions // Cold Reg. Sci. Technol., 1988, vol. 15, p. 251–259.
- Holubec I.** Flat loop thermosyphon foundations in warm permafrost // Rep. submitted to the Government of the Northwest Territories, Asset Management Division. N.Y., Departm. Public Works and Serv., and Public Infrastr. Eng. Vulnerability Committee, 2008, p. 83.
- Holubec I.** Geotechnical site investigation guidelines for building foundations in permafrost // Rep. submitted to the Government of the Northwest Territories. N.Y., Departm. Public Works and Serv., 2010, p. 48.
- Hwang C.T.** Predictions and observations on the behaviour of a warm gas pipeline on permafrost // Can. Geotech. J., 1976, vol. 13, No. 4, p. 452–480.
- Long E.L.** The long thermopile // Proc. of the First Int. Conf. on Permafrost (Purdue, 11–15 November 1963). Purdue, USA, Purdue Univ., US Nat. Acad. Sci., 1963, p. 487–490.
- Permafrost engineering design and construction** / G.H. Johnston (ed.). Toronto, Wiley and Sons, 1981, 540 p.
- Yarmak Jr.E., Long E.L.** Recent developments in thermosyphon technology // Proc. of the 11th Int. Conf. on Cold Regions Engineering (Anchorage, 20–22 May 2002). Anchorage, Alaska, USA, 2002, p. 656–662.

References

- Anikin G.V., Ishkov A.A. Matematicheskaya model funktsionirovaniya glubinnogo napornogo sezonno-deistvuyushchego okhlazhdayushchego ustroystva [Mathematical model of operation of a deep pressure seasonal-acting cooling device]. Moscow, 2023. Dep. in VINITI RAN, 27.12.2023, No. 54-B2023.
- Anikin G.V., Spasennikova K.A. On the choice of refrigerating fluid for type "GET" systems for seasonal cooling. *Earth's Cryosphere*, 2014, vol. XVIII, No. 2, p. 26–28.
- Vasiliev I.S., Torgovkin Y.I. Vliyanie klimata na temperaturu i moshchnost' ottaivayushchikh gruntov [Climate influence on temperature and thickness of thawing soil]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 1996, p. 37–45 (in Russian).
- Vasiliev L.L. Teploobmenniki na teplovykh trubakh [Heat exchangers on heat pipes]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1981, 143 p. (in Russian).
- Vasiliev L.L., Kiselev V.G. Teploobmenniki – utilizatory na teplovykh trubakh [Heat exchangers – utilizers on heat pipes]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1987, 200 p. (in Russian).
- Vilemas Yu.V., Voronin G.I., Dzyubenko B.V. Intensifikatsiya teploobmena [Heat exchange intensification. Successes of Heat Transfer]. Vilnius, Moksalas, 1988, 188 p. (in Russian).
- Vyalov S.S., Gorodetsky S.E., Alexandrov Y.A. Termosvai v stroitelstve na Severe [Thermo-piles in construction in the North]. Leningrad, Stroyizdat, 1983, 230 p. (in Russian).
- Vyalov S.S., Aleksandrov Yu.A., Mirenburg Yu.S., Fedoseev Yu.G. Artificial cooling of soils with the help of thermal piles. In: *Inzhenernoe merzlotovedenie [Engineering Permafrost Science]*. Moscow, Nauka, 1979, p. 72–91 (in Russian).
- Gamzaev R.G., Kronik Y.A. Systems of soil thermal stabilization during construction in the cryolithozone. In: *Proc. of the Fifth Conference of Geocryologists of Russia*. Moscow, Moscow State University, 2016, p. 245–252 (in Russian).
- Gapeev S.I. Recommended measures and experimental studies on cooling of permafrost soils in order to strengthen them and increase the upper boundary of occurrence: Information letter No. 22. Leningrad, Lengiprotrans, 1957, p. 2–17.
- Gorelik J.B. Operation of two-phase thermosyphons with horizontal evaporator tubes: causes of instability. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 4, p. 81–93.
- Gorelik J.B., Seleznev A.B. Efficiency of finning in short vertical two-phase thermosyphons for construction on permafrost. *Earth's Cryosphere*, 2016, vol. XX, No. 2, p. 69–77.
- Dan P.D., Rey D.A. Teplovye trubyy [Heat tubes]. Moscow, Energiya, 1979, 272 p. (in Russian).
- Dolgikh G.M., Dolgikh D.G., Okunev S.N. Technical solutions for freezing of foundation soils applied by NPO "Fundamentstroyarkos" // *Proc. of the Int. Conf. "Cryosphere of oil and gas bearing provinces"*. Tyumen, 2004, p. 56 (in Russian).
- Dolgikh G.M., Okunev S.N. Investigation of soil temperature stabilization systems at the experimental site. In: *Proc. of the Int. Scientific and Practical Conf. on Engineering Permafrost Science, dedicated to the XX anniversary of NPO "Fundamentstroyarkos" LLC*. Tyumen, City-Press, 2011, p. 36–42 (in Russian).
- Dolgikh G.M., Okunev S.N., Melnikova E.A. et al. Deep collector LDS – a new step in the construction of unique objects on the example of Vilyuyanskaya HPP-Z. *Ibid.*, 2011a, p. 25–31 (in Russian).
- Dolgikh G.M., Okunev S.N., Strizhkov S.N. et al. Investigation of TC with the use of climatic chambers and in the conditions of a pilot test site. *Ibid.*, 2011b, p. 88–94 (in Russian).
- Dubina M.M., Kononov V.V., Chernyakov Y.A. Modeling of thermomechanical interaction of engineering structures with soils. In: *Inzhenerno-geologicheskii monitoring promyslov Yamala [Engineering-geological monitoring of Yamal fields]*. Novosibirsk, Nauka, 1996, vol. 1, 136 p. (in Russian).
- Eliseev V.B., Sergeev D.I. Chto takoe teplovaya truba? [What is a heat pipe?]. Moscow, Energiya, 1971, 136 p. (in Russian).
- Ivanovskiy M.N., Sorokin V.P., Yagodka I.V. Fizicheskie osnovy teplovykh trub [Physical basis of heat tubes]. Moscow, Atomizdat, 1978, 256 p. (in Russian).
- Ivanovsky M.N., Sorokin V.P., Chulkov B.A., Yagodka I.V. Tekhnologicheskie osnovy teplovykh trub [Technological bases of heat pipes]. Moscow, Atomizdat, 1980, 160 p. (in Russian).
- Ishkov A.A. Mathematical modeling of functioning of the systems of temperature stabilization of soils with a horizontal evaporator: The autoref. disc. ... Candidate of Technical Sciences. Tyumen, 2020, 23 p. (in Russian).
- Ishkov A.A., Anikin G.V. Determination of the optimal stacking step between the evaporator tubes and the number of condenser blocks of the GET system of the ground temperature stabilization (in Russian). *Vestnik Tyumen. Universiteta [Vestnik of Tyumen State University. Physico-mathematical modeling. Oil, Gas, Energy]*, 2020, vol. 6, No. 1 (21), p. 100–117.
- Ishkov A.A., Anikin G.V., Dolgikh G.M., Okunev S.N. Horizontal evaporator tube (HET) thermosyphons: physical-mathematical modeling and experimental data, compared. *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. XXII, No. 5, p. 51–56.
- Ishkov A.A., Gubarkov A.A., Anikin G.V. Determination of the functioning efficiency of temperature stabilization systems with a horizontal evaporator filled with different refrigerants. *Vestnik Tyumen. Universiteta [Bulletin of Tyumen State University. Physico-mathematical modeling. Oil, Gas, Energy]*, 2019, vol. 5, No. 4, p. 37–57.
- Komarov I.A. Termodinamika i teplomassoobmen v dispersnykh merzlykh porodakh [Thermodynamics and heat and mass transfer in dispersed frozen rocks]. Moscow, Nauchnyi mir, 2003, 608 p. (in Russian).
- Makarov V.I. Termosifony v severnom stroitelstve [Thermosyphons in northern construction]. Novosibirsk, Nauka, 1985, 169 p. (in Russian).
- Melnikov V.P., Anikin G.V., Ishkov A.A., Andrianov I.E. Research of two-phase flows of carbon dioxide during the cooling of the ground by horizontal evaporator system. *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. XXIII, No. 6, p. 39–47.
- Melnikov V.P., Anikin G.V., Ishkov A.A. et al. Model of two-phase carbon dioxide flow in soil temperature stabilization systems depending on heat load: an experimental study. *Earth's Cryosphere*, 2020, vol. XXIV, No. 3, p. 52–59.
- Melnikov V.P., Drozdov D.S., Malkova G.V. Climatic and cryogenic factors of the northern territories development (in Russian). *Izvestiya vysokikh uchebnykh obrazovaniya. Geologiya i Razvedka [Proceeding... Geology and Exploration]*, 2009, vol. 15, No. 6, p. 75–83.
- Pavlov A.V. Permafrost-climatic changes in the North of Russia: observations, forecast. *Izv. RAN. Ser. geogaficheskaya [Proceedings of the RAS]*, 2003, No. 6, p. 39–50.
- Pazderin D.S. Field studies of the deep JMA in the conditions of the experimental-industrial site. In: *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists "Strategy of Innovative Development, Construction and Development of the Far North"*. Tyumen, 2011, p. 47–51 (in Russian).

- Petukhov B.S., Genin L.G., Kovalev S.A. Teploobmen v yadernukh energeticheskikh ustanovkakh [Heat exchange in nuclear power installations]. Moscow, Atomizdat, 1974, 407 p. (in Russian).
- Pioro I.L., Antonenko V.A., Pioro L.S. Effektivnye teploobmenniki s dvukhfaznymi termosifonami [Effective heat exchangers with two-phase thermosiphons]. Kiev, Naukova Dumka, 1991, 248 p. (in Russian).
- Pioro L.S., Pioro I.L. Dvukhfaznye termosifony i ikh primeneniye v promyshlennosti [Two-phase thermosiphons and their application in industry]. Kiev, Naukova Dumka, 1989, 136 p. (in Russian).
- Popov A.P., Milovanov V.I., Ryabov V.A. Improvement of the method of controlling the cryogenic resource of the foundations at designing the zero cycles of buildings and structures. Geotekhnika [Geotechnics], 2010, No. 6, p. 4–22.
- Popov A.P., Samsonova V.V. Innovative aspects of natural cryogenic resources utilization for mechanical safety of buildings and structures in cryolithozone. Geotekhnika [Geotechnics], 2011, No. 5, p. 4–21.
- Razlichnye oblasti primeneniya kholoda [Various areas of cold application]. A.V. Bykov (ed.). Moscow, Agropromizdat, 1985, 272 p. (in Russian).
- Regulirovanie temperatury gruntov osnovaniya s pomoshchyu sezonodeistvuyushchikh okhlazhdayushchikh ustroystv [Regulation of the base soil temperature by means of seasonally acting cooling devices]. S.S. Vyalov (ed.). Yakutsk, IMZ SO RAN, 1983, 124 p. (in Russian).
- Rilo I.P. Experimental study of the two-phase process of carbon dioxide boiling in the soil thermal stabilizer. Neft i gaz Sibiri [Oil and Gas of Siberia], 2019, No. 2 (35), p. 56–63.
- Rilo I.P., Zheludkova K.A., Kleshchin D.A. Freezing and thermal stabilization of soils in the cryolithozone. Truboprovodnyi transport [Pipeline Transport: Theory and Practice], 2015, No. 4 (50), p. 22–27.
- Sistemy temperaturnoi stabilizatsii grundov osnovanii v kriolitozone [Systems of temperature stabilization of foundation soils in cryolithozone: Actual issues of research, calculations, design, production, construction, author's supervision and monitoring]. G.M. Dolgikh (ed.). Novosibirsk, Acad. izd-vo "Geo", 2014, 217 p. (in Russian).
- Spasennikova K.A. Computer modeling of heat and mass transfer in soils under the structures built on permafrost with the use of seasonal cooling devices: The autoref. disc. ... Candidate of Technical Sciences. Tyumen, 2015, 19 p. (in Russian).
- Sposob zamorazhivaniya grunta [Method of ground freezing]: patent No. 68155 USSR / Blier B.M., Zinman B.M. Published in 1945, Bulletin invention.
- Teplovye truby [Heat Pipes]. E.E. Shpilrein (ed.). Moscow, Mir, 1972, 421 p. (in Russian).
- Teplovye truby i teploobmenniki s ispolzovaniem poristyykh materialov [Heat pipes and heat exchangers using porous materials]. L.L. Vasiliev (ed.). Minsk, ITMO AN BSSR, 1985, 178 p. (in Russian).
- Feklistov V.N. Research of the cooling system of the "GET" type for thermal stabilization of the ground bases. In: Proc. of the Int. Conf. "Cryogenic Resources of Polar and Mountain Regions. State and Prospects of Engineering Permafrost Science". Tyumen, 2008, vol. 2, p. 165–168 (in Russian).
- Chi S. Teplovye truby [Heat Tubes: Theory and Practice]. Moscow, Mashinostroenie, 1981, 207 p. (in Russian).
- Eva V., Asakavicius I., Gaigalis V. Nizkotemperaturnye teplovye truby [Low temperature heat tubes]. Vilnius, Mokslas, 1982, 184 p. (in Russian).
- El-Genk M.S., Saber H.H. Flooding limit in closed, two-phase flow thermosiphons. Int. J. Heat Mass Transfer, 1997, vol. 40, No. 9, p. 2147–2164.
- Farouki O.T. Thermal properties of soils. Zellerfeld, Germany, TransTech Publ., 1986, 136 p.
- Hayley D.W., Horne B. Rationalizing climate change for design of structures on permafrost: A Canadian perspective. In: Proc. Ninth Int. Conf. on Permafrost. Fairbanks, USA, Univ. Alaska, 2008, p. 681–686.
- Haynes F.D., Zarling J.P. Thermosiphons and foundation design in cold regions. Cold Reg. Sci. Technol., 1988, vol. 15, p. 251–259.
- Holubec I. Flat loop thermosyphon foundations in warm permafrost. In: Report submitted to Government of the Northwest Territories, Asset Management Division. Department of Public Works and Services, and Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee, 2008, p. 83.
- Holubec I. Geotechnical site investigation guidelines for building foundations in permafrost. In: Report submitted to the Government of the Northwest Territories, Department of Public Works and Services, 2010, p. 48.
- Hwang C.T. Predictions and observations on the behaviour of a warm gas pipeline on permafrost. Can. Geotech. J., 1976, vol. 13, No. 4, p. 452–480.
- Long E.L. The long thermopile. In: Proc. of the First Int. Conf. on Permafrost. Durdue, Purdue Univ., US Nat. Academy of Sciences, 1963, p. 487–490.
- Permafrost engineering design and construction. G.H. Johnston (ed.). Toronto, Wiley and Sons, 1981, 540 p.
- Yarmak Jr.E., Long E.L. Recent developments in thermosyphon technology. In: Proc. of the 11th Int. Conf. on Cold Regions Engineering. Anchorage, Alaska, USA, 2002, p. 656–662.

*Поступила в редакцию 6 марта 2024 г.,
после доработки – 25 мая 2024 г.,
принята к публикации 23 августа 2024 г.*