

# ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Канд. техн. наук М.Л. ГАЛКИН,  
канд. техн. наук А.М. РУКАВИШНИКОВ,  
канд. техн. наук Л.С. ГЕНЕЛЬ

«Российское могущество прирастать будет Сибирью и Северным океаном» — это пророческое высказывание великого М.В.Ломоносова было, есть и будет определяющим для экономического, политического и хозяйственного развития России.

Что такое область вечной мерзлоты для России? Это прежде всего 65 % территории страны, ее стратегический тыл, топливно-энергетическая база и валютный цех. Это стратегический запас гидроресурсов и пресной воды, острая нехватка которой в скором времени может стать предметом военных конфликтов.

Все вышесказанное, а также глобальные планы России по освоению энергоресурсов в зоне вечной мерзлоты и на шельфе Ледовитого океана требуют больших вложений для обустройства месторождений, организации их инфраструктуры, строительства объектов военного и гражданского назначения, укрепления и расширения заполярных портов и береговой линии стратегических объектов. В этой связи особую актуальность приобретают инновационные и энергоэффективные методы строительства в специфической зоне вечной мерзлоты.

## Что диктует практика?

В многолетней зарубежной и отечественной практике освоения зоны вечной мерзлоты известны два основных метода строительства зданий, сооружений, спецобъектов и трубопроводных систем: с сохранением природного мерзлого состояния грунтов или с частичным их оттаиванием.

В естественной природе в зоне вечной мерзлоты поверхностный слой претерпевает сезонные колебания замораживания зимой и частичного оттаивания летом. Это сопровождается неустойчивым состоянием верхнего горизонта грунтов (текучесть, расположение, влагонасыщение летом и всучивание зимой), что приводит к деформации опорных конструкций зданий, сооружений и трубопроводных систем.

В зоне вечной мерзлоты для обеспечения устойчивости наземных сооружений и многочисленных трубопроводных систем (нефтепроводы, газопроводы и др.) наиболее часто применяют методы свайного строительства (сваи «намертво» вмораживаются в вечномерзлотный слой), которые более других приемлемы для сохранения вечномерзлого состояния грунтов.

В общем случае при проектировании фундаментов зданий и опор на основе заглубленных в вечную мерзлоту свайных конструкций их устойчивость к деформационным нагрузкам определяется из условий [1], достаточно хорошо согласующихся на практике с формулой

$$\gamma_c Q + \gamma_1(N + q) > \gamma_2 \tau_{cm} F, \quad (1)$$

где  $\gamma_c$  — коэффициент однородности и условий работы;

$Q$  — нормативная сила, удерживающая фундамент от выпучивания вследствие смерзания его боковой поверхности с многолетнемерзлым грунтом, кг;

$\gamma_1$  — коэффициент перегрузки постоянной нагрузки, равный 0,9;

$N$  — нормативная нагрузка от массы сооружения, кг;

$q$  — нормативная нагрузка от массы сооружения и грунта на его уступах, кг;

$\gamma_2$  — коэффициент перегрузки сил пучения, равный 1,1;

$\tau_{cm}$  — касательные напряжения пучения — нормативная величина сил смерзания грунта с боковой поверхностью фундамента или сваи, кг/см<sup>2</sup>;

$F$  — площадь смерзания грунта со сваей или фундаментом, см<sup>2</sup>.

Расчетная схема устойчивости фундамента представлена на рис. 1.

В правой части приведенного неравенства представлены силы, вызывающие деформацию сооружения в связи с пучением грунта. Для нейтрализации этих воздействий рекомендуется использовать специальные мероприятия.

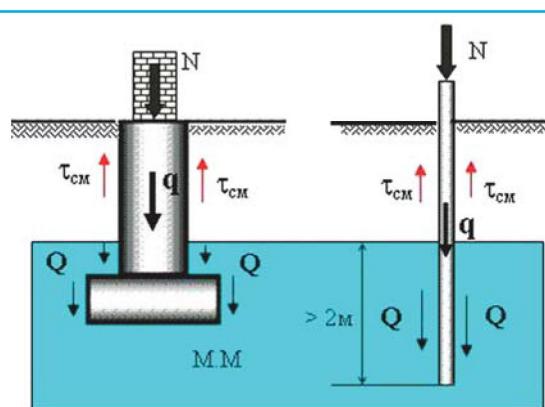


Рис. 1. Расчетная схема устойчивости отдельно стоящих и свайных фундаментов в вечномерзлом слое грунта

Традиционный метод свайного строительства фундаментов и опор в зоне вечной мерзлоты предусматривает применение железобетонных свай (буроопускных, опускных и бурозабивных). В любом случае для установки свай на месте дислокации и последующей эксплуатации бурят скважины на расчетную глубину погружения в вечную мерзлоту, используя механические, тепловые или комбинированные способы бурения.

*Буроопускные сваи* погружают в заполненные грунтовым раствором скважины, диаметр которых на 5 см больше максимального размера сечения сваи. Их применяют в твердомерзлых (с температурой ниже  $-1,5^{\circ}\text{C}$ ) и в пластично-мерзлых грунтах (с температурой до  $-1,5^{\circ}\text{C}$ ).

*Опускные сваи* используют в твердомерзлых грунтах, ибо скважина, пробурившаяся паровой иглой, нарушает большой объем мерзлого грунта, что приводит к замедлению последующего смерзания сваи с вечномерзлым монолитом.

*Бурозабивные сваи* применяют преимущественно в пластично-мерзлых грунтах. Их забивают механическим способом в предварительно пробуренные скважины, диаметр которых на 1–2 см меньше наименьшего размера сечения сваи. Допускается погружение полых стальных свай при условии сохранения их целостности в процессе забивки. Известны также трубобетонные сваи – опоры (металлические трубы, заполняемые бетоном с возможным его армированием).

#### Методы и устройства термостабилизации вечномерзлых грунтов

Для сохранения в мерзлом состоянии (термостабилизации) грунтов в свайном основании применяют капсулированные трубчатые погружные жидкостные либо парожидкостные устройства – термостабилизаторы, которые помещают в специальные скважины, пробуренные рядом с опорным фундаментом для создания мерзлотного экрана. В зимнее время конвекционная циркуляция теплоносителя (в простейшем варианте это керосин) в жидкостных устройствах и паров пропана в парожидкостных термостабилизаторах обеспечивает охлаждение грунтов основания. С наступлением летнего периода, как только температура верхнего, находящегося на наружном воздухе, конуса (конденсатора) устройства становится выше температуры теплоносителя, циркуляция прекращается и процесс приостанавливается с частичным инерционным оттаиванием верхнего слоя грунта до следующего похолодания [6].

По принципу работы принято подразделять термостабилизаторы грунтов (ТСГ) на конвективные (газовые, жидкостные и газожидкостные) и испарительные (двуфазные). По способу монтажа и конструктиву закладки различают горизонтальную систему (ГСТ), так называемую систему «ГЕТ», и вертикальную – «ВЕТ».

Современные ТСГ используют наиболее эффективные по термодинамическим свойствам хладоносители (теплоносители) – сжиженные аммиак или диоксид углерода. Керосин и фреоны (обычно R22) не рекомендуются, так как первый пожароопасен и травмирует экологию, а вторые запрещены из-за их озоноразрушающих и «парниковых» свойств.

Таким образом, ТСГ представляют собой трубчатую бескомпрессорную холодильную машину, использующую естественные конвекционные свойства хладагента при наличии градиента температур между слоем вечной мерзлоты и наружным воздухом. Хладагент в ТСГ при низких температурах воздуха конденсируется в ребристом радиаторе-конденсаторе, расположенном в верхней части ТСГ, затем естественным путем стекает в нижнюю, испарительную часть ТСГ, где отбирает теплоту грунта, охлаждая его ниже температуры замерзания, и одновременно испаряясь, попадает в верхнюю часть ТСГ. Иногда для расширения сезонной эксплуатации ТСГ их снабжают термоэлектрическим модулем, что заметно повышает стоимость ТСГ.

Стандартный ТСГ монтируется в скважине и действует как теплообменник. Теплоприток от грунта через металлическую стенку корпуса ТСГ поступает к хладагенту, а затем выносится им в конвективном потоке через конденсатор в атмосферу.

Схема работы стандартного ТСГ показана на рис. 2.

По сведениям производителя [5] радиус зоны замерзания грунта вокруг подобного ТСГ при среднезимней температуре  $-15^{\circ}\text{C}$  составляет 1,5 м. Выпускаются ТСГ с суммарной длиной испарителя и конденсатора 5...14 м при диаметре корпуса 25...60 мм. Работать подобный ТСГ начинает при температуре воздуха  $-5^{\circ}\text{C}$ .

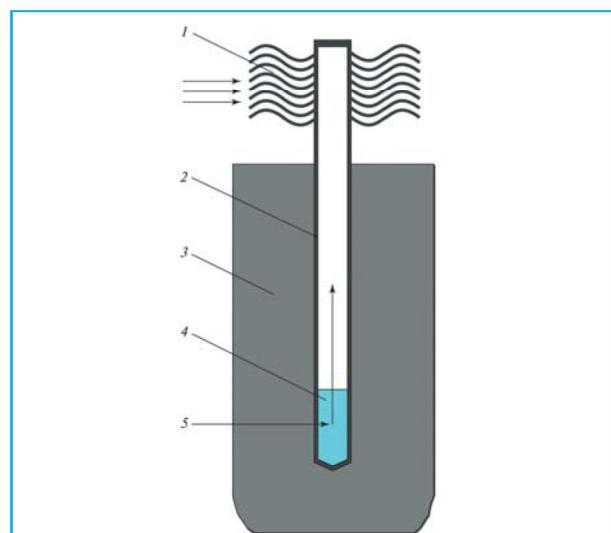


Рис. 2. Стандартная схема работы термостабилизатора грунта (ТСГ):

1 – воздушный конденсатор; 2 – испаритель (зона испарения хладагента); 3 – грунт; 4 – хладагент; 5 – тепловой поток от охлаждаемого грунта

Разработано и выпускается также целое семейство ТСГ вертикального, наклонного и слабонаклонного типов из различных углеродистых, хладостойких и нержавеющих сталей. Наиболее эффективны ТСГ из легких антикоррозионных алюминиевых сплавов.

Даже при наличии хороших по термодинамическим качествам хладагентов подобные ТСГ недостаточно эффективны. Неровности прилегания грунта в скважине к корпусу ТСГ, неравномерность грунта по высоте скважины искажают и снижают интегральное значение теплового потока и коэффициента теплопередачи вследствие турбулентности и хаотичности процесса испарения – конденсации в системе «грунт – корпус ТСГ – хладагент – конденсатор». Как следствие этих процессов, наблюдается относительно малая величина пятна промерзания грунта вокруг опоры, повышается вероятность его растепления в летнее время, т.е. в конечном итоге ослабления устойчивости свайной конструкции. Для повышения эффективности подобного технического решения необходимо увеличивать либо объем циркулирующего хладагента (а значит, и диаметр ТСГ), либо количество ТСГ на единицу полезной площади свайного сооружения.

## Новое техническое решение термостабилизации вечномерзлых грунтов

В настоящее время разработан и успешно применяется на практике инновационный, высокоэффективный метод термостабилизации вечномерзлых грунтов, лишенный указанных недостатков и позволяющий существенно расширить зону промораживания при значительной экономии материально-технических средств, трудозатрат и времени строительства. Его «секрет» заключается в том, что обычный ТСГ помещают в полугерметичную гильзу, в которую заливают нужное количество низковязкого теплоносителя типа ХНТ-НВ в качестве буферного теплообменного агента. Он позволяет повысить интегральное значение теплоотдачи от грунта и коэффициент теплопередачи ТСГ, а также выравнивает теплоотдачу по всей площади теплообмена как со стороны испарителя, так и от грунта через гильзу. В целом это существенно повышает эффективность работы ТСГ. Такого рода комбинированный ТСГ используют по традиционной схеме. Экологически безопасные и энергоэффективные теплоносители класса ХНТ-НВ разработаны ООО «Спектропласт» на основе экологически чистого пропиленгликоля с ПАВами, снижающими вязкость, и гибридными ингибиторами коррозии, обеспечивающими стабильную, эффективную и длительную работу ТСГ (ТУ 2422-011-11490846-07). Эти теплоносители доступны по цене и выпускаются в промышленных масштабах на российских заводах.

Механизм работы подобной схемы ТСГ хорошо согласуется с теоретическим обоснованием теплообмена в комбинированной системе «труба в трубе»,

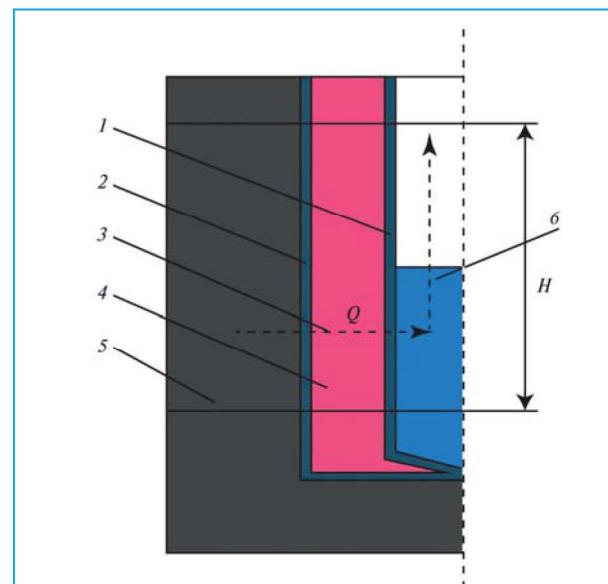


Рис. 3. Схема теплового потока в системе «грунт – комбинированный ТСГ – атмосфера»:

1 – корпус испарителя; 2 – гильза; 3 – тепловой поток  $Q$ ; 4 – теплоноситель ХНТ-НВ; 5 – грунт; 6 – хладагент;  $H$  – расчетный параметр, м

схематично показанной на рис. 3. В нашем случае донная часть внутренней трубы (стандартный ТСГ) заполняется требуемым количеством хладагента, а кольцевой воздушный промежуток между корпусом стандартного ТСГ и полугерметичной гильзой заливается до определенного уровня специальным теплоносителем ХНТ-НВ. Далее отбор тепла новым, комбинированным ТСГ от замораживаемого грунта происходит через стенку гильзы.

Теоретически теплопередачу в системе «вечномерзлый грунт – новый комбинированный ТСГ» можно описать формулами расчета коэффициента теплопередачи и теплового потока в комплексе «вечномерзлый грунт – стенка гильзы – теплоноситель – стенка стандартного ТСГ – хладагент – вынос тепла в атмосферу».

В общем случае для расчета количества теплоты  $Q$ , передаваемого через теплообменную поверхность  $S$ , справедлива формула [3]:

$$Q = \int_S k \Delta T dS, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи между начальным источником тепла (грунт) и конечным поглотителем тепла (хладагент) через разделяющую их преграду (в нашем случае – стенка гильзы и промежуточный теплоноситель ХНТ-НВ либо стенка испарителя – хладагент с выводом тепла в атмосферу),  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;

$\Delta T$  – разность температур грунта и хладагента, К.

Коэффициент теплопередачи  $k$  для цилиндрических стенок рассчитывается по формуле:

$$k = 1 \left( \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_{ct}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{ст}$  – теплопроводность стенки, Вт/(м·К);  
 $d_1, d_2$  – внутренний и наружный диаметры трубы, м;  
 $\alpha_{1,2}$  – коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $l$  – длина трубы, м.

Конкретные значения коэффициента теплопередачи для теплообменника типа «труба в трубе» в нашем случае вычисляются на основе аналогичной формулы для стандартного ТСГ и ТСГ новой конструкции.

Расчетные значения коэффициента теплопередачи от грунта к хладагенту для стандартного ТСГ (см. рис.2) составили 5,7 Вт/(м<sup>2</sup>·К), а с теплоносителем ХНТ-НВ (новый ТСГ, см. рис. 3) – 12,1 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Расчет теплового потока системы ТСГ с ХНТ-НВ показал, что отбор тепла от грунта у нового ТСГ в 2 раза выше, чем у стандартного, и соответственно больше радиус промерзания грунта. Практические испытания подтвердили эффективность работы нового ТСГ.

Применение нового ТСГ позволило существенно увеличить площадь пятна заморозки вокруг изделия, уменьшить количество ТСГ на единицу замораживаемой площади и, как следствие, обеспечить значительную экономию материальных и трудовых ресурсов, а также сократить время строительных работ.

В 2012 г. ТСГ с ХНТ-НВ успешно прошли промышленную апробацию. Система показала высокую эффективность при прокладке магистрального

нефтепровода на трассе Ванкор – Пурпе (журнал «TCP» № 5/2009). Площадь замороженного вокруг нового ТСГ пятна удалось увеличить в 1,5–2 раза, что позволило уменьшить количество ТСГ на единицу замораживаемой площади. В целом достигнута значительная экономия опорных труб, крепежного металла и монтажных материалов. Соответственно уменьшились и трудозатраты строителей и монтажников нефтепровода, сократилось время строительства и ввода в эксплуатацию объектов, что исключительно важно в условиях короткого заполярного лета. Данная система принята для промышленного использования и эксплуатации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.И. Основания и фундаменты. Ч. 12// BuildCalc – расчеты в строительстве.
2. Волковский Н., Пронин А. Война в Арктике//Военно-промышленный курьер. 2013. № 4.
3. Гуляев В.А., Вороненко Б.А. и др. Теплотехника. Учебник для вузов. – СПб.: Изд-во «РАПП», 2009.
4. Девятова Т.А. Энергетика и северный транзит// Атомная стратегия. 2010. № 46.
5. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Кинцлер Ю.Э. Практический опыт строительства оснований зданий и сооружений в условиях ВМГ. – Тюмень: ООО НПО «Фундаментстройаркос», 2002.
6. Литвинов О.О., Беляков Ю.Н. Технология строительного производства. – Киев: Высшая школа, 1985.

**НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ  
СПЕКТРОПЛАСТ**

**Стабилизация грунтов в зоне  
вечной мерзлоты на базе  
теплопередающей  
жидкости ХНТ-НВ**

111123, г. Москва, 2-я Владимирская ул., д. 11, Тел.: (495) 966-08-09, 305-43-70  
[info@splast.ru](mailto:info@splast.ru) [www.splast.ru](http://www.splast.ru)