

УДК 001.894.2:624.15

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-103-114](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-103-114)

МЕТОД СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ТЕРМОРЕГУЛИРУЕМОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ВЕЧНОМЕРЗЛОМ ГРУНТЕ

А.С. КЛИМОВ[✉], канд. техн. наук

И.И. ТЕРЕХОВА, канд. техн. наук

О.Л. КЛИМОВА

Е.В. ЧУМАКОВА

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», пр. Свободный, д. 79, г. Красноярск, 660041, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Вследствие глобального потепления климата происходит оттаивание вечномерзлых грунтов в северных регионах, а также увеличиваются ветровые и снеговые нагрузки на здания, сооружения и их фундаментные основания. Скопления снеговых осадков создают теплоизолирующий слой, препятствующий замораживанию грунта в холодный период года, а в теплый период года подвергает грунт влагонасыщению, что приводит к деформированию опорных конструкций зданий и сооружений.

Целью исследования является усовершенствование пространственной железобетонной фундаментной платформы жилого здания на вечномерзлом грунте путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы с использованием системы автоматического управления и разработка терморегулируемой оболочки железобетонной фундаментной платформы с возможностью восприятия ветровых потоков и предотвращения сильного снегопереноса в продуваемое подполье.

Материалы и методы. Для исследования системы автоматического управления процессом охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы использовалась печатная плата Arduino Uno.

Результаты. На основе применяемого оборудования разработана структурная схема экспериментальной установки для фиксирования изменения температур воздуха окружающей среды и вечномерзлого грунта. Для изучения эффективности применения системы автоматического управления процессом охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы, создана модель, реализованная в среде динамического моделирования технических систем SimInTech.

Выводы. Предложено новое техническое решение – терморегулируемая оболочка, выполненная из деревянных клееных панелей в виде модуля повышенной индустриализации, образующего с железобетонными плитами замкнутое пространство, причем во всех деревянных клееных панелях, установленных с возможностью восприятия ветровых потоков и предотвращения снегопереноса, встроены регулируемые жалюзийные решетки с электроприводом. Зпатентована пространственная железобетонная фундаментная платформа на вечномерзлом грунте.

Ключевые слова: фундаментная платформа, вечномерзлые грунты, здания, устройства термостабилизации грунтов, вентилируемые подполья

Для цитирования: Климов А.С., Терехова И.И., Климова О.Л., Чумакова Е.В. Метод стабилизации грунтового основания терморегулируемой пространственной железобетонной фундаментной платформы

на вечномёрзлом грунте // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 103–114. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-103-114](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-103-114)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

METHOD FOR SOIL BASE STABILIZATION USING THE THERMALLY CONTROLLED SPATIAL REINFORCED CONCRETE FOUNDATION PLATFORM IN THE PERMAFROST SOIL

A.S. KLIMOV✉, Cand. Sci. (Engineering)

I.I. TEREHOVA, Cand. Sci. (Engineering)

O.L. KLIMOVA

E.V. CHUMAKOVA

Siberian Federal University, Svobodny Ave., 79, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

Abstract

Introduction. As a result of the global warming, the thawing of permafrost soils in the northern regions occurs and leads to naturally increasing wind and snow loads on the buildings, structures, and their foundations. Snow accumulations create a heat-insulating layer preventing the soil freezing in the cold period of the year and moisturize the soil in the warm period, which leads to the deformation of the support structures of buildings and civil engineering works.

Aim. The study aims at the advancement of the spatial reinforced concrete foundation platform of a residential building on the permafrost soil by providing the direct cooling of the lower reinforced concrete slab of the foundation platform using the system of automatic control, as well as at the development of the thermally controlled shell of reinforced concrete foundation platform with the possibility of the resistance to wind currents and prevention of the massive snow transfer into the ventilated underfloor space.

Methods and materials. The system of automatic control of the soil cooling process due to the direct cooling of the lower reinforced concrete slab of the foundation platform was studied using the Arduino Uno printed circuit board.

Results. Based on the used equipment, the block diagram of the experimental setup was developed for recording variations in the air and permafrost soil temperature. In order to study the feasibility of the system for automatic control of the soil cooling process due to the direct cooling of the lower reinforced concrete slab of the foundation platform, a model was created and implemented in the SimInTechs environment for the dynamic modeling of technical systems.

Conclusions. As a result, the authors proposed a new technical solution represented by the thermally controlled shell, made of laminated timber in the form of a highly industrialized module forming the enclosed space with the reinforced concrete slabs. In addition, all laminated timber panels, installed with the possibility of resisting to wind currents and preventing the snow transfer, contain the electrically driven adjustable louvered grilles. The spatial reinforced concrete foundation platform on permafrost soil is patented.

Keywords: foundation platform, permafrost soils, buildings, soil thermal stabilization devices, ventilated underfloor space

For citation: Klimov A.S., Terehova I.I., Klimova O.L., Chumakova E.V. Method for soil base stabilization using the thermally controlled spatial reinforced concrete foundation platform in the permafrost soil. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 103–114 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-103-114](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-103-114)

Author contribution statements

All authors have made an equal contribution to the preparation of the article.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Введение

Вследствие глобального потепления климата происходит оттаивание вечномёрзлых грунтов в зоне экстремального северного региона [1–3]. Данная проблема выражается в увеличении ветровых и снеговых нагрузок на здания, сооружения и их фундаментные основания (рис. 1), отличающихся от нормативных значений, представленных в работе [4].

Большие скопления снеговых осадков создают теплоизолирующий слой, препятствующий замораживанию грунта. При естественных условиях верхний слой вечномёрзлых земель подвергается регулярным температурным изменениям, а именно: испытывает летом – влагонасыщение, а зимой – пучение грунта, что приводит к деформированию опорных конструкций зданий и сооружений.

Обзор литературы

«По данным современных изысканий температуры грунта на глубине 10–15 метров могут составлять от +4 до +6 °С и отличаются от установленных в 70–80-х годах на 6–10 °С. Расчет оценки растепления вечномёрзлых грунтов представлен в работе [5]. Согласно



Рис. 1. Скопление снега во дворе (слева) и в вентилируемом подполье (справа) жилого здания в г. Норильске
Fig. 1. Snow accumulation in the yard (left) and in the ventilated underfloor space (right) of a residential building in the city of Norilsk

предварительным расчетам во второй половине XXI века мерзлотный слой полностью деградирует» [5].

Поэтому упрочнение грунта в зоне многолетней мерзлоты под фундаментом жилых зданий является одной из наиболее актуальных и одновременно трудно решаемых задач в условиях северного региона. В настоящее время большое внимание уделяется поиску новых перспективных решений по стабилизации вечномерзлого грунтового основания [6–8]. Данные задачи привели к проектным решениям и созданию многих систем и устройств [9–14].



Рис. 2. Печатная плата Arduino Uno
 Fig. 2. Arduino Uno printed circuit board

Таблица 1

Описание печатной платы Arduino Uno

Table 1

Description of the Arduino Uno Printed Circuit Board

Параметры	Значения
Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7–12 В
Входное напряжение (предельное)	6–20 В
Микроконтроллер	ATmega 328
Аналоговые входы	6
Постоянный ток для вывода 3.3 В	50 мА
ОЗУ	2 Кб (ATmega328)
EEPROM	1 Кб (ATmega328)
Цифровые входы/ выходы	14 (шесть из которых могут использоваться как выходы ШИМ)
Флеш-память	32 Кб (ATmega328) из которых 0,5 Кб используется для загрузчика
Тактовая частота	16 МГц

Цель исследования

С учетом приведенных проблем целью исследования является усовершенствование пространственной железобетонной фундаментной платформы жилого здания на многолетне-мерзлом грунте. Задачами исследований являются моделирование процесса охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы для изучения эффективности с использованием системы автоматического управления (САУ) и разработка терморегулируемой оболочки железобетонной фундаментной платформы с возможностью восприятия ветровых потоков и предотвращения сильного снегопереноса в продуваемое подполье.

Материалы и методы

Поставленная цель решалась методом комплексного подхода, включающего в себя анализ и обобщение данных научно-технической литературы по проблеме исследования [6–8].

Для исследования САУ процессом охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы использовалась печатная плата Arduino Uno (рис. 2).

Для работы необходимо подключить платформу к ПК при помощи кабеля USB, либо подключить питание посредством адаптера AC/DC или батареи. Описание печатной платы Arduino Uno представлено в табл. 1.

Результаты исследования

На основе применяемого оборудования разработана структурная схема экспериментальной установки для фиксирования изменения температур воздуха окружающей среды и вечномерзлого грунта (рис. 3).

Построение модели и моделирование САУ процессом охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы реализовано в среде динамического моделирования технических систем SimInTech отечественного разработчика. По характеристикам данных предложенный программный комплекс схожий с иностранными программами SumSim, Simulink и обладает следующими преимуществами: эффективные численные методы, практичный редактор структурных схем, встроенный язык программирования и широкая библиотека типовых блоков – позволяют осуществить модели практически любой степени сложности [15].

Рассмотрим моделирование процесса охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы (рис. 4) со следующими граничными условиями, заданными экспериментальным путем: температура воздуха окружающей среды в продуваемом подполье $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура массива вечномерзлого грунта под нижней железобетонной плитой фундаментной платформы $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При повышении температуры воздуха внутри пространственной железобетонной фундаментной платформы выше $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ время формирования команды электроприводу о закрытии жалюзийных решеток и создания замкнутого пространства составляет 6,8 с (рис. 5) при параллельной работе с термоэлектрическими модулями.

При повышении температуры массива грунта под нижней железобетонной плитой фундаментной платформы выше $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ время формирования команды о включении

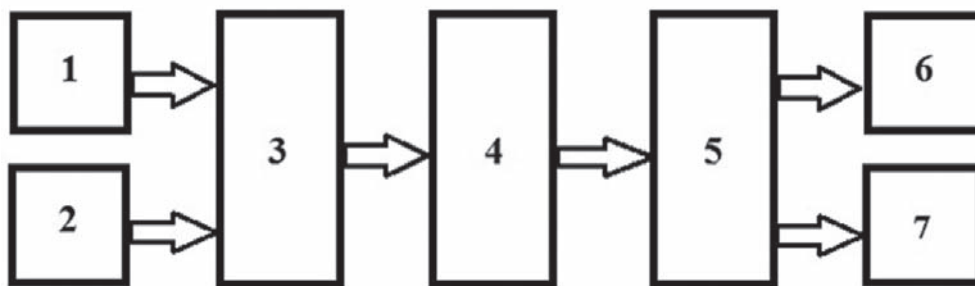


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки:

- 1 – датчик температуры воздуха окружающей среды, установленный в продуваемом подполье;
- 2 – датчики температуры, установленные в массиве вечномерзлого грунта по периметру платформы;
- 3 – устройство ввода; 4 – блок перепрограммируемого постоянно запоминающего устройства (ППЗУ);
- 5 – устройство вывода; 6 – электропривод регулируемых жалюзийных решеток; 7 – термоэлектрические модули

Fig. 3. Block diagram of the experimental setup:

- 1 – ambient air temperature sensor installed in the ventilated underfloor space;
- 2 – temperature sensors installed in the permafrost soil along the perimeter of the platform;
- 3 – input device; 4 – reprogrammable read-only memory unit (RRROM); 5 – output device; 6 – electric drive of adjustable louvered grilles; 7 – thermoelectric modules

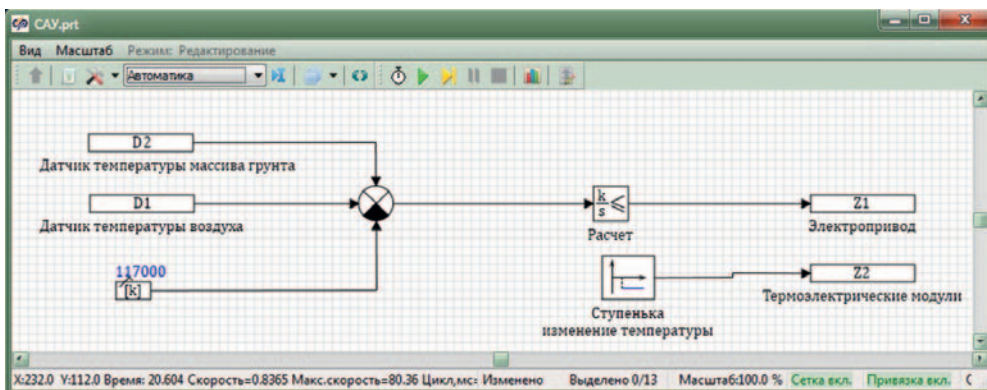


Рис. 4. Модель ориентации термоэлектрических модулей и электропривода к температурным изменениям

Fig. 4. Model of the orientation of thermoelectric modules and electric drive to temperature variations

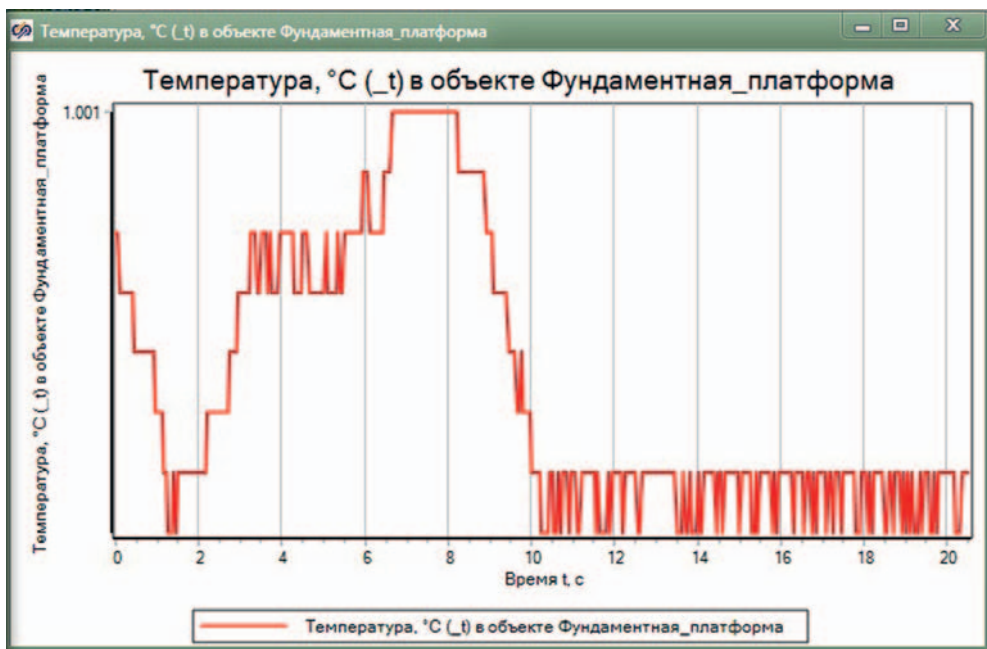


Рис. 5. Время формирования команды электроприводу
Fig. 5. Time of generating command to the electric drive

термоэлектрических модулей для охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы и замораживания под ней массива многолетнемерзлых грунтов составляет 2,2 с (рис. 6) при параллельной работе с электроприводом жалюзийных решеток.

В результате моделирования выполнен процесс охлаждения грунтов путем включения термоэлектрических модулей для охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы и стабилизации массива многолетнемерзлых грунтов за 2,2 с, и формирования команды электроприводу о закрытии жалюзийных решеток для создания замкнутого пространства за 6,8 с.

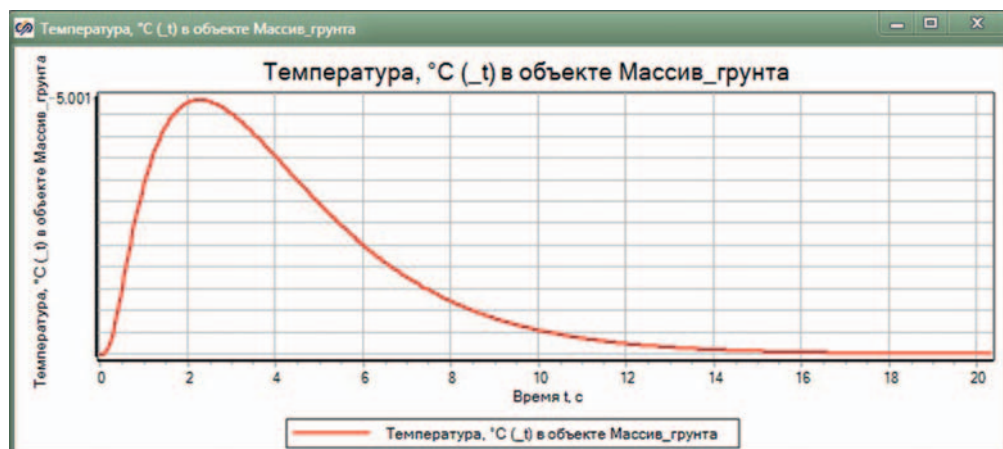


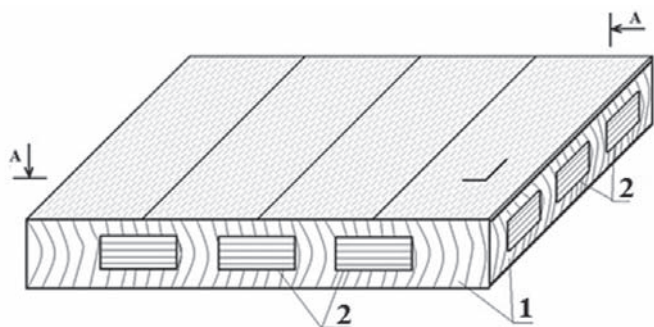
Рис. 6. Время формирования команды термоэлектрическим модулям
Fig. 6. Time of generating command to thermoelectric modules

Технической проблемой, решаемой изобретением [16], является повышение эффективности процесса охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы с использованием САУ и предотвращения сильного снегопереноса в продуваемое подполье [16].

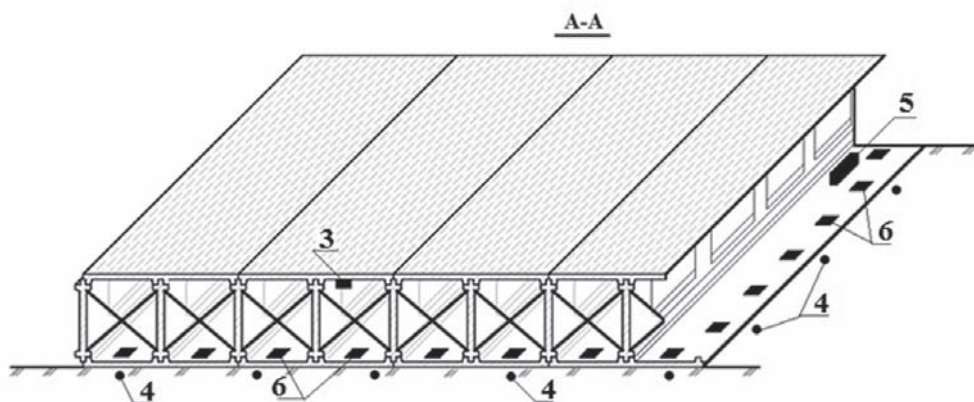
Согласно изобретению [16], новым является то, что терморегулируемая оболочка выполнена из деревянных клееных панелей в виде модуля повышенной индустриализации, образующий с железобетонными плитами замкнутое пространство, причем во всех деревянных клееных панелях, установленных с возможностью восприятия ветровых потоков и предотвращения снегопереноса, встроены регулируемые жалюзийные решетки с электроприводом. Предложенное техническое решение позволяет существенно уменьшить большие объемы воздухопроницаемости нагретых потоков в теплый период года в продуваемое подполье, сохраняет отрицательную температуру внутри замкнутого пространства, что снижает риски растепления массива грунта в зоне вечной мерзлоты. В холодный и переходный периоды года терморегулируемая оболочка фундаментной платформы позволяет холодным потокам воздуха попадать во внутрь через регулируемые жалюзийные решетки для естественного охлаждения массива грунта, а также является преградой для снежных отложений в продуваемом подполье.

На рис. 7 приведена терморегулируемая пространственная железобетонная фундаментная платформа на вечномерзлом грунте. На рис. 7, фиг. 1 схематично показан общий вид; на рис. 7, фиг. 2 схематично показан общий вид, разрез А-А показан на рис. 7, фиг. 1.

«Терморегулируемая пространственная железобетонная фундаментная платформа на вечномерзлом грунте включает объединенные между собой верхние и нижние плиты, которые соединены железобетонными фермами раскосными или безраскосными или балками, между фермами или балками в поперечном направлении установлены крестовые связи, а между верхними и нижними плитами образовано вентилируемое во всех направлениях продуваемое подполье. По периметру платформы установлены ограждающие деревянные клееные панели 1, образующие с железобетонными плитами замкнутое пространство. При этом во всех



Фиг. 1



Фиг. 2

Рис. 7. Терморегулируемая пространственная железобетонная фундаментная платформа на вечномёрзлом грунте [16]:

1 – деревянные клееные панели; 2 – регулируемые жалюзиные решетки; 3 – датчик температуры воздуха окружающей среды, установленный в продуваемом подполье; 4 – датчики температуры, установленные в массиве вечномёрзлого грунта по периметру платформы; 5 – электропривод регулируемых жалюзиных решеток; 6 – термоэлектрические модули

Fig. 7. Thermally-controlled spatial reinforced concrete foundation platform on the permafrost soil [16]:

1 – laminated timber panels; 2 – adjustable louvered grilles; 3 – ambient air temperature sensor installed in the ventilated underfloor space; 4 – temperature sensors installed in the permafrost soil along the perimeter of the platform; 5 – electric drive of adjustable louvered grilles; 6 – thermoelectric modules

деревянных клееных панелях 1, установленных с возможностью восприятия ветровых потоков и предотвращения снегопереноса, встроены регулируемые жалюзиные решетки 2. Кроме того, пространственная железобетонная фундаментная платформа содержит систему автоматического управления процессом охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы, включающую датчик температуры воздуха окружающей среды 3, установленный в продуваемом подполье, датчики температуры 4, установленные в массиве грунта по периметру платформы, связанное с датчиками устройство ввода 5, для преобразования аналогового сигнала в цифровой, блок перепрограммируемого постоянно запоминающего устройства (ППЗУ) 6, связанный с устройством ввода 5 и с устройством вывода 7, для преобразования цифрового сигнала в аналоговый, а устройство вывода 7 связано с электроприводом 8 регулируемых

жалюзийных решеток 2 и с термоэлектрическими модулями 9, в виде батареи элементов Пельтье, установленными по периметру на поверхности нижней железобетонной плиты фундаментной платформы в замкнутом пространстве продуваемого подполья» [16].

Стабилизация грунтового основания терморегулируемой пространственной железобетонной фундаментной платформой на вечномёрзлом грунте решается следующим образом. «При повышении температуры воздуха окружающей среды выше $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ сигнализирует датчик температуры 3, который подает сигнал на устройство ввода 5, преобразующее сигнал из аналогового в цифровой, и далее в блок ППЗУ 6. При повышении температуры массива грунта под нижней железобетонной плитой фундаментной платформы выше $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ сигнализируют датчики температуры 4, кото-

рые подают сигналы на устройство ввода 5, преобразующее сигналы из аналоговых в цифровые, и далее в блок ППЗУ 6. Блок ППЗУ 6 выполняет расчетные операции в соответствии с алгоритмом, а именно сравнивает поступившие цифровые сигналы из устройства ввода 5 с запрограммированными в ППЗУ 6 оптимальными температурами многолетнемерзлых грунтов и оптимальной температурой воздуха окружающей среды. При несоответствии оптимальным температурам многолетнемерзлых грунтов блок ППЗУ 6, в свою очередь, через устройство вывода 7, которое преобразует цифровой сигнал в аналоговый, подает сигнал о включении термоэлектрических модулей 9 для охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы и замораживания под ней массива многолетнемерзлых грунтов. Также при несоответствии оптимальной температуре воздуха окружающей среды блок ППЗУ 6 подает сигнал электроприводу 8 о закрытии регулируемых жалюзийных решеток 2 для создания замкнутого пространства и сохранения отрицательной температуры внутри пространственной железобетонной фундаментной платформы» [16].

Расчетное обоснование эффективности предложенного метода стабилизации грунтового основания выражено в процентах понижения температуры массива грунта при текущем охлаждении нижней железобетонной плиты фундаментной платформы. Входными данными для определения процента получаемой температуры массива грунта является сигнал о состоянии температуры нижней железобетонной плиты фундаментной платформы. Расчет выполнен в блоке программирования (рис. 8).

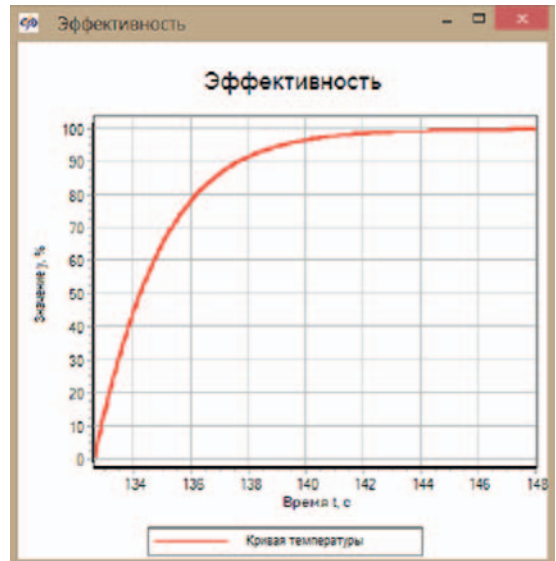


Рис. 8. Эффективность метода стабилизации грунтового основания

Fig. 8. Effectiveness of the soil base stabilization method

Выводы и заключение

1. Разработана структурная схема экспериментальной установки для фиксирования изменения температур воздуха окружающей среды и вечномерзлого грунта.

2. В программном комплексе SimInTech реализована модель системы автоматического управления процессом охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы.

3. Предложено новое техническое решение – терморегулируемая оболочка, выполненная из деревянных клееных панелей в виде модуля повышенной индустриализации, образующего с железобетонными плитами замкнутое пространство, причем во всех деревянных клееных панелях, установленных с возможностью восприятия ветровых потоков и предотвращения снегопереноса, встроены регулируемые жалюзийные решетки с электроприводом.

Список литературы

1. *Jafarov E.E.* Numerical modeling of permafrost dynamics in Alaska using a high spatial resolution dataset / E.E. Jafarov, S.S. Marchenko, V. E. Romanovsky // *The Cryosphere*. – 2012. – Vol. 6, no. 3. – P. 613–624.
2. *Rotta Loria A.F.* A non-linear constitutive model for describing the mechanical behaviour of frozen ground and permafrost / A.F. Rotta Loria, B. Frigo, B. Chiaia // *Cold Regions Science and Technology*. – 2017. – Vol. 133. – P. 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.10.010>.
3. *Ran Y.* Climate warming over the past half century has led to thermal degradation of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau / Y. Ran, X. Li, G. Cheng // *Cryosphere*. – 2018. – Vol. 2, no. 12. – P. 595–608. <https://doi.org/10.5194/tc-12-595-2018>.
4. *Амельчугов С.П.* Проблемы безопасности зданий арктического региона Восточной Сибири / С.П. Амельчугов, И.С. Инжутов, А.С. Климов [и др.] // *Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций. Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции 26 апреля 2019 года, г. Железногорск, Россия*. – 2019. – С. 166–172.
5. *Nicolisky D.J.* Estimation of soil thermal properties using in-situ temperature measurements in the active layer and permafrost / D.J. Nicolisky, V.E. Romanovsky, G.G. Panteleev // *Cold Regions Science and Technology*. – 2009. – Vol. 55, no. 1. – P. 120–129.
6. *Филимонов М.Ю.* Моделирование термостабилизации грунта при эксплуатации инженерных объектов в условиях арктических и субарктических регионов / М.Ю. Филимонов, Н.А. Ваганова // *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*. – 2017. – Т. 1. – № 2. – С. 391–401.
7. *Абу-Хасан М.С.* Термостабилизация вечномерзлых грунтов при возведении сооружений в северных климатических зонах / М.С. Абу-Хасан, В.В. Егоров, Л.П. Куправа, Д.Г. Чарник // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. – 2019. – № 4 (1016). – С. 40–42.
8. *Суриков В.И.* Исследования условий эксплуатации устройств термостабилизации грунтов с учетом воздействия технических объектов на многолетнемерзлые грунты / В.И. Суриков, А.А. Коротков, Е.А. Мельникова // *Нефтяное хозяйство*. – 2017. – № 8. – С. 116–119.
9. *Inzhutov I.S.* A comparative analysis of foundation design solutions on permafrost soils / I.S. Inzhutov, V.I. Zhadanov, M.Yu. Semenov, A.S. Klimov, S.P. Amelchugov // *E3S Web of Conferences*. 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018. – 2019. – No. 110. – P01019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001019>.
10. *Inzhutov I.S.* Research of permafrost soil thawing under the structural foundation platform / I.S. Inzhutov, V.I. Zhadanov, M.Y. Semenov, S.P. Amelchugov [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Novosibirsk, Russia. 2018. – No. 1(456). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012046>
11. *Belash T.A.* Earthquake resistance of buildings on thawing permafrost grounds / T.A. Belash, T.V. Ivanova // *Magazine of civil engineering*. – 2020. – No. 1(93). – P. 50–59. <https://doi.org/10.18720/MCE.93.5>


12. Патент РФ 38789. Сборная пространственная железобетонная фундаментная платформа для строительства многоэтажных зданий в особых грунтовых условиях и сейсмичности / Н.П. Абовский и др.; патентообл.: Красноярская государственная архитектурно-строительная академия. Заявл. 2004107322/22, 11.03.2004, опубл. 10.07.2004. Бюл. № 19.
13. Патент РФ 181936. Ограждающая конструкция вентилируемого подполья / А.С. Климов, М.Ю. Семенов, С.П. Амелчугов, И.С. Инжутов; патентообл.: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Заявл. 2018112898, 09.04.2018., опубл. 27.07.2018. Бюл. № 21.
14. Патент РФ 2728004. Терморегулируемый ограждающий модуль вентилируемого подполья / А.С. Климов, А.С. Степанян; патентообл.: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Заявл. 2020105067, 03.02.2020, опубл. 28.07.2020. Бюл. № 22.
15. Справочная система SimInTech [Электронный ресурс]. – URL: https://help.simintech.ru/#o_simintech/o_simintech.html (дата обращения: 22.01.2022).
16. Патент РФ 2706495. Пространственная железобетонная фундаментная платформа на вечномёрзлом грунте / А.С. Климов, М.Ю. Семенов, С.П. Амелчугов, И.С. Инжутов; патентообл.: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Заявл. 2019119260, 18.06.2019, опубл. 19.11.2019. Бюл. № 32.


References

1. Jafarov E.E., Marchenko S.S., Romanovsky V.E. Numerical modeling of permafrost dynamics in Alaska using a high spatial resolution dataset. *The Cryosphere*. 2012;6(3):613–624. <https://doi.org/10.5194/tc-6-613-2012>
2. Rotta Loria A.F., Frigo B., Chiaia B.A. non-linear constitutive model for describing the mechanical behaviour of frozen ground and permafrost. *Cold Regions Science and Technology*. 2017;133:63–69. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.10.010>
3. Ran Y., Li X., Cheng G. Climate warming over the past half century has led to thermal degradation of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau. *Cryosphere*. 2018;2(12):595–608. <https://doi.org/10.5194/tc-12-595-2018>
4. Amelchugov S.P., Inzhutov I.S., Klindukh N.Yu., Arkhipov I.N., Klimov A.S., Gumennaya E.Yu., et al. Problems of building safety in the Arctic region of Eastern Siberia. In: Actual problems of fire safety and protection from emergencies. Collection of articles based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference on April 26, 2019, Zheleznogorsk, Russia. Zheleznogorsk: Siberian Fire and Rescue Academy; 2019, p. 166–172 (in Russian).
5. Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Panteleev G.G. Estimation of soil thermal properties using in-situ temperature measurements in the active layer and permafrost. *Cold Regions Science and Technology*. 2009;55(1):120–129. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.03.003>
6. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Modeling of thermal stabilization of soil during the operation of engineering facilities in the Arctic and subarctic regions. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyi analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem [Ecology. Economy. Computer science. Series: System analysis and modeling of economic and ecological systems]*. 2017;1(2):391–401 (in Russian).
7. Abu-Hassan M.S., Egorov V.V., Kuprava L.R., Charnik D.G. Thermal stabilization of permafrost soils during the construction of structures in northern climatic zones. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki [BST: Bulletin of construction equipment]*. 2019;(4):40–42 (in Russian).
8. Surikov V.I., Korotkov A.A., Melnikova E.A. Studies of operating conditions of soil thermal stabilization devices taking into account the impact of technical objects on permafrost soils. *Neftyanoe khozaystvo [Oil industry]*. 2017;(8):116–119 (in Russian).
9. Inzhutov I.S., Zhadanov V.I., Semenov M.Yu., Klimov A.S., Amelchugov S.P. A comparative analysis of foundation design solutions on permafrost soils. *E3S Web of Conferences*. 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE – 2018. 2019;110;P01019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001019>.
10. Inzhutov I.S., Zhadanov V.I., Nazirov R.A., Servatinskii V.V., Semenov M.Yu., Amelchugov S.P. Research of permafrost soil thawing under the structural foundation platform. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;456. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012046>
11. Belash T.A., Ivanova T.V. Earthquake resistance of buildings on thawing permafrost grounds. *Magazine of civil engineering*. 2020;(1):50–59. <https://doi.org/10.18720/MCE.93.5>

- 12.** *Abovskii N.P., Abovskaya S.N., Matyushenko V.A., Sapkalov V.I., Morozov S.V., Pishutina G.V., Temerova A.S.* Prefabricated spatial reinforced concrete foundation platform for the construction of multi-storey buildings in special ground conditions and seismicity. Patent of the Russian Federation no. 38789. Publ. date 10.07.2004 (in Russian).
- 13.** *Klimov A.S., Semenov M.Yu., Amelchugov S.P., Injutov I.S.* Enclosing structure of the ventilated underground. Patent of Russian Federation no. 181936. Publ. date 27.07.2018 (in Russian).
- 14.** *Klimov A.S., Stepanyan A.S.* Thermoregulated enclosing module of the ventilated underground. Patent of Russian Federation no. 2728004. Publ. date no. 28.07.2020 (in Russian).
- 15.** SimInTech reference system [Internet]. Available at: https://help.simintech.ru/#o_simintech/o_simintech.html (accessed: 22 January 2022) (in Russian).
- 16.** *Klimov A.S., Semenov M.Yu., Amelchugov S.P., Injutov I.S.* Spatial reinforced concrete foundation platform on permafrost soil. Patent of Russian Federation no. 2706495. Publ. date 19.11.2019 (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Сергеевич Климов , канд. техн. наук, доцент, доцент инженерно-строительного института, Сибирский федеральный университет, Красноярск
e-mail: Klimovas_2011@mail.ru
тел.: +7 (904) 893-49-61

Alexey S. Klimov , Cand. Sci. (Engineering), Associated Professor, Associated Professor of the Institute of Civil Engineering, Siberian Federal University, Krasnoyarsk
e-mail: Klimovas_2011@mail.ru
tel.: +7 (904) 893-49-61

Ирина Ивановна Терехова, канд. техн. наук, доцент инженерно-строительного института, Сибирский федеральный университет, Красноярск
e-mail: iterechowa@sfu-kras.ru
тел.: +7 (391) 206-28-16

Irina I. Terehova, Cand. Sci. (Engineering), Associated Professor of the Institute of Civil Engineering, Siberian Federal University, Krasnoyarsk
e-mail: iterechowa@sfu-kras.ru
tel.: +7 (391) 206-28-16

Оксана Леонидовна Климова, магистрант инженерно-строительного института, Сибирский федеральный университет, Красноярск
e-mail: oksana_88@mail.ru
тел.: +7 (391) 206-27-34

Oksana L. Klimova, graduate student of the Institute of Civil Engineering, Siberian Federal University, Krasnoyarsk
e-mail: oksana_88@mail.ru
tel.: +7 (391) 206-27-34

Екатерина Витальевна Чумакова, магистрант инженерно-строительного института, Сибирский федеральный университет, Красноярск
e-mail: katyasprouse@yandex.ru
тел.: +7 (391) 206-27-34

Ekaterina V. Chumakova, graduate student of the Institute of Civil Engineering, Siberian Federal University, Krasnoyarsk
e-mail: katyasprouse@yandex.ru
tel.: +7 (391) 206-27-34

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author