

УДК 624.139:621.577

## ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В КАЧЕСТВЕ СИСТЕМ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТА В КРИОЛИТОЗОНЕ

*Рассматриваются возможности использования и преимущества современного теплонасосного охлаждения оснований для обеспечения прочности и устойчивости сооружений на многолетнемерзлых грунтах.*

### **ИБРАГИМОВ ЭНВЕР ВАЛЕРЬЕВИЧ**

Начальник проектного отдела ООО "НПО "Север", аспирант кафедры механики грунтов и геотехники МГСУ (Москва, Россия).

Основные направления научно-производственной деятельности - основания и фундаменты, проектирование и разработка технологий и устройств для укрепления мерзлых и термостабилизации мерзлых грунтов.

Автор 4 опубликованных работ и 5 изобретений.

### **КРОНИК ЯКОВ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, почетный работник высшего образования, профессор МГСУ (Москва, Россия).

Основные направления научной деятельности - механика грунтов, геотехника, основания и фундаменты; теплофизика и механика мерзлых грунтов; инженерное мерзлотоведение; термодинамика мерзлых грунтов и криогенных процессов; безопасность природно-техногенных систем в криолитозоне.

Автор более 320 опубликованных работ, в том числе 6 монографий, 6 учебных пособий и нормативных документов.

### **ПУСТОВОЙТ ГРИГОРИЙ ПЕТРОВИЧ**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры геокриологии МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия).

Основные направления научной деятельности - теплофизика мерзлых пород, надежность оснований зданий и инженерных сооружений в криолитозоне.

Автор более 80 научных работ, в том числе 2 монографий, 10 авторских свидетельств и патентов.

Необходимость управления температурным режимом и поддержания отрицательных температур в мерзлых грунтах и при замораживании грунтов оснований обусловлена ростом строительства объектов промышленной, транспортной, газовой и нефтяной отраслей в пределах криолитозоны, где сосредоточены основные разведанные запасы природного газа и нефти, алмазов, золота, редких и цветных металлов.

Возведение зданий и сооружений в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов, в частности устройство оснований и фундаментов, имеет ряд существенных особенностей, без учета которых в надземных конструкциях возникают недопустимые деформации, происходят повреждения сооружений и продолжается рост аварийности всех видов зданий и сооружений [1, 2].

Применяемые при строительстве объектов промышленного и топливно-энергетического комплексов технические решения с использованием свайного фундамента обеспечивают необходимую прочность сооружений и обладают достаточной надежностью при строительстве и эксплуатации объектов. Однако свайное основание имеет и свои недостатки: высокая трудоемкость возведения, использование не в полной мере прочностных характеристик материала свай, дороговизна строительно-монтажных работ по устройству свайного поля, а следовательно, и низкая экономическая эффективность фундамента в целом. Следует отметить также невозможность надежной защиты конструкции свай от грунтовой коррозии, что особенно актуально для засоленных грунтов побережья северных морей и аридных районов Центральной Якутии и Прибайкалья.

Устройство фундаментов мелкого заложения в мерзлых грунтах для производственных зданий - альтернативного сваям варианта - практически не производится из-за сложнос-

тей с обеспечением необходимых прочностных и деформационных характеристик основания, а также специфики производства земляных работ в условиях севера. Опыт строительных организаций свидетельствует о том, что строителям проще погружать сваи, чем производить разработку котлована, возведение качественной подсыпки, обеспечение инженерной защиты территории, требования по которой значительно выше, чем при свайном основании.

Целью опытно-конструкторских работ по разработке и внедрению более эффективных по сравнению со свайными конструкций фундаментов и устройства оснований, разработка технических решений поверхностных фундаментных конструкций, не предъявляющих столь высокие требования к основанию, подсыпке, инженерной защите территории, не требующих объемных земляных работ и др.

Эффективным способом поддержания или усиления мерзлого состояния грунта в основаниях сооружений является использование низких температур наружного воздуха с помощью сезоннодействующих парожидкостных термосифонов, называемых термостабилизаторами. Термостабилизаторы грунта позволяют сократить сроки возведения зданий и сооружений в условиях высокотемпературной мерзлоты и возводить здания на несливающейся мерзлоте.

Несмотря на достоинства, сезоннодействующие саморегулирующиеся установки обладают недостатками: при наличии постоянно действующего источника растепления, они из-за сезонности в работе и недостаточной производительности, не всегда способны длительно поддерживать требуемую отрицательную температуру грунта в течение всего года. Поэтому в условиях возможного потепления климата термостабилизаторы не смогут обеспечить безопасный и долговечный заданный по проекту температурный режим основания и устойчивость сооружения в целом [1, 3].

Наибольший эффект с точки зрения эксплуатационной надежности, обеспечения безопасности и снижения стоимости сооружений могут дать управляемые (регулируемые) системы оснований и фундаментов, которые позволяют на всех этапах строительства и эксплуатации управлять термо-напряженно-деформированным состоянием грунтовых оснований и устойчивостью конструктивных элементов фундаментов.

Включение в состав транспортных участков термостабилизаторов дополнительных теплоотводящих (охлаждающих) элементов позволяет обеспечить функционирование термостабилизаторов в период года с положительными

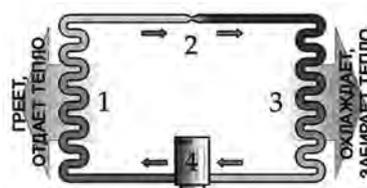


Рис. 1. Схема работы теплового насоса:  
1 - горячий теплообменник; 2 - расширитель; 3 - холодный теплообменник; 4 - компрессор

температурами атмосферного воздуха за счет циркуляции в них промежуточного хладагента. Таким образом может быть обеспечен непрерывный (круглогодичный) режим охлаждения.

Примером применения горизонтальных термостабилизаторов грунта в комбинации с холодильным агрегатом может служить возведение оснований и фундаментов вертикальных стальных резервуаров (РВС) Варандейского терминала [4].

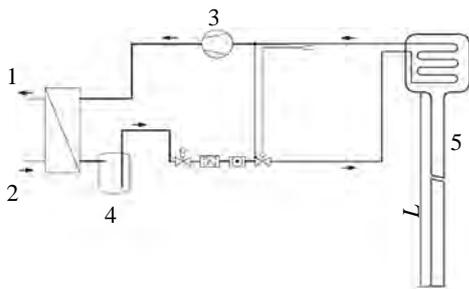
Проблемой, препятствующей широкому использованию комбинированных термостабилизаторов грунта и стандартных морозильных агрегатов в строительстве, является их высокая стоимость. Одним из путей решения этой проблемы, может стать использование теплонасосной техники вместо холодильных установок.

Термодинамический тепловой насос (ТН) аналогичен холодильной машине. Если в холодильной машине производство холода осуществляется путем отбора теплоты испарителем, а конденсатор осуществляет сброс теплоты в окружающую среду, то в тепловом насосе картина обратная. Конденсатор является теплообменным аппаратом, выделяющим теплоту для потребителя, а испаритель – теплообменным аппаратом, утилизирующим низкопотенциальную теплоту.

Процесс в тепловом насосе осуществляется следующим образом:

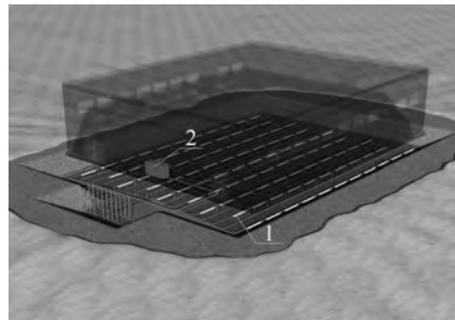
- рабочая жидкость (например, фреон) закипает в испарителе при невысокой температуре ( $-10^{\circ}\text{C}$ ) за счет тепла грунта;
- образовавшийся пар сжимается компрессором до необходимой температуры и поступает в теплообменник, нагревая рабочее вещество отопительной системы;
- давление понижается и охлажденный хладагент возвращается в испаритель;
- далее цикл процесса повторяется (рис. 1).

В литературе впервые предложение по использованию ТН на территории криолитозоны для одновременного охлаждения грунтов в основании здания и снабжения его внутренних помещений теплом, по-видимому, было высказано Стенбик-Нильсоном и Л. Свитом [5]. В 1980-х годах попытки реализовать данное



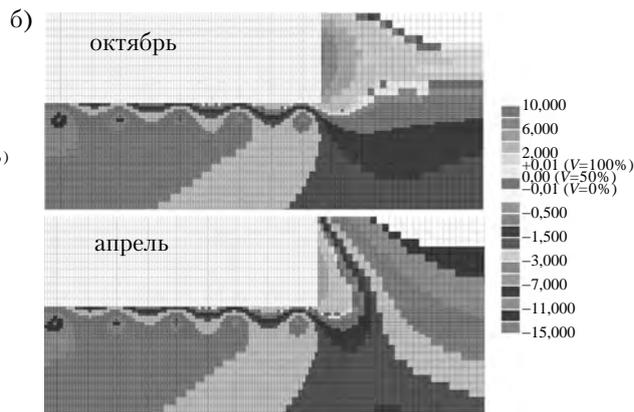
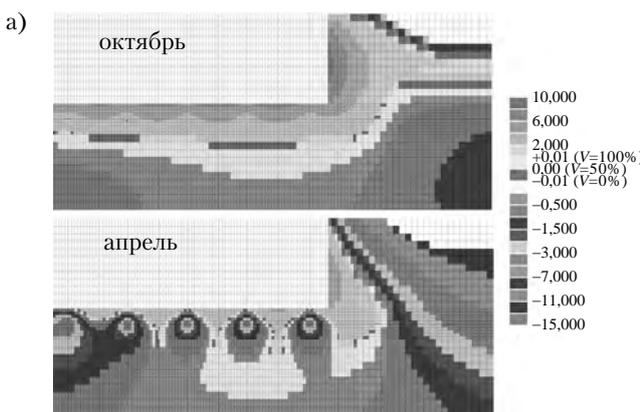
**Рис. 2.** Схема теплового насоса с грунтовым парожидкостным теплообменником:

1 - подающая линия системы отопления; 2 - отводящая линия системы отопления; 3 - компрессор; 4 - ресивер; 5 - тепловая труба



**Рис. 3.** Пример использования теплового насоса с грунтовым парожидкостным теплообменником:

1 - парожидкостный грунтовый контур; 2 - тепловой насос



**Рис. 4.** Теплотехнический расчет эксплуатации сезоннодействующей (а) и круглогодичной с тепловым насосом (б) систем

предложение были предприняты в Норвегии и Канаде. Использование тепловых насосов при строительстве в криолитозоне в отечественной практике было предложено Г.З. Перльштейном с коллегами [6, 7].

Классическая схема теплового насоса имеет серьезный недостаток, т.к. в качестве грунтового теплообменника как правило используются полиэтиленовые трубы, заполненные антифризом (гликолевым раствором). В случае утечки антифриза в грунт произойдет растепление, устранение которого будет крайне затруднено и трудозатратно. Использование насосного оборудования для прокачки антифриза по трубам повышает энергопотребление системы и снижает ее надежность.

Для устранения этих недостатков в ООО "НПО "Север" разработана комбинированная система термостабилизации грунта (тепловой насос с грунтовым парожидкостным теплообменником). В качестве грунтового теплообменника применяются тепловые трубы (испарители термостабилизаторов грунта), в верхней части которых установлены теплоотводящие элементы, являющиеся испарителем компрессора (рис. 2). При использовании гравитационных тепловых труб отпадает необходимость

применения насосного оборудования, что как минимум на 10% снижает энергопотребление. В качестве хладагента используются фреоны, аммиак или двуокись углерода, которые никак не влияют на оттаивание грунтового основания в случае утечки. Объем заправки хладагентов на порядок ниже объема антифриза в жидкостном грунтовым теплообменнике. Использование современных технических решений позволит конструировать различные комбинации из вертикальных и горизонтальных (слабонаклонных) тепловых труб (рис. 3).

На предлагаемую систему получено решение на выдачу патента (заявка № 2014150935 от 16.12.2014 г).

Пример успешного применения теплового насоса с парожидкостным грунтовым теплообменником иллюстрирует теплотехнический расчет работы сезоннодействующей (рис. 4,а) и круглогодичной (рис. 4,б) систем термостабилизации грунта основания здания шириной 14 м с фундаментом мелкого заложения. Расчет выполнен с использованием программы Tundra2D, разработанной на кафедре геофизиологии МГУ. Температура внутри здания постоянна и равна +20°C, коэффициент теплообмена с учетом термического сопротивления пола  $\alpha = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Расчетная область представляет половину здания, так как его продольная ось является плоскостью симметрии, тепловой поток через которую равен нулю (граничное условие II рода). Боковые и нижняя границы в расчетной области заданы граничными условиями (ГУ) II рода с нулевым теплотокотом. Описание работы сезоннодействующей системы производится путем присвоения внутренним блокам ГУ III рода с приведением среднемесячных температур воздуха на поверхности и коэффициента теплообмена, определяемого с учетом теплоотдачи с единицы поверхности испарителя  $21 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  при скорости  $3,0 \text{ м/с}$  из расчета свободного обдува конденсаторного блока. Описание работы круглогодичной системы производится путем присвоения внутренним блокам ГУ II рода со значением теплового потока, равным  $40 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

Расчет показывает, что сезоннодействующие системы под сооружением будут создавать знакопеременные температуры грунтов (растепление на конец теплого периода и промораживание на конец холодного), что может привести к деформации сооружения в период эксплуатации. При использовании круглогодичной системы грунт постоянно поддерживается в мерзлом состоянии.

С помощью теплонасосного охлаждения оснований можно предотвратить социально-экономический ущерб от потери устойчивости сооружений, возведенных на многолетнемерзлых грунтах, и при этом не только полностью

компенсировать капитальные расходы на приобретение теплонасосного оборудования, но и заметно снизить стоимость затрат на снабжение теплом населения и хозяйственных объектов. Для высотных сооружений данная технология позволит использовать подземное пространство для паркинга или технического этажа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кроник Я.А. Динамика аварийности и безопасности природно-техногенных систем в криолитозоне // Мат-лы IV Конф. геокриологов России Т. 3. - М.: Изд-во МГУ, 2011. - С. 285-292.
2. Ибрагимов Э.В., Гамзаев Р.Г. Системы термостабилизации грунта для зданий и сооружений с проектным решением полов по грунту // Журнал нефтегазового строительства. - 2014. - № 1. - С. 40-45.
3. Хрусталева Л.Н. Проблемы инженерной геокриологии на рубеже XXI в. // Криосфера Земли. - 2000. - Т. IV. - № 1. - С. 3-10.
4. Гвоздик В.И., Андреев М.А., Абросимов А.И., Миронов И.А. Устройство оснований и фундаментов крупных нефтяных резервуаров в условиях Крайнего Севера // "ОФМГ". - 2007. - № 6.
5. Stenbeck-Nielson and Sweet L.R. Heating with Ground Heat, An Energy saving Method for Home Heating // The Northern. - 1975. - № 7(1). - Pp. 20-25.
6. Перлыштейн Г.З., Гулый С.А., Буйских А.А. О перспективах применения тепловых насосов для решения инженерных задач в зоне вечной мерзлоты // В сб. докл. "Вечная мерзлота и экономическое развитие, безопасность окружающей среды, потенциал природных ресурсов". - Новосибирск, 1998. - С.18-21.
7. Перлыштейн Г.З., Гулый С.А., Буйских А.А. Повышение несущей способности мерзлых грунтов с помощью тепловых насосов // "ОФМГ". - 2000. - № 3. - С. 26-31.
8. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 629.01

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ КЛИНА ГОРНОЙ ПОРОДЫ В ОПОРЕ АРОЧНОЙ ПЛОТИНЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СТАТИЧЕСКОЙ И СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗОК

*Полный текст статьи будет опубликован в английской версии журнала "Soil Mechanics and Foundation Engineering".*

**Х. МИРЗАБОЗОРГ, М. ВАРМАЗЯРИ,  
М. ХОСЕИНИ, С. А. ГХАРЕБАГХИ**

Кафедра строительства, технологический университет Х.Н. Туси (Тегеран, Иран).

Проведена оценка стабильности скального клина в упоре арочной плотины при статических и сейсмических нагрузках методом конечных элементов и обычным способом. На примере арочной плотины в Швейцарии изучена реакция потенциального клина на опору. В конечно-элементных моделях, вода водохранилища

принимается сжимаемой и решается связанная система. Основание рассматривается в двух различных вариантах; невесомым и с учетом веса, – с вязкой границей. Кроме того, рассматривается зависимость смещений клина от смоделированного соединения между клином и серединой фундамента. Результаты FE – моделирования сравниваются с данными, полученными традиционным методом, в котором стабильность клина вычисляется способом Лонде. Результаты показывают, что традиционный метод переоценивает смещения клина по сравнению с методом конечных элементов.