

**Яков Борисович ГОРЕЛИК<sup>1</sup>**  
**Артур Харисович ХАБИТОВ<sup>2</sup>**

УДК 624.139

## **ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАТОРОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ\***

<sup>1</sup> доктор геолого-минералогических наук,  
заведующий лабораторией тепломассообменных явлений,  
Институт Криосферы Земли СО РАН (г. Тюмень)  
gorelik@ikz.ru; ORCID: 0000-0002-2865-3236

<sup>2</sup> аспирант, Институт криосферы Земли СО РАН; инженер,  
Гипротюменнефтегаз (г. Тюмень)  
prof.power@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-3241-6644

### **Аннотация**

Предложен метод расчета динамики температурного поля мерзлого грунта в основании сооружений с проветриваемым подпольем, возводимых с применением термостабилизаторов. Результаты расчетов показывают, что применение системы оребренных термостабилизаторов со значительным запасом обеспечивает необходимое понижение температуры (до 3-4 °С) грунтов уже в первый год их эксплуатации (для сооружений, протяженных в плане). Применение системы неоребранных термостабилизаторов (несмотря на то, что их коэффициент теплообмена с атмосферой более чем на порядок ниже, чем для оребренного аналога) обеспечивает достаточное понижение температуры (на 1-2 °С) для слабозасоленных супесчаных и песчаных грунтов, широко представленных, например, в ряде районов севера Тюменской области. Это позволяет предложить наиболее эффективную (по совокупности технико-экономических показателей)

---

\* Работа выполнена согласно госзаданию по Программе фундаментальных исследований РАН IX.135.2 (Проект IX.135.2.4).

---

**Цитирование:** Горелик Я. Б. Об эффективности применения термостабилизаторов при строительстве на многолетнемерзлых грунтах / Я. Б. Горелик, А. Х. Хабитов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 3. С. 25-46.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-25-46

конструкцию несущих элементов фундамента, включающую размещение неоробренного термостабилизатора целиком внутри корпуса сваи. Выполнено сопоставление результатов расчета для системы неоробренных термостабилизаторов с данными существующих натуральных наблюдений, которые подтверждают обоснованность предлагаемого технического решения.

#### **Ключевые слова**

Мерзлые породы, основания сооружений, термостабилизация, охлаждающие устройства, охлаждающий эффект, эффективность охлаждения.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-25-46**

#### **Введение**

При строительстве сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) по I принципу (с сохранением основания в мерзлом состоянии) основным типом фундаментов является свайный с применением полой трубчатой сваи. Основным конструктивным мероприятием, обеспечивающим требуемый температурный режим основания, является создание проветриваемого подполья [26, 31]. Без применения дополнительных мероприятий достижение проектных показателей температурного поля в основании требует определенного времени, исчисляемого несколькими годами, в силу инерционности теплообмена грунтов с наружным воздухом через дневную поверхность [23, 27]. Обеспечение требуемой несущей способности фундаментов в этом случае может быть достигнуто увеличением количества свай на единицу площади основания, что увеличивает капитальные затраты. Сокращение времени достижения проектного температурного режима возможно за счет применения снегоочистительных мероприятий (для открытых подполий). Однако это приводит к увеличению трудоемкости работ и к повышению эксплуатационных затрат, которые могут оказаться весьма существенными.

Для устранения этих недостатков используются охлаждающие устройства сезонного действия, опыт применения которых хорошо известен [3, 24]. Среди различных типов таких устройств наиболее подходящими в условиях подполий являются вертикальные двухфазные естественно-конвективные устройства малого диаметра (порядка 30-40 мм) с испарителем длиной до 10-15 м (относительно короткой подземной частью) и с оребренным конденсатором длиной около 1,5 м (в надземной части). Такие устройства известны также как термостабилизаторы [2]. Иная конструкция подобных устройств, основанная на принципе свободно-конвективного движения однофазной жидкости, применяется в так называемых «холодных сваях» [18, 19, 21]. Однако в настоящее время наибольшее распространение получили двухфазные конструкции [14-17, 20, 25, 29]. Тем не менее оба типа устройств могут быть использованы для понижения температуры мерзлых грунтов в основании сооружений до проектного значения и для поддержания этого состояния (термостабилизации) в течение

всего срока эксплуатации. Такие мероприятия зачастую выполняют еще на предпроектной стадии подготовки оснований после установки несущих свай. С применением устройств этого типа построены многокилометровые участки трубопроводов в варианте надземной прокладки (Трансаляскинский нефтепровод, нефте- и газопроводы по северу Западной и Восточной Сибири), жилые и промышленные здания в Якутии, сооружения технологического назначения северных месторождений нефти и газа в Российской Арктике [16, 19, 20]. Термостабилизаторы, размещаемые в непосредственной близости от несущих свай или вмонтированные в них, могут существенно сократить время достижения проектного температурного режима основания. Помимо прямого назначения, эти устройства могут обеспечить и дополнительный долгосрочный запас прочности сооружений в связи с возможным потеплением климата, которое прогнозируется рядом исследователей [30].

Вместе с тем применение термостабилизаторов для указанных целей сдерживается рядом факторов. Во-первых, их размещение вблизи свай требует дополнительного объема буровых работ для их погружения в грунт (бурение выполняется мотобуром или вручную, поскольку проезд буровой техники в пределах готового свайного поля невозможен), что повышает трудоемкость и заметно удорожает строительство. Известный альтернативный способ применения (в опорах трубопровода), заключающийся в размещении испарителя устройства внутри корпуса полый свай, подразумевает вывод оребренного конденсатора за его пределы в верхней (надземной) части [15]. В подпольях это требует выполнения специальных работ по изменению конструкции надземной части свай для обеспечения такого вывода и заметно усложняет монтажные работы по устройству ростверка, которые должны проводиться в непосредственной близости от конденсаторов устройств, не имеющих защиты от ударных и иных механических воздействий. Кроме того, сами применяемые конструкции охлаждающих устройств, обеспечивающие максимальную холодопроизводительность, также приводят к серьезному удорожанию строительства (в силу использования цветных металлов при изготовлении и монтаже оребрения конденсатора). Таким образом, стандартные способы применения термостабилизаторов для обозначенных выше целей оказываются недостаточно экономичными.

Второе важное обстоятельство заключается в том, что температура грунта вблизи отдельно стоящего термостабилизатора практически полностью восстанавливается до естественного значения в конце летнего периода [6], при этом достаточно строгие и обладающие необходимой общностью методы расчета оснований с применением системы термостабилизаторов, распределенных в пределах охлаждаемой площади с заданной плотностью, отсутствуют в настоящее время. Поскольку проектная несущая способность свай, согласно [26], определяется по максимальной температуре грунта в течение годового цикла (когда их несущая способность минимальна [32]), то это обстоятельство не позволяет использовать охлаждение грунта в зимнее время года в проектных решениях. Оно идет лишь в неконтролируемый запас прочности сооружений.

В работах [7, 9, 10] аналитическими методами показано, что для сооружений, протяженных в плане (с длиной и шириной порядка 10 м и более), охлаждаемых системой термостабилизаторов, среднегодовая температура основания понижается не менее чем на 2 °С уже за один годовой цикл охлаждения в сравнении с ее естественным значением. При этом максимальная температура грунта в конце летнего периода понижается не менее чем на градус. Т. е. эффективность работы системы термостабилизаторов оказывается существенно выше эффективности отдельного устройства. Причина этого заключается в том, что значительный объем охлаждаемого в зимнее время грунта не успевает разогреться в летнее время года: соотношение между теплосодержащим объемом и площадью поверхности теплообмена с окружающим массивом работает в пользу больших объемов. Этот вывод подтверждается натурным экспериментом [1], который показал, что охлаждение даже сравнительно небольшого объема, ограниченно в плане площадкой  $7 \times 7$  м с распределенными на ней 9 термостабилизаторами с длиной подземной части 6 м, дает понижение максимальной (в конце летнего периода) температуры грунта не менее чем на 0,6 °С.

Недостатком работ [7, 10] является использование приближенных аналитических методов, точность которых оценить затруднительно. Параллельно разрабатывались численные методы расчета динамики температурного поля в основании сооружений, охлаждаемых системой «холодных свай» [18, 19], результаты которых в целом согласуются с результатами аналитических вычислений. Однако недостатком этих методов является весьма частный способ задания интенсивности стоков тепла (соответствующих действию «холодных свай»), выражения для которых получены обработкой экспериментальных данных по замораживанию грунтов этими устройствами.

В настоящее время разработаны достаточно совершенные численные методы расчета динамики температурных полей, которые способны учитывать всю совокупность влияющих факторов, а также действие произвольного числа источников тепла различной природы [4, 11, 13] и которые применяются ниже для решения рассматриваемой проблемы. Кроме того, в настоящей работе используется достаточно общее соотношение для характеристики интенсивности источников в виде граничного условия 3-го рода, полученное на основе решения сопряженной задачи внутреннего течения хладагента и внешнего теплообмена устройства с атмосферой и грунтом [6]. Целью настоящей статьи является расчет динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах с использованием современных вычислительных методов и оценка на этой основе эффективности применяемых технических решений по термостабилизации грунтов.

### **Характеристика расчетных условий**

На формирование температурного режима мерзлых грунтов в основании сооружений с проветриваемым подпольем определяющее влияние оказывает временной ход температуры атмосферного воздуха в течение года [26, 31]. Важную роль

играют также теплофизические характеристики грунта, конструктивные параметры сооружения, плотность размещения охлаждающих устройств по площади основания. Определенное влияние оказывает температура грунта в естественном состоянии. В настоящей работе основным параметром, определяющим эффективность применяемых технических мероприятий по термостабилизации грунтов, принимается максимальная температура в основании сооружения, которая достигается в конце летнего периода. При сравнении различных технических решений также должны быть приняты во внимание их трудоемкость и технологичность.

Основные тенденции в характере поведения 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 тенденции ее изменения. Ниже для всех вариантов расчета приняты следующие характеристики грунта (для талого грунта принят индекс  $u$ , для мерзлого —  $f$ ): коэффициенты теплопроводности (Вт/м · град)  $\lambda_u = 1,75$ ,  $\lambda_f = 1,80$ ; объемная теплоемкость (Дж/м<sup>3</sup> · град)  $C_u = 2,68 \cdot 10^6$ ,  $C_f = 2,20 \cdot 10^6$ ; объемный вес скелета грунта  $\gamma_s = 1\,500$  кг/м<sup>3</sup>; влажность  $w = 0,2$ ; переход единицы объема мерзлого грунта в талое состояние характеризуется величиной скрытой объемной теплоты  $\kappa_v = \kappa \cdot \gamma_s \cdot w$ , где  $\kappa = 3,34 \cdot 10^5$  Дж/кг ( $\kappa_v = 10^8$  Дж/м<sup>3</sup>). Влажность грунта за счет незамерзшей воды  $w_u = 0$ . Температура начала замерзания грунта  $t_b = 0$  °С. Ход температуры воздуха в течение года принят в виде кусочно-постоянной функции из среднемесячных температур. Данные по температуре воздуха приняты по метеостанции «Уренгой» и представлены в таблице 1.

Таблица 1

Среднемесячные температуры воздуха по метеостанции «Уренгой»

Table 1

The monthly average air temperature by meteorological station "Urengoy"

Месяц	Средняя температура воздуха, °С	Месяц	Средняя температура воздуха, °С
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

В качестве примеров расчета рассматривается основание прямоугольного в плане здания длиной  $L = 24$  м и шириной  $B = 12$  м. Здание оборудовано открытым подпольем.

В основании в шахматном порядке с шагом 3 м установлены термостабилизаторы со следующими характеристиками: диаметр подземной части (испарителя)  $d = 32$  мм; длина испарителя  $l_i = 10$  м; конденсатор имеет высоту  $l_k = 784$  мм. В качестве хладагента используется аммиак. В рассмотренных ниже примерах показывается применение как оребренного, так и неоребреного конденсатора. Для оребренного конденсатора коэффициент теплообмена с наружным воздухом  $\alpha_k = 25$  Вт/м<sup>2</sup> · град; для неоребреного  $\alpha_k = 1,29$  Вт/м<sup>2</sup> · град [6].

### Расчетная область и граничные условия

Схематическое изображение расчетной области в плане и разрезе приведено на рис. 1. В силу имеющейся симметрии основания (относительно осей  $OX$  и  $OY$ ) общее температурное поле в рассматриваемом массиве может быть определено по температурному полю в минимальном фрагменте, соответствующем четверти здания. Расчетная область в плане ограничена с внешней стороны: отрезками прямых, проходящими через оси  $OX$  и  $OY$ , исходящими из центра здания ( $O$ ); отрезками прямых, параллельных осям  $OX$  и  $OY$  и отстоящих от них на расстоянии радиуса теплового влияния сооружения  $l(\tau_e)$  за принимаемый срок эксплуатации  $\tau_e$  [5]. Величина  $\tau_e$  принята равной 30 лет, а соответствующее значение  $l(\tau_e) = 80$  м. С внутренней стороны расчетная область ограничена совокупностью круговых контуров (диаметром  $d$ ), соответствующих расположению внешней стенки термостабилизаторов. По вертикальной оси  $OZ$  область ограничена снизу горизонтальной плоскостью, удаленной от нижнего торца испарителей на расстояние  $l(\tau_e) = 80$  м. Таким образом, с внешней стороны расчетная область характеризуется размерами прямоугольного параллелепипеда в соответствующих осях:  $(L+l(\tau_e)) \times (B+l(\tau_e)) \times (l_i+l(\tau_e))$ , а с внутренней — вертикальными цилиндрическими поверхностями диаметром  $d$ , соответствующими внешней границе испарителя термостабилизаторов.

На верхней поверхности массива грунта задается граничное условие 3-го рода, описывающее конвективный теплообмен поверхности с наружным воздухом:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=0} = K \cdot (t_a - t_g). \quad (1)$$

Здесь  $t$  — температура грунта как функция координат и времени;  $t_g$  — температура на верхней поверхности грунта (в каждый момент времени определяется в процессе счета);  $t_a$  — температура воздуха (определяется по таблице среднемесячных температур как кусочно-постоянная функция времени);  $K$  — коэффициент теплообмена;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности грунта (принимает значения  $\lambda_u$  или  $\lambda_f$  в зависимости от талого либо мерзлого состояния грунта, прилегающего к верхней границе массива). Коэффициент  $K$  имеет разные значения для летнего и зимнего периодов года, которые должны быть подобраны на предварительном шаге вычислений по данным изысканий, задающих фактические значения глубины сезонного протаивания ( $\xi_u$ ) и температуры на глубине нулевых амплитуд ( $t_0$ ) [5]. Такой выбор коэффициента теплообмена обеспечивает

стационарность естественного температурного поля (в отсутствии инженерного сооружения) ниже глубины нулевых амплитуд и исключает некорректное влияние верхней поверхности грунта на температурное поле в области влияния сооружения. Для принимаемых величин  $\xi_u = 1,3$  м и  $t_0 = -2$  °С корректно определенные сезонные значения коэффициента  $K$  равны (Вт/м<sup>2</sup> · град):  $K_u = 23,2$  и  $K_f = 1,39$ . Низкое значение зимнего коэффициента связано с существенным влиянием снежного покрова (в отсутствии сооружения).

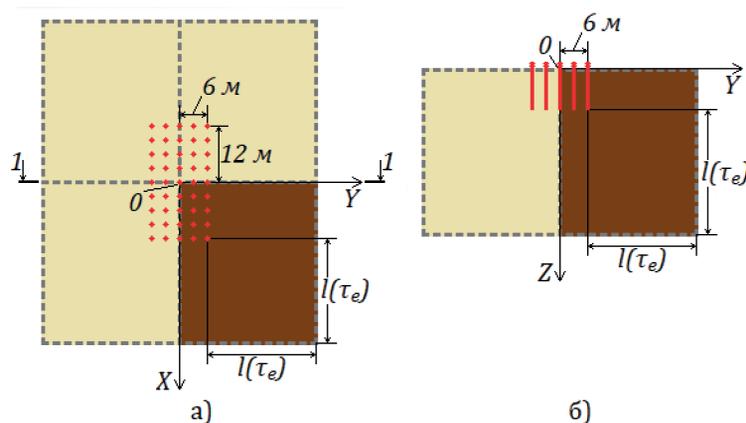


Рис. 1. Схема расчетной области для основания здания размером в плане 12 × 24 м: а) план, красные точки — расположение термостабилизаторов в пределах свайного поля; б) разрез по линии 1-1, вертикальные красные отрезки — термостабилизаторы. Коричневым цветом выделена расчетная область. Несущие элементы фундамента не показаны. Обозначения в тексте

Fig. 1. The scheme of calculation area 12 × 24 m: а) plan, red dots are the locations of thermostabilizers in the pile field; б) the cross-section along the line 1-1, red vertical segments are thermostabilizers. The brown color denotes the calculation area. The other definitions are in the text

Граничное условие на внешней стенке испарителя также различается для зимнего и летнего периодов. В пассивный период (летом) устройство не работает, и на стенке испарителя принимается нулевое значение теплового потока. В активный (зимний) период это условие записывается в следующем виде [6]:

$$-\lambda_f \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=d/2} = \alpha_k \cdot (t_a - t_g), \quad (2)$$

где  $t_g$  — температура грунта на контакте со стенкой испарителя (в каждый момент времени определяется в процессе счета).

На внешних границах расчетной области, проходящих через горизонтальные оси координат ( $OX$  и  $OY$ ), тепловой поток принимается равным нулю в силу зеркальной симметрии температурного поля относительно этих границ. Остальные

внешние границы расчетной области удалены от источников теплового возмущения на расстояние, превышающее радиус теплового влияния за срок эксплуатации, поэтому на них также принимается нулевое значение теплового потока. Начальная температура грунта во всей расчетной области принята  $t_0 = -2$  °С.

### Варианты расчета

Как отмечено выше, на первом шаге вычислений определяются сезонные коэффициенты теплообмена  $K_u$  и  $K_f$  в граничном условии (1), исключающие некорректное влияние верхней поверхности грунта на температурное поле в области влияния сооружения. Граничное условие (1) с выбранным значением этих коэффициентов используется во всех последующих расчетах.

Вторым шагом является расчет динамики температурного поля грунта вблизи отдельно стоящего устройства. Расчеты выполнены как для оребренного, так и для неоребренного термостабилизатора. Для приложений наиболее важными являются температуры грунта в конце первого активного периода, а также величина остаточного охлаждения (т. е. понижение температуры грунта в конце лета по сравнению с начальной) на 1-й и 30-й год работы устройства. Результаты расчета для отдельного термостабилизатора являются исходной точкой для оценки повышения эффективности охлаждения системой термостабилизаторов.

Основной этап вычислений включает расчет остаточного охлаждения основания системой термостабилизаторов (как оребренных, так и неоребренных) в конце 1-го и 30-го года эксплуатации.

Применяемые в расчетах вычислительные методы аналогичны тем, что ранее использовались авторами [11, 13]. Постановка задачи для определения динамики температурного поля в зоне влияния системы термостабилизаторов (с учетом фазовых переходов в грунтовой влаге в пределах слоя сезонного протаивания), конечно-разностный аналог исходных уравнений, разбиение расчетной области на ячейки и другие детали вычислительной процедуры достаточно подробно изложены в работах [4, 13]. Фактически в настоящей работе использована (с небольшими изменениями) та же вычислительная программа, что и в указанных выше публикациях.

### Результаты расчета

На рис. 2 показаны результаты расчета температурного поля в грунте для одиночного оребренного термостабилизатора в конце зимнего периода (на 1-й и 30-й годы охлаждения) и в конце летнего периода (на те же периоды времени). Рис. 3 показывает аналогичные результаты для одиночного неоребренного термостабилизатора.

На рис. 4а и 4б, 5а и 5б приведены результаты расчета температуры грунта в конце летнего периода в основании сооружения, охлаждаемого системой термостабилизаторов, для обоих вариантов его конструкции в центральном сечении основания. Рис. 4в и 5в показывают соответствующие распределения температуры для сечения по краю здания к концу срока эксплуатации.

В проветриваемых подпольях возможно снижение скорости обтекания конденсаторов потоком воздуха из-за дополнительного гидравлического сопротивления при обтекании оголовков свай и снижения вследствие этого коэффициента теплообмена конденсатора устройства с воздухом. Для оценки этого влияния на рис. 4г и 5г приведены результаты расчета охлаждающего эффекта в центральном сечении при снижении коэффициента теплообмена вдвое.

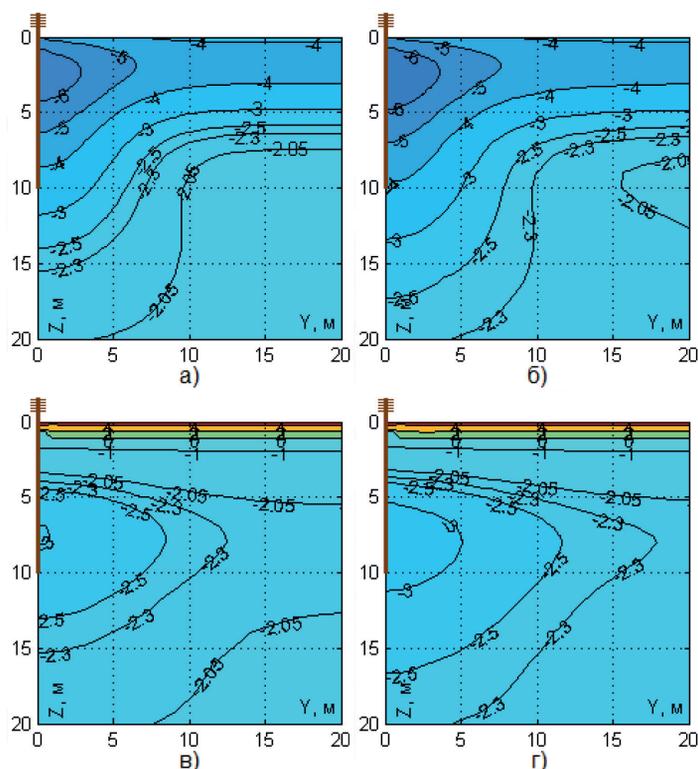


Рис. 2. Температурное поле одиночного оребренного термостабилизатора:

- а) конец зимы, 1-й год;
- б) конец зимы, 30-й год;
- в) конец лета, 1-й год;
- г) конец лета, 30-й год

Fig. 2. The temperature field of single thermostabilizer with finned condenser:

- a) 1<sup>st</sup> year, end of winter;
- б) 30<sup>th</sup> year, end of winter;
- в) 1<sup>st</sup> year, end of summer;
- г) 30<sup>th</sup> year, end of summer

### Обсуждение результатов

Сравнение расчетных полей на рис. 2 и 3 позволяет отметить важное обстоятельство: почти 20-кратное превышение коэффициента теплообмена для оребренного устройства в сравнении с неоребранным довольно слабо отражается на состоянии поля вблизи термостабилизатора. В зимнее время в конце 1-го года в области, прилегающей к испарителю (в пределах 3 м от него по горизонтали), температуры отличаются примерно на 1-1,5 градуса (рис. 2а и 3а, рис. 2б и 3б).

Понижение температуры в этой же части грунтового массива спустя 30 лет работы устройства слабо отличается от картины 1-го года охлаждения (рис. 2а и 2б, рис. 3а и 3б).

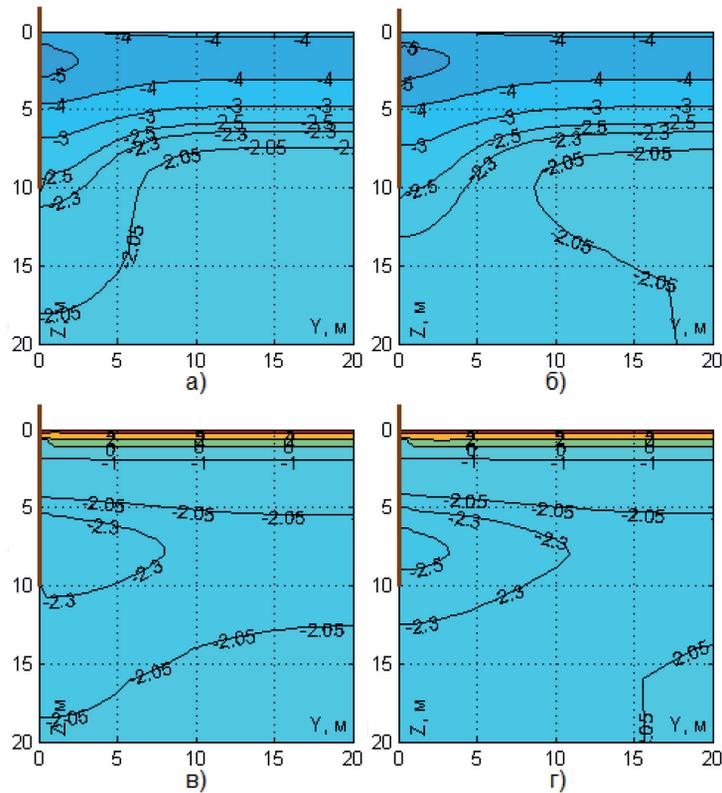


Рис. 3. Температурное поле одиночного неоребреного термостабилизатора:

- а) конец зимы, 1-й год;
- б) конец зимы, 30-й год;
- в) конец лета, 1-й год;
- г) конец лета, 30-й год

Fig. 3. The temperature field of single thermostabilizer with unfinned condenser:

- a) 1<sup>st</sup> year, end of winter;
- б) 30<sup>th</sup> year, end of winter;
- в) 1<sup>st</sup> year, end of summer;
- г) 30<sup>th</sup> year, end of summer

В конце летнего периода величина остаточного охлаждения достигает  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  для 1-го года работы и  $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  на 30-й год для ребренного конденсатора (рис. 2в и 2г). Для неоребреного варианта соответствующие значения равны  $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  для 1-го года работы и  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  на 30-й год (рис. 3в и 3г). Учитывая сильную зависимость несущей способности мерзлых грунтов от отрицательной температуры [32], эти значения для одиночного термостабилизатора в обоих вариантах конструкций могут оказаться важными для некоторых специальных случаев строительства. Также важным является близость величин остаточного охлаждения для обеих конструкций термостабилизаторов (отличающихся примерно на  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Слабая зависимость температуры грунта от коэффициента тепло-

обмена конденсатора с воздухом для одиночного устройства обусловлена низким коэффициентом теплопроводности грунта, который по этому параметру близок к теплоизоляторам [6]. В этой части представленные результаты расчета показывают, что в подавляющем числе практически важных случаев применение одиночного термостабилизатора будет недостаточно для круглогодичного поддержания грунта в твердомерзлом состоянии.

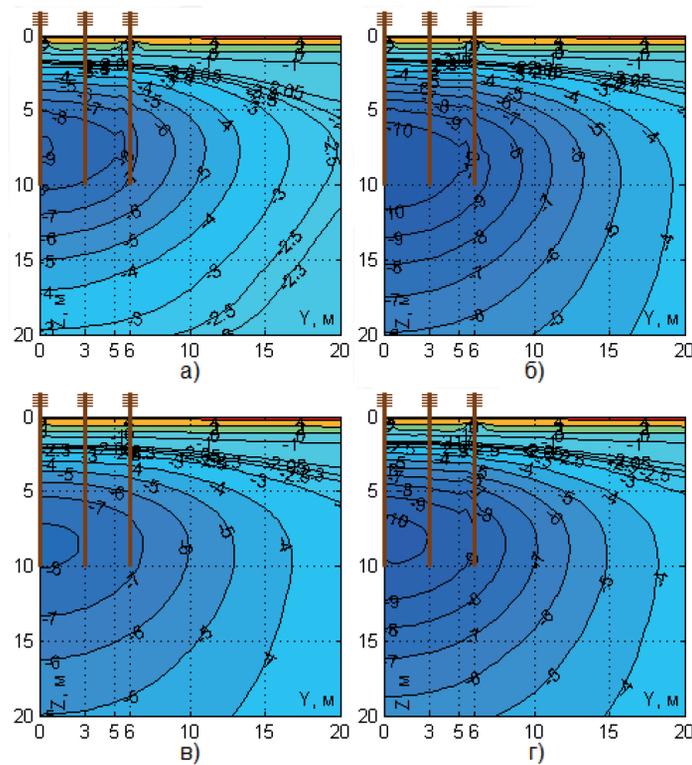


Рис. 4. Температурное поле в основании здания, охлаждаемого системой ребренных термостабилизаторов (несущие элементы фундамента не показаны): а) центральное сечение, конец 1-го лета; б) центральное сечение, конец 30-го лета; в) край здания, конец 30-го лета; г) центральное сечение,  $0,5 \alpha_k$ , конец 30-го лета

Fig. 4. The temperature field of thermostabilizer group with a finned condenser at the base of the building (the supporting elements not shown): а) 1<sup>st</sup> year, central section, end of summer; б) 30<sup>th</sup> year, central section, end of summer; в) 30<sup>th</sup> year, end of base, end of summer; г) 30<sup>th</sup> year, central section, end of summer,  $0,5 \alpha_k$

Результаты расчетов, приведенные на рис. 4 и 5, показывают качественное изменение в картине температурных полей при охлаждении основания системой термостабилизаторов. Система ребренных термостабилизаторов обеспечивает понижение температуры грунтового массива в центральном сечении основания около  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  уже в конце зимы 1-го года охлаждения, а к 30-му году

оно достигает  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 4а и 4б). Для сечения по краю здания к концу срока эксплуатации охлаждающий эффект примерно в два раза ниже, чем в центре, но остается весьма значительным (рис. 4в). При снижении коэффициента теплообмена вдвое (вследствие снижения скорости потока воздуха в подполье) уменьшение охлаждающего эффекта является незначительным (рис. 4г). Для подавляющего большинства мерзлых грунтов такое понижение температуры обеспечивает перевод их в твердомерзлое состояние со значительным запасом [26, 32]. Однако этот эффект достигается существенными материальными затратами (перечисленными во введении), которые на практике оказываются избыточными. Т. е., несмотря на значительный охлаждающий эффект, применение системы оребренных термостабилизаторов является недостаточно эффективным по совокупности технико-экономических показателей.

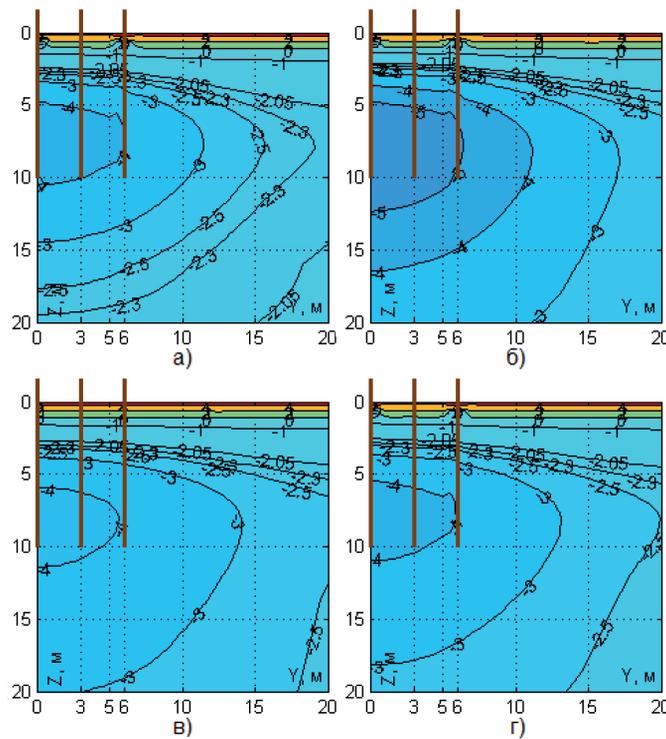


Рис. 5. Температурное поле в основании здания, охлаждаемого системой неоребранных термостабилизаторов (несущие элементы фундамента не показаны): а) центральное сечение, конец 1-го лета; б) центральное сечение, конец 30-го лета; в) край здания, конец 30-го лета; г) центральное сечение,  $0,5 \alpha_k$ , конец 30-го лета

Fig. 5. The temperature field of a thermostabilizer group with unfinned condenser in the base of the building (the supporting elements not shown): а) 1<sup>st</sup> year, central section, end of summer; б) 30<sup>th</sup> year, central section, end of summer; в) 30<sup>th</sup> year, end of base, end of summer; г) 30<sup>th</sup> year, central section, end of summer,  $0.5 \alpha_k$

Применение системы устройств неоребренной конструкции создает охлаждающий эффект для центра здания в конце лета 1-го года величиной примерно 1 °С, а к концу срока эксплуатации он достигает 2 °С (рис. 5а и 5б). Для края здания охлаждающий эффект составляет примерно 0,5-0,7 °С (рис. 5в). При уменьшении коэффициента теплообмена конденсатора с воздухом вдвое охлаждение в центре здания к концу срока эксплуатации составляет около 1 °С (рис. 5г).

Система неоребранных термостабилизаторов в весьма значительном числе случаев достаточна для перевода грунтов в твердомерзлое состояние уже в 1-й год применения (слабозасоленные супесчаные и песчаные грунты, которые достаточно широко распространены, например, по северу Тюменской области). Дополнительное обоснование эффективности применения неоребранных термостабилизаторов можно получить из анализа натуральных наблюдений за температурным режимом десятков зданий, возведенных с применением «холодных свай» в г. Мирном [18, 19, 21]. Данные мониторинга показывают величину дополнительного охлаждения грунтов основания около 1 °С (от начального значения -0,2...-1,0 °С до -1,0...-2,0 °С соответственно в различных точках грунта) при отсутствии деформаций в несущих конструкциях этих зданий в течение срока наблюдения (около 10 лет). В работе [8] путем решения сопряженной задачи течения хладагента и его внешнего теплообмена для однофазного естественно-конвективного охлаждающего устройства показано, что граничное условие для теплообмена в подземной части такого устройства (на контакте с грунтом) имеет вид соотношения (2), а коэффициент теплообмена  $K_l$  (стоящий в его правой части перед разностью температур) выражается следующим образом:

$$K_l = (\alpha_c^{-1} + \alpha_k^{-1})^{-1}, \quad (3)$$

где  $\alpha_k$  — коэффициент теплообмена надземной части устройства с воздухом;  $\alpha_c$  — естественно-конвективный коэффициент теплообмена в вертикальном цилиндрическом канале между жидкостью и стенкой канала. Последний определяется соответствующей зависимостью числа Нуссельта от произведения чисел Прандтля и Грасгофа [28], а в конечном итоге — величиной температурного напора между надземной и подземной частями устройства (которая, в свою очередь, зависит от установившейся скорости циркуляции жидкости), а также теплофизическими и гидродинамическими свойствами жидкости. В цитируемой работе получены характерные значения для скорости циркуляции хладагента (порядка 1-2 см/с) и температурного напора (порядка 0,2-0,3 °С). Для керосина (используемого в «холодных сваях») значения коэффициента теплообмена лежат в пределах величин  $K_l \approx 1-2$  (Вт/м<sup>2</sup> · град), что совпадает с величиной  $\alpha_k$  для неоребреного двухфазного устройства. Поскольку для решения задачи о нахождении температурного поля в основании зданий действие источников характеризуется только соотношением (2) независимо от их типа, то совпадение коэффициентов теплообмена  $K_l$  и  $\alpha_k$  позволяет рассматривать результаты натуральных наблюдений температуры под зданиями в г. Мирный как опытное подтверждение расчетов для системы неоребранных термостабилизаторов, которые пред-

ставлены на рис. 5 (с определенными оговорками на несовпадение свойств грунтов, климатических данных и т. д.).

Из сказанного выше вытекает важное в практическом отношении следствие: при охлаждении протяженных в плане оснований системой термостабилизаторов не следует стремиться к максимальной производительности отдельного устройства. Необходимо обеспечить лишь их достаточную производительность, обратив особое внимание на простоту и экономичность конструкций и технологичность их применения. Возможная конструкция свай в таком варианте применения, описанная в работах [12, 22], включает металлический трубчатый корпус, в полости которого вплотную к его внутренней стенке размещаются двухфазные охлаждающие устройства. Малый диаметр трубок обеспечивает легкость монтажа свай. Совмещение несущих свай с охлаждающими элементами исключает бурение дополнительных скважин для размещения устройств в грунте, дополнительные затраты на изготовление и монтаж оребрения и устраняет нежелательные помехи (в виде выступающих над землей конденсаторов) при монтаже надфундаментных конструкций. Кроме того, корпус термостабилизатора в период эксплуатации защищен от случайных механических воздействий, между сваями освобождаются проходы и повышается эстетический вид сооружения. Этими преимуществами достигается надежность и экономичность свайных фундаментов для протяженных в плане сооружений. Применение предлагаемой конструкции достаточно для перевода супесчаных незасоленных грунтов в твердомерзлое состояние за один годовой цикл. Фактически предлагаемая комбинированная конструкция свайного фундамента с двухфазным вертикальным охлаждающим устройством является аналогом «холодной сваи», комбинированная конструкция которой включает однофазное охлаждающее устройство со сходными характеристиками производительности. Достаточность производительности этих конструкций обоснована как успешным опытом эксплуатации десятков построенных зданий, так и результатами приведенных выше расчетов.

Аналогичная простейшая комбинация термостабилизатора со свайей может быть применена в качестве противопучинного мероприятия в свайных опорах трубопроводов при их надземной прокладке. Основная идея их применения в данном случае основана на том, что одновременно с промерзанием деятельного слоя (где развиваются тангенциальные силы пучения) понижается и температура грунта ниже деятельного слоя (за счет работы термостабилизатора). Это обеспечивает увеличение несущей способности анкерной части сваи, которая противостоит выдергивающим нагрузкам. Такое мероприятие может повысить надежность прокладки трубопроводов при минимальных затратах.

### **Заключение**

Анализ результатов выполненных вычислений и их сопоставление с имеющимися фактическими данными по исследованию работы вертикальных двухфазных естественно-конвективных устройств, а также по применению их аналогов в строительстве на ММГ позволяет сделать несколько выводов.

1. В подавляющем числе практически важных случаев применение одиночного термостабилизатора будет недостаточно для круглогодичного поддержания грунта в твердомерзлом состоянии. В конце летнего периода величина остаточного охлаждения достигает  $-0,5$  °C для 1-го года работы и  $-1,0$  °C на 30-й год для оребренного конденсатора (рис. 2в и 2г). Для неоребренного варианта соответствующие значения равны  $-0,3$  °C для 1-го года работы и  $-0,5$  °C на 30-й год (рис. 3в и 3г). Учитывая сильную зависимость несущей способности мерзлых грунтов от отрицательной температуры, эти значения для одиночного термостабилизатора в обоих вариантах конструкций могут оказаться важными для некоторых специальных случаев строительства (например, в противопучинных мероприятиях). Величина остаточного охлаждения для обеих конструкций термостабилизаторов отличаются слабо (примерно на  $0,2$  °C) даже при 20-кратном усилении теплообмена для оребренного конденсатора. Слабая зависимость температуры грунта от коэффициента теплообмена для одиночного устройства обусловлена низким коэффициентом теплопроводности грунта, который по этому параметру близок к теплоизоляторам [6].
2. Система оребренных термостабилизаторов обеспечивает понижение температуры грунтового массива в центральном сечении основания около  $4$  °C уже в конце зимы 1-го года охлаждения, а к 30-му году оно достигает  $7$  °C (рис. 4а и 4б). Для сечения по краю здания к концу срока эксплуатации охлаждающий эффект примерно в два раза ниже, чем в центре, но остается весьма значительным (рис. 4в). Для подавляющего большинства мерзлых грунтов такое понижение температуры обеспечивает перевод их в твердомерзлое состояние со значительным запасом [26, 32]. Однако этот эффект достигается значительными материальными затратами (перечисленными во введении), которые чаще всего будут избыточными. Т. е., несмотря на большую величину остаточного охлаждения, применение системы оребренных термостабилизаторов является недостаточно эффективным по совокупности технико-экономических показателей.
3. Применение системы устройств неоребренной конструкции создает охлаждающий эффект для центра здания в конце лета 1-го года величиной примерно  $1$  °C, а к концу срока эксплуатации он достигает  $2$  °C (рис. 5а и 5б). Для края здания охлаждающий эффект составляет примерно  $0,5-0,7$  °C (рис. 5в). Система неоребренных термостабилизаторов в весьма значительном числе случаев достаточна для перевода грунтов в твердомерзлое состояние уже в 1-й год применения (незасоленные супесчаные грунты, которые достаточно широко распространены, например, по северу Тюменской области).
4. Результаты расчета температурных полей в массивах ММГ оснований при действии термостабилизаторов, полученные в настоящей работе с применением современных вычислительных методов, количественно уточняют полученные ранее [6-10, 12, 18, 19, 21] характеристики охлаждения. При этом качественная картина остается неизменной.

5. При охлаждении системой термостабилизаторов протяженных в плане оснований не следует стремиться к максимальной производительности отдельного устройства. Необходимо обеспечить их достаточную производительность, уделив внимание простоте и экономичности конструкций, а также технологичности их применения. Возможная конструкция свай в таком варианте применения описана в работах [12, 22]. Применение предлагаемой конструкции достаточно для перевода супесчаных незасоленных грунтов в твердомерзлое состояние за один годовой цикл. Комбинированная конструкция свайного фундамента с двухфазным вертикальным охлаждающим устройством является аналогом «холодной сваи», конструкция которой включает однофазное охлаждающее устройство со сходными характеристиками производительности. Достаточность производительности этих конструкций обоснована как успешным опытом эксплуатации десятков построенных зданий, так и результатами приведенных выше расчетов. Аналогичная простейшая комбинация термостабилизатора со свайей может быть применена в качестве противопучинного мероприятия в свайных опорах трубопроводов при их наземной прокладке.
6. В предлагаемой конструкции комбинированной сваи малый диаметр трубок обеспечивает легкость их монтажа. Совмещение несущих свай с охлаждающими элементами исключает бурение дополнительных скважин для размещения устройств в грунте, дополнительные затраты на изготовление и монтаж оребрения и устраняет нежелательные помехи (в виде выступающих над уровнем земли конденсаторов) при монтаже надфундаментных конструкций. Кроме того, корпус термостабилизатора в период эксплуатации защищен от случайных механических воздействий, между сваями освобождаются проходы и повышается эстетический вид сооружения. Этими преимуществами достигается надежность и экономичность свайных фундаментов при строительстве на ММГ и определяются достаточно высокие показатели эффективности применения термостабилизаторов в предлагаемом варианте.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Ю. А. Охлаждение пластично-мерзлых грунтов кустовой системой парожидкостных СОУ / Ю. А. Александров // Геокриологический прогноз при строительном освоении территории: материалы Всесоюз. совещ. Воркута: Госстрой СССР, 1985. Кн. 2. С. 283-286.
2. Баясан Р. М. Сравнительная оценка работы двухфазных термосифонов для термостабилизации грунтов в криолоитозоне / Р. М. Баясан, А. Д. Лобанов, Т. В. Баясан, С. И. Голубин // Инженерные изыскания. 2012. № 7. С. 60-63.
3. Вялов С. С. Искусственное охлаждение грунтов с применением термосвай / С. С. Вялов, Ю. А. Александров, Ю. С. Миренбург и др. // Инженерное мерзлотоведение. М.: Наука, 1979. С. 72-90.

4. Горелик Я. Б. Динамика протаивания мерзлых пород в зоне влияния двух скважин / Я. Б. Горелик, А. Б. Шабаров, Ю. С. Сысоев // Криосфера Земли. 2008. Том XII. № 1. С. 59-65.
5. Горелик Я. Б. Корректность постановки и решения задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах / Я. Б. Горелик, Д. С. Паздерин // Криосфера Земли. 2017. Том XXI. № 3. С. 49-59. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(49-59)
6. Горелик Я. Б. Об эффективности оребрения вертикальных двухфазных естественно-конвективных охлаждающих устройств для строительства на мерзлых грунтах / Я. Б. Горелик, А. А. Селезнев // Криосфера Земли. 2016. Том XX. № 2. С. 78-89.
7. Горелик Я. Б. Предпостроечное охлаждение грунтов с применением термосвай / Я. Б. Горелик, И. Г. Измайлов // Проблемы нефти и газа Тюмени. 1984. Вып. 61. С. 85-88.
8. Горелик Я. Б. Расчет температурного поля грунта вокруг жидкостной термосваи / Я. Б. Горелик // Проблемы нефти и газа Тюмени. 1980. Вып. 46. С. 65-69.
9. Горелик Я. Б. Расчет температурного поля грунта вокруг парожидкостной термосваи / Я. Б. Горелик // Проблемы нефти и газа Тюмени. 1980. Вып. 47. С. 58-61.
10. Горелик Я. Б. Расчет температуры грунта в основании сооружения, возводимого с применением термосвай / Я. Б. Горелик, М. С. Мельцер // Нефтепромысловое строительство. М.: ВНИИОЭНГ, 1980. С. 19-20.
11. Горелик Я. Б. Роль теплоизоляции скважин при определении расстояния между устьями в районах распространения многолетнемерзлых грунтов / Я. Б. Горелик, А. Х. Хабитов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 2. С. 10-26. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-10-26
12. Горелик Я. Б. Свайный фундамент для капитальных сооружений северных месторождений / Я. Б. Горелик // Газовая промышленность. 2005. № 1. С. 82-84.
13. Горелик Я. Б. Учет совместного теплового действия скважин в кусте при расчете параметров области протаивания мерзлых грунтов / Я. Б. Горелик, С. Н. Романюк, А. Х. Хабитов // Криосфера Земли. 2019. Том XXIII. № 2. С. 79-87. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-2(79-87)
14. Долгих Г. М. Перспективные технические решения НПО «Фундаментстройаркос» по строительству и обеспечению надежности охлаждаемых оснований сооружений в период эксплуатации на многолетнемерзлых грунтах / Г. М. Долгих, С. Н. Окунев // Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменений: материалы Междунар. конф. Тюмень, 2006. Том 2. С. 228-232.
15. Долгих Г. М. Практический опыт строительства оснований зданий и сооружений в условиях ВМГ / Г. М. Долгих, Ю. О. Кинцлер, С. Н. Окунев. Тюмень: Фундаментстройаркос, 2002. 155 с.
16. Долгих Г. М. Технические решения по замораживанию грунтов оснований, применяемые НПО «Фундаментстройаркос» / Г. М. Долгих, Д. Г. Долгих, С. Н. Окунев // Криосфера нефтегазоносных провинций: материалы Междунар. конф. Тюмень, 2004. С. 56.
17. Кутвицкая Н. Б. Проектирование оснований и фундаментов объектов обустройства нефтегазоконденсатных месторождений в сложных мерзлотно-грунтовых

- условиях / Н. Б. Кутвицкая, М. А. Минкин // Основания, фундаменты, механика грунтов. 2014. № 1. С. 21-25.
18. Макаров В. И. К вопросу о применении жидкостных термосифонов в северном фундаментостроении / В. И. Макаров, А. А. Плотников // Геокриологические исследования в Западной Якутии. Новосибирск: Наука, 1980. С. 26-40.
  19. Макаров В. И. Термосифоны в северном строительстве / В. И. Макаров. Новосибирск: Наука, 1985. 168 с.
  20. Минкин М. А. Основания и фундаменты сооружений на вечномёрзлых грунтах / М. А. Минкин. М.: ГАСИС, 2005. 213 с.
  21. Молочников А. Д. Опыт применения свай СХЯ в г. Мирном / А. Д. Молочников // Геокриологические исследования в Западной Якутии. Новосибирск: Наука, 1980. С. 23-26.
  22. Патент RU 150908 U1. Устройство для термостабилизации грунтов / Я. Б. Горелик, В. П. Мельников, И. З. Фахретдинов, В. Ф. Штоль, Р. Я. Горелик // Открытия. Изобретения. 2015.
  23. Порхаев Г. В. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномёрзлыми грунтами / Г. В. Порхаев. М.: Наука, 1970. 208 с.
  24. Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств / отв. ред. С. С. Вялов. Якутск: ИМ СО РАН, 1983. 124 с.
  25. Системы температурной стабилизации грунтов оснований в криолитозоне: тр. ученых и специалистов ООО НПО «Фундаментстройаркос» за 2010-2014 гг. / под ред. Г. М. Долгих. Новосибирск: Гео, 2014. 218 с.
  26. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. М.: Минрегионразвития, 2008. 140 с.
  27. Таргулян Ю. О. Устройство свайных фундаментов в вечномёрзлых грунтах / Ю. О. Таргулян. Л.: Стройиздат, 1978. 175 с.
  28. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров / Х. Уонг. М.: Атомиздат, 1979. 215 с.
  29. Хрусталеv Л. Н. Опыт и перспективы использования автономных парожидкостных охлаждающих устройств в строительстве на вечномёрзлых грунтах / Л. Н. Хрусталеv, О. М. Янченко, Л. А. Наумова // Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств. Якутск: ИМ СО РАН, 1983. С. 3-12.
  30. Хрусталеv Л. Н. Прогноз потепления климата и его учет при оценке надежности оснований зданий на вечномёрзлых грунтах / Л. Н. Хрусталеv, И. В. Давыдова // Криосфера Земли. 2007. Том XI. № 2. С. 68-75.
  31. Хрусталеv Л. Н. Стабилизация вечномёрзлых грунтов в основании зданий / Л. Н. Хрусталеv, В. В. Никифоров. Новосибирск: Наука, 1990. 209 с.
  32. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов / Н. А. Цытович. М.: Высшая школа, 1973. 447 с.

Jacob B. GORELIK<sup>1</sup>  
Artur K. KHABITOV<sup>2</sup>

UDC 624.139

**ON THE EFFICIENCY OF ADAPTING  
THE THERMOSTABILIZERS FOR BUILDING  
ACTIVITY IN PERMAFROST\***

<sup>1</sup> Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Head of the Laboratory of Heat and Mass Transfer Events, Earth Cryosphere Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tyumen) gorelik@ikz.ru; ORCID: 0000-0002-2865-3236

<sup>2</sup> Postgraduate Student, Earth Cryosphere Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Engineer, Giprotymenneftegaz (Tyumen) prof.power@yandex.ru; ORCID: 0000-0003-3241-6644

**Abstract**

This article proposes a calculation method of frozen soil temperature field in the base of the buildings with ventilated basement and with using thermostabilizers. The results of calculation indicate that finned thermostabilizers provide the necessary decrease in temperature (up to 3...4 °C) during the first year of their exploitation (for the longest buildings in plan). The application of unfinned thermostabilizers (even though their coefficient of the heat exchange with air is substantially lower than for finned one) provides a sufficiency cooling effect (up to 1...2 °C) for faint saline sandy ground, which are wide-spread in any cold regions. In the latter case, it allows creating a most efficient construction of foundation: an unfinned thermostabilizer is placed completely inside a pile's corps.

The authors have compared the calculation results for unfinned thermostabilizers with existing experimental data, which confirm the basis of suggested technical decision in facts.

---

\* The study was done in accordance with RF State Tasking Order of Program of Fundamental Researches RAS IX.135.2 (Project IX.135.2.4).

---

**Citation:** Gorelik J. B., Khabitov A. K. 2019. "On the efficiency of adapting the thermostabilizers for building activity in permafrost". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 3, pp. 25-46.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-25-46

**Keywords**

Frozen ground, base of the building, thermostabilization, cooling devices, cooling effect, efficiency of the cooling.

**DOI:** 10.21684/2411-7978-2019-5-3-25-46

**REFERENCES**

1. Alexandrov Yu. A. 1985. "Cooling of viscous frozen soils by a pad of vapor-liquid cooling devices". In: Gosstroy SSSR. Geocryological Prediction in Construction Development. Proceedings of the All-Russian Conference. Vol. 2, pp. 283-286. Vorkuta. [In Russian]
2. Bayasan R. M., Lobanov A. D., Bayasan T. V., Golubin S. I. 2012. "Comparative assessment of the operating efficiency of two-phase thermosiphons for soil thermal stabilisation in the criolithozone". Engineering Survey, no 7, pp. 60-63. [In Russian]
3. Vyalov S. S., Alexandrov Yu. A., Mirenburg Yu. S. et al. 1979. "Artificial cooling of the ground with employment of the thermal piles". In: Engineering Geocryology, pp. 72-90. Moscow: Nauka. [In Russian]
4. Gorelik J. B., Shabarov A. B., Sysoyev Yu. S. 2008. "The dynamics of frozen ground melting in the influence zone of two wells". Earth's Cryosphere, vol. 12, no 1, pp. 59-65. [In Russian]
5. Gorelik J. B., Pazderin D. S. 2017. "Correctness of formulation and solution of thermotechnical problems of forecasting temperature field dynamics in the ground base of structures on permafrost". Earth's Cryosphere, vol. 21, no 3, pp. 49-59. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(49-59) [In Russian]
6. Gorelik J. B., Seleznev A. A. 2016. "Efficiency of finning in short vertical two-phase thermosiphons for construction on permafrost". Earth's Cryosphere, vol. 20, no 2, pp. 78-89. [In Russian]
7. Gorelik J. B., Izmailov I. G. 1984. "Pre-construction ground cooling with thermal piles". Problemy nefti i gaza Tyumeni, vol. 61, pp. 85-88. [In Russian]
8. Gorelik J. B. 1980. "Modeling ground temperature field around liquid thermal piles". Problemy nefti i gaza Tyumeni, vol. 46, pp. 65-69. [In Russian]
9. Gorelik J. B. 1980. "Modeling ground temperature field around vapor-liquid thermal piles". Problemy nefti i gaza Tyumeni, vol. 47, pp. 58-61. [In Russian]
10. Gorelik J. B., Meltser M. S. 1980. "Ground temperature assessment for construction with the use of thermosiphons" In: Construction for Oil Production, pp. 19-20. Moscow: VNIIOENG. [In Russian]
11. Gorelik J. B., Khabitov A. K. 2019. "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, vol. 5, no 2, pp. 10-26. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-10-26 [In Russian]
12. Gorelik J. B. 2005. "Pile basements for fundamental structures in high-latitude oil and gas fields". Gazovaya Promyshlennost', no 1, pp. 82-84. [In Russian]

13. Gorelik J. B., Romanyuk S. N., Khabitov A. K. 2019. "Joint thermal effect of multiple wells on permafrost thawing patterns". *Earth's Cryosphere*, vol. 23, no 2, pp. 79-87. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-2(79-87) [In Russian]
14. Dolgikh G. M., Okunev S. N. 2006. "Construction and stabilization of cooled foundations in permafrost by Fundamentstroiarokos Company: Promising engineering solutions". *Proceedings of the International Conference "Theory and Practice of Permafrost Assessment and Predictions"*. Vol. 2, pp. 228-232. Tyumen. [In Russian]
15. Dolgikh G. M., Kintsler Yu. O., Okunev S. N. 2002. *Practical Experience in the Construction of Buildings' and Structures for Permafrost Soils*. Tyumen: Fundamentstroiarokos. [In Russian]
16. Dolgikh G. M., Dolgikh D. G., Okunev S. N. 2004. "Freezing of soils: engineering solutions of Fundamentstroiarokos Company". *Proceedings of the International Conference "The Cryosphere of Petroleum Provinces"*. Tyumen. [In Russian]
17. Kutvitskaya N. B., Minkin M. A. 2014. "Design of beds and foundations of infrastructure for oil-gas condensate fields under complex frozen-soil conditions". *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 51, no 1, pp. 36-41. DOI: 10.1007/s11204-014-9251-2
18. Makarov V. I., Plotnikov A. A. 1980. "To the question for employment of liquid thermosiphons in Northern building activity". In: *Geocryological Studies in Western Yakutya*, pp. 26-40. Novosibirsk. Nauka. [In Russian]
19. Makarov V. I. 1985. *Thermosiphons in High-Latitude Construction Engineering*. Nauka, Novosibirsk. [In Russian]
20. Minkin M. A. 2005. *Basements and Foundations in Permafrost*. Moscow: GASIS. [In Russian]
21. Molochnikov A. D. 1980. "An experience of employment of the 'cold piles' in Mirny town". In: *Geocryological Studies in Western Yakutya*, pp. 23-26. Novosibirsk: Nauka. [In Russian]
22. Gorelik J. B., Melnikov V. P., Fakhrutdinov I. Z., Shtol V. F., Gorelik R. Ya. RF Patent RU 150908 U1. "A device for thermal stabilization of ground". *Otkrytiya. Izobreteniya*, no 7. [In Russian]
23. Porchaev G. V. 1970. *Heat Interaction of the Buildings and Structures with Permafrost*. Moscow: Nauka. [In Russian]
24. Vyalov S. S. (ed.). 1983. *Regulation of Ground Temperature Using Thermosiphons*. Yakutsk: IM SO RAN. [In Russian]
25. Dolgikh G. M. (ed.). 2014. *Systems for Thermal Stabilization of Permafrost. A Collection of Papers by Specialists from Fundamentstroiarokos R&D Company for 2010-2014*. Novosibirsk: Geo. [In Russian]
26. RF Ministry of Regional Development. 2008. Working Document SP 25.13330.2012. *Basements and foundations in permafrost*. Moscow: Minregionrazvitiya. [In Russian]
27. Targulyan Yu. O. 1978. *An Arrangement of Pile Foundations in Permafrost*. Leningrad: Stroyizdat. [In Russian]
28. Wong H. Y. 1977. *Handbook of Essential Formulae and Data on Heat Transfer for Engineers*. Moscow: Atomizdat. [In Russian]
29. Khrustalev L. N., Yanchenko O. M., Naumova L. A. 1983. "Use of autonomous vapor-liquid cooling devices in construction on permafrost: experience and prospects".

- In: Vyalov S. S. (ed.). Regulation of Ground Temperature Using Thermosyphons, pp. 3-12. Yakutsk: IM SO RAN. [In Russian]
30. Khrustalev L. N., Davydova I. V. "Forecast of climate warming and account of it at estimation of foundation reliability for building in permafrost zone". Earth's Cryosphere, vol. 11, no 2, pp. 68-75. [In Russian]
  31. Khrustalev L. N., Nikiforov V. V. 1990. A Stabilization of the Building's Bases in Permafrost. Novosibirsk: Nauka. [In Russian]
  32. Tsytovich N. A. 1973. Mechanics of Frozen Soil. Moscow: Vysshaya Shkola. [In Russian]