

## ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 624.139

DOI: 10.15372/KZ20210404

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ  
МЕРЗЛЫХ ОСНОВАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АГРЕГАТА  
ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ХЛАДАГЕНТА****Я.Б. Горелик<sup>1</sup>, А.Х. Хабитов<sup>2</sup>, И.В. Земеров<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Институт криосферы Земли СО РАН,  
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; [gorelik@ikz.ru](mailto:gorelik@ikz.ru), [zemerov.utmn@gmail.com](mailto:zemerov.utmn@gmail.com)<sup>2</sup>ПАО «Турпотомнефтегаз»,  
625000, Тюмень, ул. Республики, 62, Россия; [prof.power@yandex.ru](mailto:prof.power@yandex.ru)

Предложен способ поверхностного охлаждения мерзлых оснований, включающий теплоизоляцию по поверхности грунта и агрегат принудительной циркуляции хладагента, работа которого осуществляется только в летнее время года в течение всего срока эксплуатации сооружения. Способ имеет важные преимущества по сравнению с известными способами поверхностного охлаждения. Во-первых, в любой момент времени годового цикла отсутствует возможность образования слоя сезонного оттаивания, и охлаждающий импульс поступает в основание в течение всего календарного года. Во-вторых, в условиях городской застройки применение машинного способа охлаждения (взамен сезонно действующих охлаждающих систем) является вполне промышленным, не требующим значительного пространства для его реализации. Анализ результатов расчета температурных полей показывает высокую скорость понижения температуры грунтов в основании: для всех вариантов расчета температура на глубине нулевых годовых амплитуд во второй год эксплуатации достигает величины, соответствующей твердомерзлomu состоянию большинства грунтов. Еще более значительное понижение достигается на третий год эксплуатации. Результаты расчетов слабо зависят от расстояния между охлаждающими элементами применяемой системы охлаждения в пределах рассмотренного диапазона изменения этой величины (0.7–1.0 м).

**Ключевые слова:** мерзлые грунты, слой сезонного оттаивания, температурный режим грунта, теплоизоляционный слой, принудительное охлаждение, время достижения проектной температуры.

**EFFICIENCY OF SURFACE COOLING OF FROZEN SOIL FOUNDATION USING  
A FORCED REFRIGERANT CIRCULATION UNIT****J.B. Gorelik<sup>1</sup>, A.K. Khabitov<sup>2</sup>, I.V. Zemerov<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Earth Cryosphere Institute, SB RAS,  
Malygina str. 86, Tyumen, 625026, Russia; [gorelik@ikz.ru](mailto:gorelik@ikz.ru), [zemerov.utmn@gmail.com](mailto:zemerov.utmn@gmail.com)  
<sup>2</sup>Giprotymenneftegaz, Respubliki str. 62, Tyumen, 625000, Russia; [prof.power@yandex.ru](mailto:prof.power@yandex.ru)

A method for surface cooling of frozen foundations has been proposed. It includes heat insulation through the soil surface and a unit for forced circulation of a refrigerant. The latter is used only in summer during the entire period of operation of the structure. The method has important advantages in comparison with the known methods of surface cooling: a) a seasonally thawed layer can't be formed at any time of the annual cycle and the cooling impulse enters the ground base throughout the entire calendar year; b) in urban conditions, the use of a machine cooling method (instead of seasonally operating cooling systems) is quite reasonable since it does not require significant space for its implementation. Analysis of the results of temperature fields calculating demonstrates quick cooling of the ground base: for all calculation options, the temperature at the depth of zero annual amplitude in the second year of operation reaches a value corresponding to hard frozen state of most of the soils. The decrease becomes even more significant in the third year of operation. The calculation results are rather weakly dependent on the distance between the cooling elements of the applied cooling system within the considered range of variation of that value (from 0.7 to 1.0 m).

**Key words:** frozen soils, seasonal thawing layer, ground temperature regime, heat-insulation layer, forced cooling, time to reach the required temperature.

**ВВЕДЕНИЕ**

Поверхностными способами охлаждения и термостабилизации мерзлых грунтов оснований сооружений устраняется необходимость выполне-

ния тяжелых работ по бурению грунта, его перемещению и погружению в основание элементов охлаждающих устройств, значительно снижаются

затраты при реализации в сравнении с другими способами. Выигрыш в снижении трудоемкости наиболее очевиден в случае, когда подобные работы требуется выполнять вручную на предварительно подготовленном свайном поле или под перекрытием проветриваемого подполья зданий [Системы..., 2014; Абросимов и др., 2018]. Вместе с тем весь имеющийся опыт указывает на то, что поверхностные способы существенно проигрывают в эффективности охлаждения как по длительности выхода на проектный температурный режим, так и по величине понижения температуры в основании [Макаров, 1985; Коновалов, 1989; Бубело, 2003]. Однако сравнительно недавно на основе анализа механизма формирования температурной сдвижки при наличии на поверхности грунта покровов произвольной природы [Горелик, Земелов, 2020] удалось подобрать конструкцию поверхностного покрытия, способного обеспечить необходимую температуру в основании при достаточно высокой скорости охлаждения. Такое покрытие включает слой качественной теплоизоляции и уложенный под ней по поверхности грунта охлаждающий элемент горизонтальной естественно-действующей трубчатой системы (ГЕТ) [Долгих и др., 2014]. Поскольку при качественной теплоизоляции глубина сезонного протаивания существенно уменьшается, с наступлением холодного периода оттаявший слой быстро промерзает. После этого “нулевая завеса” исчезает [Общие мерзлотоведение, 1978], холод с поверхности (охлаждающий импульс) начинает распространяться в глубину массива грунта и этот процесс продолжается до конца зимнего периода. В итоге длительность охлаждающего импульса существенно возрастает в сравнении с обычными условиями промерзания.

Поскольку в зимнее время на поверхности грунта (под слоем снега и теплоизоляции) поддерживается достаточно низкая температура (за счет действия охлаждающего элемента системы “ГЕТ”), а подошва деятельного слоя расположена на близком к этой поверхности, то и температура на подошве длительное время будет значительно ниже, чем в обычных условиях. В результате усиленного действия этих двух факторов – понижения среднегодовой температуры на подошве слоя сезонного промерзания и увеличения длительности действия охлаждающего импульса – возможно увеличение скорости охлаждения при достижении необходимой температуры в основании. Соответствующие результаты расчетов и их анализ приведены в работе [Горелик, Хабитов, 2021], где основное внимание уделено применению охлаждающей системы “ГЕТ”, которая способна работать только в зимнее время года. Однако, как показано в той же работе, интенсивность охлаждения существенно усиливается, если кратковре-

менно (в течение одного летнего сезона) к испарительной системе “ГЕТ” подключить агрегат принудительной циркуляции хладагента. При наличии качественной теплоизоляции летний источник холода препятствует образованию слоя сезонного протаивания, благодаря чему исключается энергоемкий процесс его промерзания зимой. При этом длительность действия охлаждающего импульса достигает максимального значения, что приводит к позитивному эффекту. Вместе с тем понятно, что если в рассматриваемой схеме поверхностного охлаждения полностью исключить применение конденсаторного блока системы “ГЕТ”, оставив агрегат принудительного охлаждения, включение которого будет осуществляться только в летний период весь срок эксплуатации сооружения, то формирование слоя сезонного протаивания на поверхности грунта под теплоизоляцией станет невозможным. В этом случае формирование температуры на глубине нулевых годовых амплитуд происходит под действием среднегодовой температуры на поверхности грунта (понятие среднегодовой температуры на подошве деятельного слоя здесь теряет смысл).

Приближенные оценки среднегодовой температуры поверхности, выполненные по формулам, приведенным в [Горелик, Хабитов, 2021], показывают вполне сопоставимый результат охлаждения предложенным здесь способом в сравнении с вариантами применения системы “ГЕТ”. Фактически, предлагаемый способ заменяет применение охлаждающих устройств в зимнее время года (с помощью системы “ГЕТ”) на летнее время (машинным способом). Такая замена обладает существенными преимуществами в условиях городской застройки, где размещение весьма габаритных конденсаторных блоков в жилых кварталах неизбежно повлечет известные проблемы. Машинный способ охлаждения является вполне индустриальным способом, не требующим значительных пространств для его реализации. Отметим также, что в настоящее время отечественными производителями разработан и освоен выпуск агрегатов, обладающих необходимыми параметрами [Окунев, Долгих, 2017].

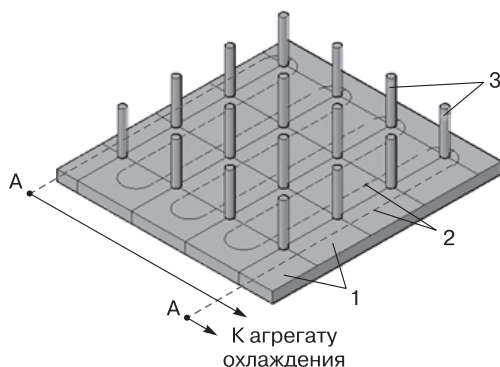
Помимо сказанного выше, предлагаемый способ может найти применение в ряде районов земного шара с жарким климатом при глобальном повышении температуры для создания зон климатического комфорта. Они могут быть созданы в приповерхностных слоях грунта путем поверхностного охлаждения. На этом вопросе, однако, в статье мы останавливаться не будем.

Целью настоящей работы является выполнение расчетов охлаждения мерзлых оснований достаточно точными методами, их анализ и вывод об эффективности предлагаемого способа охлаждения.

### Процедура расчета охлаждения с применением агрегата принудительной циркуляции хладагента

Расчеты динамики температуры в грунтах основания при машинном способе охлаждения выполнены для здания с подпольем с размерами в плане  $12 \times 24$  м и в целом повторяют аналогичную процедуру, использованную для охлаждающей системы “ГЕТ” в [Горелик, Хабитов, 2021]. Конструкция и расположение элементов системы охлаждения в пределах свайного поля представлены на рис. 1. Трубы испарителя системы охлаждения уложены змеевиком вдоль большей оси здания и покрыты выравнивающим слоем песка. Стандартные теплоизолирующие панели уложены встык по выравнивающему слою (с необходимой подрезкой в местах обхода свай) в пределах всей поверхности проветриваемого подполья.

Расстояние между осями соседних труб испарителя по горизонтали ( $L$ ) принято в двух вариантах – 1.0 и 0.7 м, диаметр труб  $D = 37$  мм. Толщина теплоизоляции стандартной панели  $h = 100$  мм, коэффициент теплопроводности материала  $\lambda_i = 0.03$  Вт/(м·°С). Основные тенденции в поведении температурных полей могут быть установлены для однородного по теплофизическим характеристикам массива грунта. С неоднородностью этих свойств могут быть связаны лишь локальные количественные отклонения от общего тренда в поведении температуры, не влияющие принципиально на общий характер ее изменения. Обоснованием этому служит то обстоятельство, что в рассматриваемой задаче мерзлая толща, залегающая ниже подошвы деятельного слоя, не изменяет своего состояния при изменении температуры.



**Рис. 1.** Схема размещения элементов охлаждающей системы в подполье здания (надфундаментные конструкции не показаны).

1 – плиты теплоизоляции; 2 – труба испарителя (охлаждающий элемент); 3 – сваи фундамента; А – точки подсоединения агрегата охлаждения к охлаждающему элементу.

Для описания динамики температуры в ней в первом приближении можно пренебречь изменением количества незамерзшей воды с температурой (что является хорошим приближением для песчаных и супесчаных грунтов, а для водонасыщенных тонкодисперсных грунтов погрешность вычислений не критична). В этом приближении процесс теплопереноса является чисто кондуктивным и описывается классическим уравнением теплопроводности [Общее мерзлотоведение, 1978] с переменными коэффициентами (теплопроводностью и объемной теплоемкостью), изменяющимися вдоль вертикальной координаты в соответствии с изменением свойств грунтов по разрезу. В стандартных расчетных схемах изменение этих коэффициентов по вертикали аппроксимируется кусочно-постоянными функциями, что позволяет привести уравнение теплопроводности к форме, содержащей только один параметр – коэффициент температуропроводности мерзлого грунта ( $\mu_f$ ), также зависящий от вертикальной координаты. Изменение этого параметра во всем диапазоне дисперсности грунтов, их плотности и влажности, определенное, например, по таблице теплофизических свойств [СНиП 2.02.04-88, 1990] можно представить в виде  $\mu_f = k \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, где величина  $k$  заключена в довольно узком диапазоне:  $0.5 \leq k \leq 1$ . Это означает, что общие выводы о поведении температуры в мерзлой толще могут быть получены для постоянного значения коэффициента  $\mu_f$  из указанного диапазона, при этом они останутся справедливыми (с небольшими количественными вариациями) для широкого круга практически важных случаев.

Для удобства сравнения с результатами работы [Горелик, Хабитов, 2021] во всех вариантах расчета приняты те же характеристики грунта, что и в цитируемой работе (для талого грунта принят индекс  $u$ , для мерзлого  $f$ ): коэффициенты теплопроводности (Вт/(м·°С)):  $\lambda_u = 1.75$ ,  $\lambda_f = 1.80$ ; объемная теплоемкость (Дж/(м<sup>3</sup>·°С)):  $C_u = 2.68 \cdot 10^6$ ,  $C_f = 2.20 \cdot 10^6$ ; объемный вес скелета грунта  $\gamma_s = 1500$  кг/м<sup>3</sup>; влажность  $w = 0.2$ . Переход единицы объема мерзлого грунта в талое состояние характеризуется величиной скрытой объемной теплоты  $\kappa_v = \kappa \gamma_s w$ , где  $\kappa = 3.34 \cdot 10^5$  Дж/кг ( $\kappa_v = 10^8$  Дж/м<sup>3</sup>). (Эта величина в рассматриваемом способе охлаждения важна только для поверхностных слоев грунта вне проекции здания в плане.) Влажность грунта за счет незамерзшей воды  $w_u = 0$ . Температура начала замерзания грунта  $t_b = 0$  °С. Начальная температура грунта в основании принята  $t_0 = -0.7$  °С.

Постановка задачи включает уравнение теплопроводности для полупространства (исключая внутренние области окружностей, соответствующих расположению труб испарителя), которое для

целей применения численных методов решения записывается в энтальпийной форме [Самарский, Вабищевич, 2003]:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где  $y, z$  – горизонтальная и вертикальная координаты; энтальпия  $H(t)$  является функцией температуры  $t$  в произвольной точке массива грунта и определяется с учетом тепла фазового перехода, локализованного вблизи границы раздела фаз:

$$H(t) = \begin{cases} \kappa_v + C_u t & \text{при } t \geq 0 \text{ }^\circ\text{C}, \\ C_f t & \text{при } t < 0 \text{ }^\circ\text{C}. \end{cases}$$

После дифференцирования по температуре и времени в левой части уравнения (1) перед производной температуры по времени образуется множитель, имеющий смысл эффективной теплоемкости грунта и содержащий  $\delta$  – функцию от температуры, для которой может быть проведена процедура сглаживания [Самарский, Вабищевич, 2003]. Для численного решения уравнения (1) постановка граничных условий на подвижной границе (которая формируется при сезонных процессах вне контура сооружения) не требуется.

На верхней поверхности массива грунта задается условие третьего рода:

$$\alpha(t_a(\tau) - t_s) = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial z} \right)_s.$$

Здесь  $t_s$  – температура поверхности грунта (определяется в процессе счета);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности грунта, который в зависимости от его состояния принимает значения  $\lambda_u$  либо  $\lambda_j$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена поверхности грунта с воздухом, который принимает значения  $\alpha_s$  (летний) либо  $\alpha_w$  (зимний) в соответствующие сезонные отрезки времени. Их определение выполнено согласно методу из работы [Горелик, Паздерин, 2017]. Расчетные значения этих коэффициентов оказываются равными (Вт/(м<sup>2</sup>·°C)):  $\alpha_s = 23.2$ ,  $\alpha_w = 1.12$ .

Согласно данным работы [Окунев, Долгих, 2017], агрегат охлаждения может поддерживать температуру на стенке испарителя в диапазоне от  $-15$  до  $-32$  °C. Для расчетов принято максимальное значение температуры из этого диапазона. Соответственно, граничное условие на стенке трубы испарителя в активный период работы агрегата записано в виде постоянства температуры  $t_t(\tau) = -15$  °C. Начало работы агрегата и ее прерывание связано с датами весеннего и осеннего перехода среднесуточной температуры воздуха через  $0$  °C. В примерах расчета это даты 1 мая и 1 октября.

Ход температуры воздуха  $t_a(\tau)$  в течение года имеет вид кусочно-постоянной функции среднемесячных температур. Как и в работе [Горелик, Ха-

Годовой ход температуры воздуха по метеостанции “Уренгой”

Месяц	Средняя температура воздуха, °C	Месяц	Средняя температура воздуха, °C
Январь	-26.4	Июль	15.4
Февраль	-26.4	Август	11.3
Март	-19.2	Сентябрь	5.2
Апрель	-10.3	Октябрь	-6.3
Май	-2.6	Ноябрь	-18.2
Июнь	8.4	Декабрь	-24.0

битов, 2021], данные по температуре воздуха приняты по метеостанции “Уренгой” (см. таблицу). В пределах подполья массив грунта рассматривается как двуслойный по вертикали, где верхний слой соответствует теплоизоляции и характеризуется толщиной ( $h$ ), коэффициентом теплопроводности ( $\lambda_i$ ) и нулевым вкладом теплоты фазового перехода в эффективную теплоемкость.

Система координат расположена в горизонтальной плоскости, совпадающей с поверхностью массива грунта, ее центр совпадает с геометрическим центром здания в плане. Ось  $Oz$  направлена вертикально вниз, оси  $Ox$  и  $Oy$  лежат в горизонтальной плоскости и направлены вдоль длинной и короткой осей здания соответственно. Размеры расчетной области вдоль каждой из осей определяются радиусом теплового влияния [Горелик, Паздерин, 2017], и при расчете не более чем на 5-летний срок этот радиус не превышает 35 м. Таким образом, границы расчетной области должны быть удалены на 35 м от границ контура подполья в плане и на такое же расстояние в глубь массива по вертикали. На этих границах задается нулевое значение теплового потока.

Задача решается численно. Используется конечно-разностная схема, в которой область определения искомой функции покрывается расчетной сеткой [Азиз, Сеттари, 2004]. Для получения дискретных аналогов уравнений в модели используется метод контрольного объема [Патанкар, 2003]. В работе [Горелик и др., 2008] приведен конечно-разностный аналог уравнения (1).

Использованная здесь расчетная процедура неоднократно тестирована на различных задачах и описана ранее [Горелик и др., 2014, 2019; Горелик, Хабитов, 2019а,б].

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показано в работе [Горелик, Хабитов, 2021], при применении поверхностных способов существует оптимальная последовательность монтажа и включения элементов охлаждающей системы. В рассматриваемом случае такая последовательность включает следующие этапы: а) *начальный этап* – от начала первого зимнего периода до

его завершения, никакие элементы охлаждающей системы не монтируются, происходит полное промерзание сезонного слоя за счет естественного холода атмосферы; б) этап монтажа элементов системы охлаждения начинается в конце первого зимнего сезона: укладывается испаритель системы, подсыпается выравнивающий слой песка, вся поверхность покрывается теплоизоляцией, про-

изводится подсоединение агрегата охлаждения, работы заканчиваются к началу летнего сезона; в) этап принудительного охлаждения отсчитывается от начала летнего сезона: включается агрегат охлаждения, который работает непрерывно до начала нового зимнего сезона, после чего отключается. Далее процесс периодически повторяется при полностью подключенной системе охлажде-

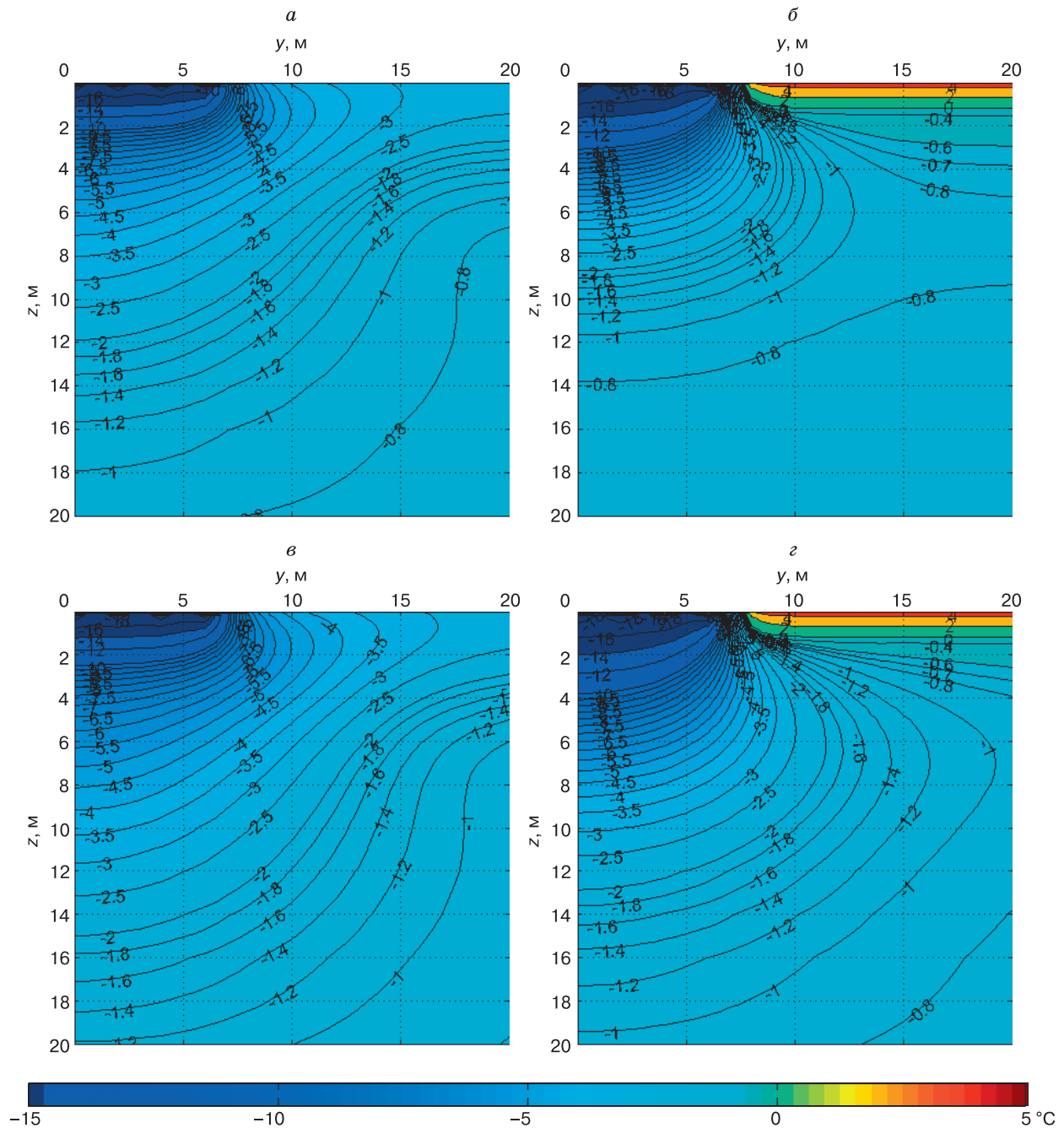


Рис. 2. Температурные поля в основании здания в центральном сечении ( $x = 0$ ) при расстоянии между трубами испарителя  $L = 1$  м.

$a, б$  – первый год эксплуатации;  $в, з$  – второй год эксплуатации;  $a, в$  – конец зимы;  $б, з$  – конец лета.

ния в течение всего срока эксплуатации сооружения, при этом летом происходит охлаждение с помощью агрегата принудительного охлаждения, а в зимнее время определенная доля охлаждения добавляется от воздуха атмосферы в силу неидеальности применяемой теплоизоляции (хотя принятые в расчетах характеристики ее материала являются довольно высокими). Важная особенность

описываемого способа заключается в отсутствии слоя сезонного оттаивания в любой момент времени годового цикла, что исключает необходимость весьма энергоемкого процесса промораживания, а действие охлаждающего импульса продолжается весь год.

На рис. 2 представлены результаты расчетов температурных полей в основании здания при

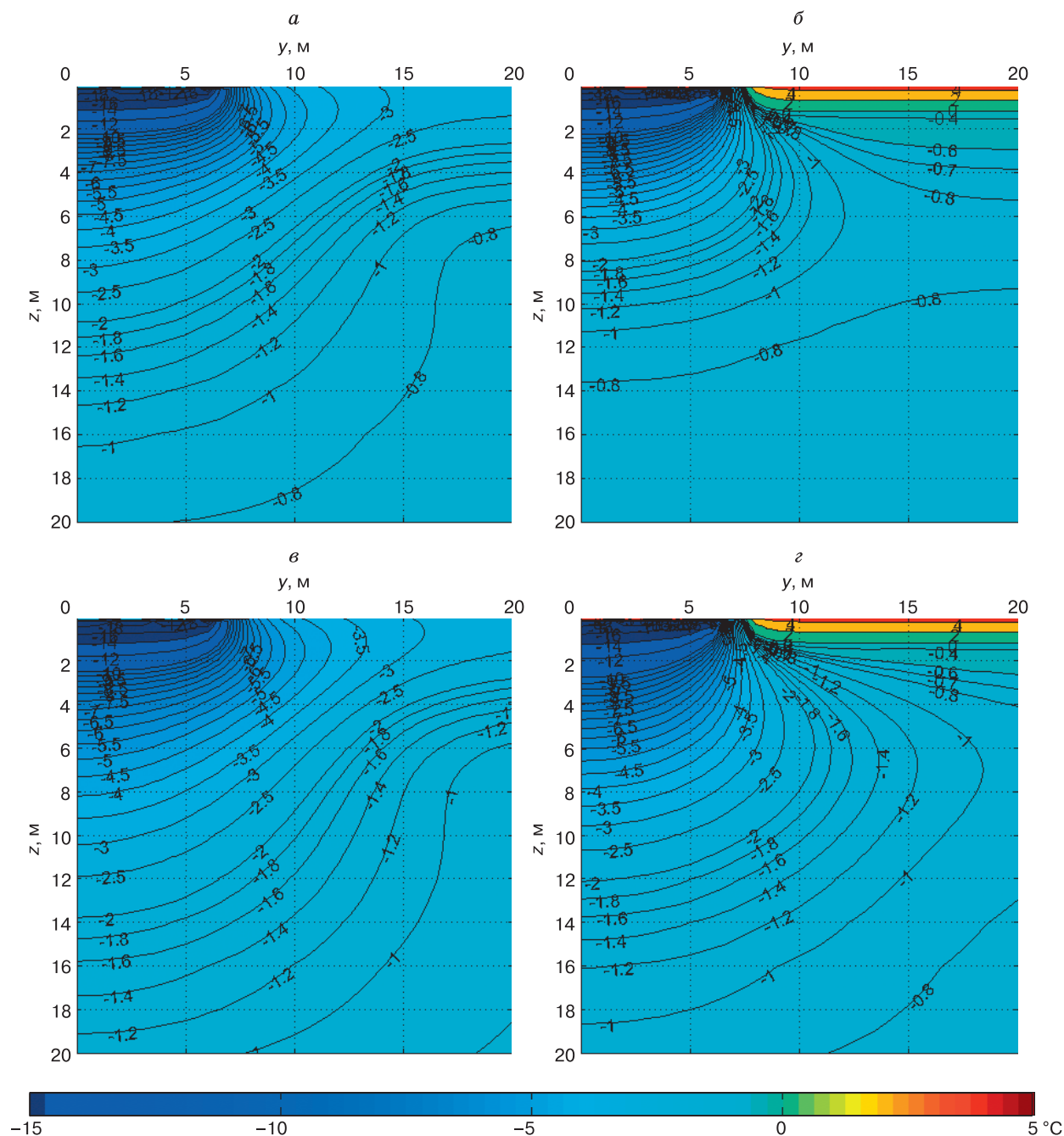


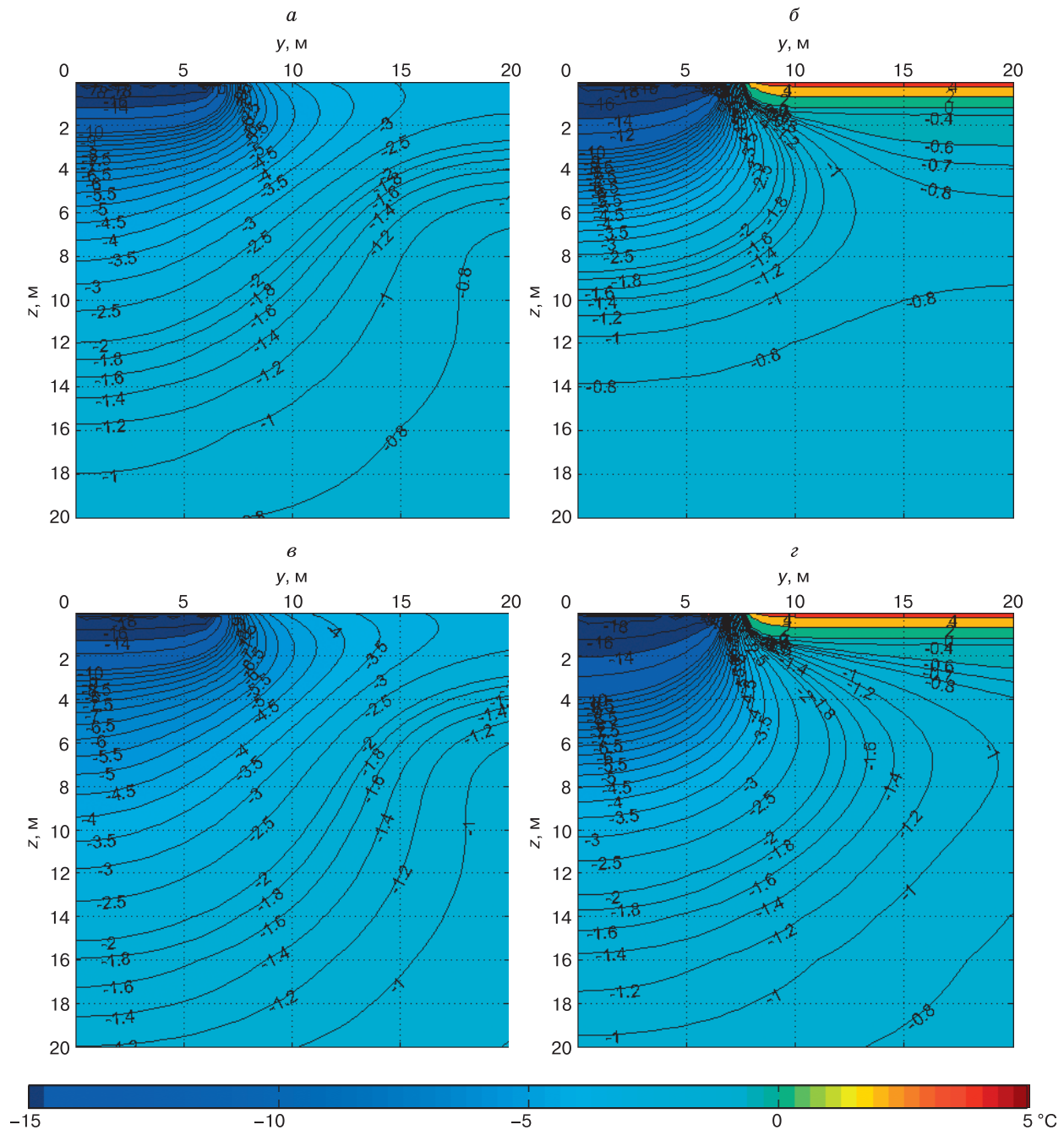
Рис. 3. Температурные поля в основании для края здания ( $x = 12$  м) при расстоянии между трубами испарителя  $L = 1$  м.

$a, б$  – первый год эксплуатации;  $в, г$  – второй год эксплуатации;  $a, в$  – конец зимы;  $б, г$  – конец лета.

$L = 1$  м в центральном сечении ( $x = 0$ ) на первый и второй год эксплуатации здания; результаты расчетов для края здания ( $x = 12$  м) представлены на рис. 3. Аналогичные результаты для  $L = 0.7$  м представлены на рис. 4, 5. Линии на рис. 2–5 отображают положение изотерм в рассматриваемом сечении основания, цифры вдоль линии обозначают соответствующую температуру изо-

терм. Цветовая шкала в нижней части рисунков показывает соответствие определенного цвета в поле рисунка расчетному значению температуры.

На рис. 6 показана трехлетняя динамика изменения температуры в центральном сечении и по краю здания на глубине 0.2 м и на глубине нулевых годовых амплитуд ( $z_0 = 10$  м).



**Рис. 4. Температурные поля в основании здания в центральном сечении ( $x = 0$ ) при расстоянии между трубами испарителя  $L = 0.7$  м.**

*a, б* – первый год эксплуатации; *в, г* – второй год эксплуатации; *a, в* – конец зимы; *б, г* – конец лета.

Сравнение представленных на рис. 2–5 температурных полей показывает высокую скорость понижения температуры грунтов в основании как в его центральном сечении, так и по краю здания: во всех вариантах расчета температура на глубине нулевых годовых амплитуд во второй год эксплуатации достигает величины, соответствующей твердому состоянию большинства грунтов.

Еще более значительное понижение достигается на третий год эксплуатации (см. рис. 6, б, з). Такие темпы понижения температуры соответствуют аналогичным результатам для наиболее эффективных вариантов поверхностного охлаждения при совместном применении системы “ГЕТ” и агрегата принудительного охлаждения, которые рассмотрены в [Горелик, Хабитов, 2021]. Темпы

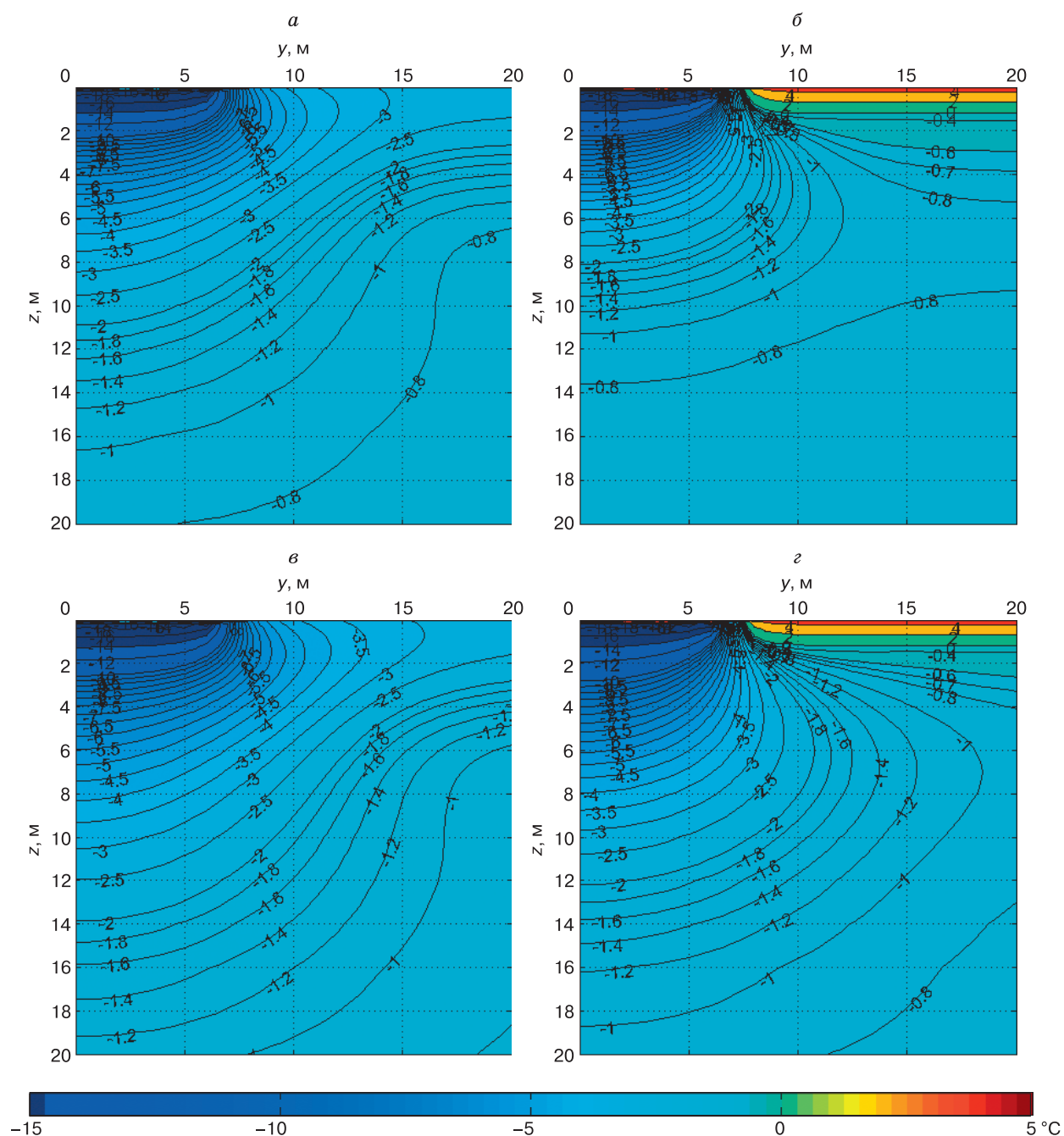
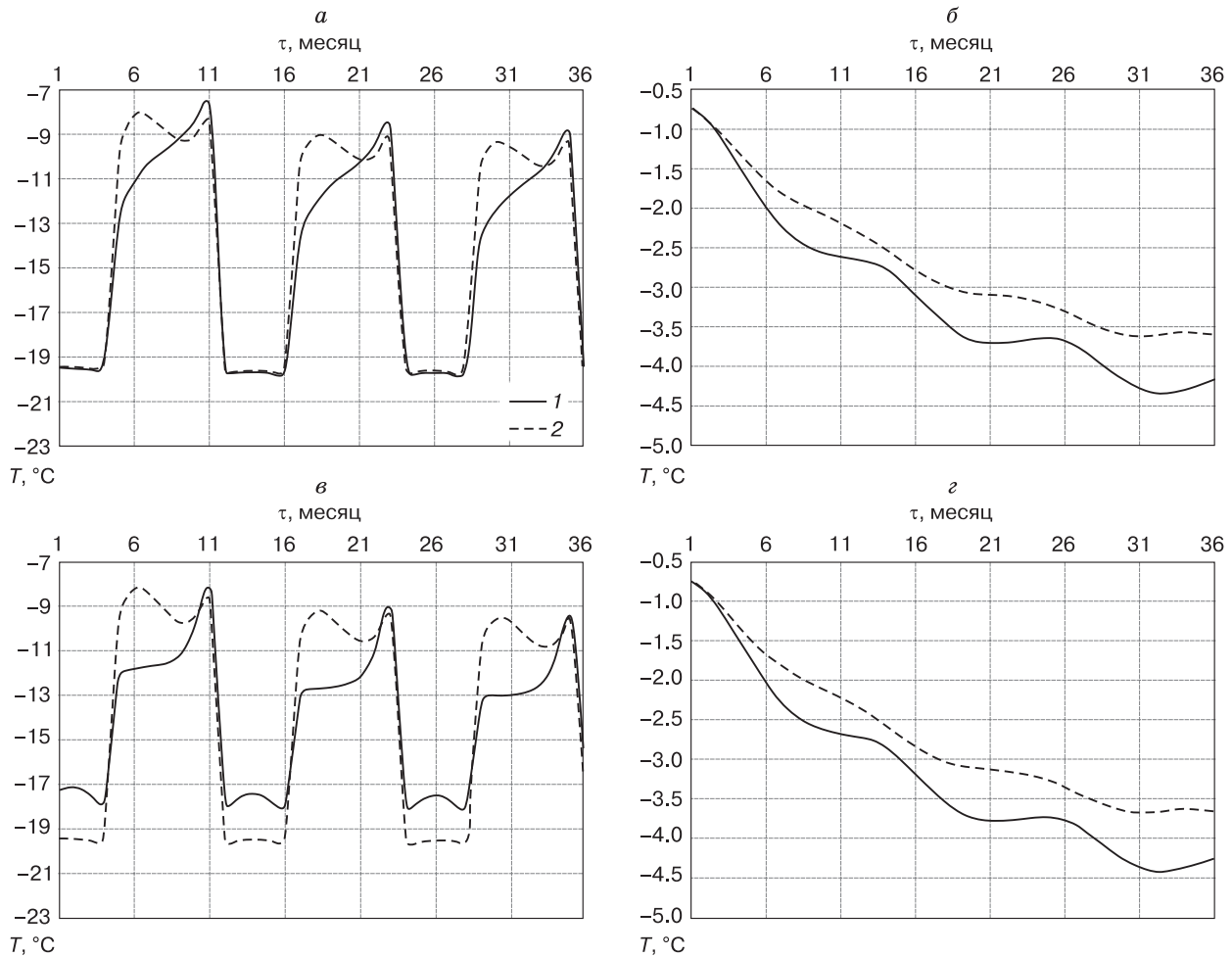


Рис. 5. Температурные поля в основании для края здания ( $x = 12$  м) при расстоянии между трубами испарителя  $L = 0.7$  м.

а, б – первый год эксплуатации; в, з – второй год эксплуатации; а, в – конец зимы; б, з – конец лета.





**Рис. 6.** Динамика температуры в основании здания на глубине  $z = 0.2$  м (*а, в*) и на глубине нулевых амплитуд  $z_0 = 10$  м (*б, г*) для центрального сечения (1) и для края здания (2) в течение 3 лет эксплуатации. *а, б* –  $L = 1$  м; *в, г* –  $L = 0.7$  м; 1 –  $x = 0$ ; 2 –  $x = 12$  м.

понижения температуры кратно превышают характерные значения в 3–5 лет для известных способов [Вялов и др., 1979; Хрусталеv, Никифоров, 1990]. Результаты расчетов довольно слабо зависят от расстояния между трубами испарителя  $L$  в пределах рассмотренного диапазона изменения ее величины (от 0.7 до 1.0 м).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ поверхностного охлаждения, включающий размещение теплоизоляции по поверхности грунта и уложенных под нее охлаждающих труб, подсоединенных к агрегату принудительной циркуляции хладагента с включением последнего только в летний период года в течение всего срока эксплуатации сооружения. Способ обладает важными преимуществами: а) в любой момент времени отсутствует возможность образования слоя сезонного оттаивания, что исключает

необходимость его замораживания, вследствие чего охлаждающий импульс поступает в основание сооружения в течение всего календарного года; б) в условиях городской застройки, где размещение весьма габаритных конденсаторных блоков естественно-конвективной системы “ГЕТ” неизбежно повлечет возникновение определенных проблем, применение машинного способа охлаждения является вполне индустриальным, не требующим значительных пространств для его реализации.

Приведенные в статье результаты математического моделирования процесса формирования температурного поля в массиве мерзлого грунта при поверхностном способе охлаждения с применением рассмотренных технических средств позволяют сделать следующие выводы.

1. Сравнение представленных на рис. 2–5 температурных полей показывает высокую скорость

понижения температуры грунтов в основании как в его центральном сечении, так и по краю здания. Во всех вариантах расчета температура на глубине нулевых годовых амплитуд во второй год эксплуатации достигает величины, соответствующей твердомерзлостному состоянию большинства грунтов, и продолжает снижаться на третий год эксплуатации (см. рис. 6, б, г).

2. Высокие темпы понижения температуры соответствуют аналогичным результатам для наиболее эффективных вариантов поверхностного охлаждения при совместном применении системы «ГЕТ» и агрегата принудительного охлаждения [Горелик, Хабитов, 2021]. Результаты расчетов довольно слабо зависят от расстояния между трубами испарителя  $L$  в пределах от 0.7 до 1.0 м.

3. Темпы понижения температурыкратно превышают значения в 3–5 лет, характерные для известных способов [Вялов и др., 1979; Хрусталева, Никифоров, 1990].

Полученные в настоящей работе результаты могут оказаться весьма важными для развития технологий восстановления зданий и сооружений, подвергшихся деформациям в процессе эксплуатации вследствие нарушения температурного режима мерзлых грунтов их оснований.

*Работа выполнена в рамках темы госзадания рег. № НИОКТР АААА-А17-117051850061-9.*

## Литература

- Абросимов А.И., Тепляков А.В., Залетаев С.В. и др. Увеличение несущей способности свай путем установки в проветриваемое подполье охладителей грунта // Сб. докл. расширенного заседания Совета по криологии Земли. М., МГУ, 2018, т. 2, с. 9–15.
- Азиз Х. Математическое моделирование пластовых систем / Х. Азиз, Э. Сеттари. М.; Ижевск, Ин-т компьют. исследований, 2004, 416 с.
- Бубело Р.В. Стабилизация отрицательной температуры мерзлых грунтов основания с помощью поверхностных аккумуляторов холода: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2003, 23 с.
- Вялов С.С., Александров Ю.А., Миренбург Ю.С. и др. Искусственное охлаждение грунтов с помощью термосвай // Инженерное мерзлотоведение. М., Наука, 1979, с. 72–91.
- Горелик Я.Б., Земеров И.В. Влияние поверхностного обводнения на температурный режим мерзлых грунтов // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2020, т. 6, № 1 (21), с. 10–40, DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-10-40.
- Горелик Я.Б., Паздерин Д.С. Корректность постановки и решения задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 3, с. 49–59.
- Горелик Я.Б., Романок С.Н., Селезнев А.А. Особенности расчета теплового состояния мерзлых грунтов в основании факельной установки // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 1, с. 57–64.

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

Горелик Я.Б., Хабитов А.Х. Роль теплоизоляции скважин при определении расстояния между устьями в районах распространения многолетнемерзлых грунтов // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2019а, т. 5, № 2, с. 10–26, DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-10-26.

Горелик Я.Б., Хабитов А.Х. Об эффективности применения термостабилизаторов при строительстве на многолетнемерзлых грунтах // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 2019б, т. 5, № 3, с. 25–46, DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-25-46.

Горелик Я.Б., Хабитов А.Х. Эффективность поверхностного охлаждения мерзлых грунтов в связи с механизмом формирования температурной сдвижки // Криосфера Земли, 2021, т. XXV, № 2, с. 24–37.

Горелик Я.Б., Шабаров А.Б., Сысоев Ю.С. Динамика протаивания мерзлых пород в зоне влияния двух скважин // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 1, с. 59–65.

Долгих Г.М., Окунев С.Н., Поденко Л.С. и др. Надежность, эффективность и управляемость систем температурной стабилизации вечномерзлых грунтов оснований зданий и сооружений // Системы температурной стабилизации грунтов оснований в криолитозоне. Труды ученых и специалистов ООО НПО «Фундаментстройаркос» за 2010–2014 гг. Новосибирск, Акад. изд-во «Гео», 2014, с. 14–19.

Коновалов А.А. Охлаждение мерзлых оснований для повышения их прочности. Красноярск, Изд-во Краснояр. ун-та, 1989, 202 с.

Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск, Наука, 1985, 169 с.

Общее мерзлотоведение / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1978, 464 с.

Окунев С.Н., Долгих Г.М. Применение мобильных компрессорно-конденсаторных агрегатов без смазки для замораживания талых и пластично-мерзлых грунтов оснований нефтегазовых объектов // Сфера. Нефть и газ, 2017, № 1, с. 40–42.

Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. М., Изд-во МЭИ, 2003, 312 с.

Самарский А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. М., Едиториал УРСС, 2003, 784 с.

Системы температурной стабилизации грунтов оснований в криолитозоне. Труды ученых и специалистов ООО НПО «Фундаментстройаркос» за 2010–2014 гг. / Под ред. Г.М. Долгих. Новосибирск, Акад. изд-во «Гео», 2014, 218 с.

СНИП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., Госстрой СССР, 1990, 56 с.

Хрусталева Л.Н. Стабилизация вечномерзлых грунтов в основании зданий / Л.Н. Хрусталева, В.В. Никифоров. Новосибирск, Наука, 1990, 209 с.

## References

- Abrosimov A.I., Teplyakov A.V., Zaletaev S.V. et al. The increasing of pile stability by employment of cooling systems in the wind underground. In: Proc. of Council of Earth's Cryology (Moscow, May 15–16, 2018). Moscow, MGU, vol. 2, p. 9–15 (in Russian).

- Aziz H., Settary E. Matematicheskoe modelirovanie plastovyykh sistem [Mathematical Modeling of Sheet Systems]. Moscow; Izhevsk, Institute of computer investigations, 2004, 416 p. (in Russian).
- Bubelo R.V. Stabilization of negative temperature in the base's frozen soils by surface cold accumulators: Thesis of PhD dissertation. Moscow, 2003, 23 p. (in Russian).
- Vyalov S.S., Alexandrov Yu.A., Mirenburg Yu.S. et al. Artificial cooling of the ground with employment of the thermal piles. In: Inzhenernoe merzlotovedenie [Engineering Geocryology]. Moscow, Nauka, 1979, p. 72–90 (in Russian).
- Gorelik J.B., Zemerov I.V. Influence of the surface water reservoir to the thermal regime of frozen ground. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, 2020, vol. 6, No. 1, p. 10–40 (in Russian).
- Gorelik J.B., Pazderin D.S. Correctness of formulation and solution of thermotechnical problems of forecasting temperature field dynamics in the ground base of structures on permafrost. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 3, p. 45–54.
- Gorelik J.B., Romanyuk S.N., Seleznev A.A. Some characteristics of the calculation methods of the frozen soil's thermal state in the flare facility foundation. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2014, vol. XVIII, No. 1, p. 57–64 (in Russian).
- Gorelik J.B., Romanyuk S.N., Habitov A.K. Constraining thaw boundary around multiple wells with regard to their joint thermal effect. Earth's Cryosphere, 2019, vol. XXIII, No. 2, p. 67–73.
- Gorelik J.B., Khabitov A.K. The influence of the boreholes' heat insulation on the determination of the minimal distance between its outfalls at permafrost. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, 2019a, vol. 5, No. 2, p. 10–26 (in Russian).
- Gorelik J.B., Khabitov A.K. About efficiency of adaptation of the thermostabilizers for building activity in Permafrost. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, 2019b, vol. 5, No. 3, p. 25–46 (in Russian).
- Gorelik J.B., Khabitov A.K. Affectivity of surface cooling of frozen ground in connection with mechanism of temperature shift formation. Earth's Cryosphere, 2021, vol. XXV, No. 2, p. 24–37.
- Gorelik J.B., Shabarov A.B., Sysoyev Yu.S. The dynamics of frozen ground melting in the influence zone of two wells. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2008, vol. XII, No. 1, p. 59–65 (in Russian).
- Dolgikh G.M., Okunev S.N., Podenko L.S. et al. Safety, efficiency and weldyness of the thermostabilized systems for permafrost states. In: Systems for Thermal Stabilization of Permafrost. Collection of Papers by Specialists from Fundamentstroiarokos R&D Company for 2010–2014. Novosibirsk, Geo, 2014, 218 p. (in Russian).
- Konovalov A.A. Okhlazhdenie merzlykh osnovanii dlya povysheniya ikh prochosti [Cooling of frozen bases for addition of their solidity]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Univ. Publ., 1989, 202 p. (in Russian).
- Makarov V.I. Termosifony v severnom stroitelstve [Thermosiphons in high-latitude construction engineering]. Novosibirsk, Nauka, 1985, 169 p. (in Russian).
- Obshchee merzlotovedenie [General Geocryology]. V.A. Kudryvtsev (Ed.). Moscow, MGU, 1978, 464 p. (in Russian).
- Okunev S.N., Dolgikh G.M. Adaptation of the mobile compressor – condenser aggregate without oiling for freezing of the oil and gas building's bases at the North regions. Sphere. Oil and Gas, 2017, No. 1, p. 40–42 (in Russian).
- Patankar S.V. Chislennoe reshenie zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena pri techenii v kanalakh [Calculation solution of heat and convection changes at flow in the channeles]. Moscow, MEI, 2003, 312 p. (in Russian).
- Samarsky A.A., Vabishchevich P.N. Vychislitel'naya teploperedacha [Computational Heat Transfer]. Moscow, Enditorial URSS, 2003 (in Russian).
- Systems for Thermal Stabilization of Permafrost. Collection of Papers by Specialists from Fundamentstroiarokos R&D Company for 2010–2014. G.M. Dolgikh (Ed.). Novosibirsk, Geo, 2014, 218 p. (in Russian).
- SNiP 2.02.04-88. Basements and Foundations in Permafrost. Moscow, Gosstroy SSSR, 1990, 56 p. (in Russian).
- Khrustalev L.N., Nikiforov V.V. Stabilizatsiya vechnomerzlykh gruntov v osnovanii zdaniy [A stabilization of the building's bases in Permafrost]. Novosibirsk, Nauka, 1990, 209 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 20 октября 2020 г.,  
после доработки – 28 февраля 2021 г.,  
принята к публикации 14 марта 2021 г.*