

**БАЯСАН Р.М.**

Член президиума и председатель комитета по применению тепловых труб в строительстве и коммунальном хозяйстве межреспубликанской научной ассоциации «Тепловые трубы», член-корреспондент Международной инженерной академии, к.т.н., г. Москва, asanov.imr@yandex.ru, mail@iheatpipe.ru

ГОЛУБИН С.И.

Начальник лаборатории геотехнических исследований и термостабилизации ООО «Газпром ВНИИГАЗ», к.т.н., г. Москва, S_Golubin@vniigaz.gazprom.ru

АВРАМОВ А.В.

Инженер лаборатории геотехнических исследований и термостабилизации ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва

BAYASAN R.M.

Member of the presidium and chairman of the committee on using heat pipes in construction and community facilities of the «Heat Pipes» inter-republican scientific association, PhD (candidate of science in Technics), corresponding member of the International Engineering Academy, Moscow, asanov.imr@yandex.ru, mail@iheatpipe.ru

GOLUBIN S.I.

Head of the Geotechnical Research and Thermostabilization Laboratory of the «Gazprom VNIIGAZ» LLC, PhD (candidate of science in Technics), Moscow, S_Golubin@vniigaz.gazprom.ru

AVRAMOV A.V.

Engineer of the Geotechnical Research and Thermostabilization Laboratory of the «Gazprom VNIIGAZ» LLC, Moscow

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГРУНТОВ

FEATURES OF USING A THERMAL STABILIZATION TECHNOLOGY FOR PROTECTION AGAINST FROST HEAVING OF SOILS

Ключевые слова: криолитозона; морозное пучение грунтов; миграция влаги; термостабилизация грунтов; градиент температуры.

Key words: permafrost zone; frost heaving of soils; moisture migration; soil thermostabilization; temperature gradient.

Аннотация: в статье проводится факторный анализ развития морозного пучения грунтов, а также рассматривается метод инженерной защиты от этого процесса. Описываются технология активной термостабилизации грунтов и особенности применения различных термостабилизаторов. Аналитически обосновывается позитивное и негативное воздействие термостабилизаторов различных типов на развитие морозного пучения.

Abstract: the article presents factorial analysis of development of soil frost heaving and considers a method of engineering protection against this process. A technology of active thermal stabilization of soils and features of using various thermal stabilizers are described. Positive and negative influence of various types of thermal stabilizers on development of frost heaving is analytically proved.

Проектирование, строительство и эксплуатация сооружений в криолитозоне осложняются различными факторами. Одним из них является процесс морозного пучения, при котором происходит деформация грунта за счет увеличения объема воды при промерзании. Обычно морозное пучение выражается в поднятии поверхности земли в области, где происходит про-

мерзание грунтов. Свайные фундаменты сооружений в криолитозоне довольно часто подвергаются выпучиванию при промерзании грунтов их оснований в зимнее время. Возникающие при этом деформации конструкций повторяются из года в год и накапливаются со временем.

В соответствии с существующей научной и нормативной литературой

выталкивающими силами при развитии указанного процесса могут быть как касательные силы пучения, возникающие от вертикальных подвижек грунта, примерзшего к боковым поверхностям фундаментов, так и нормальные силы пучения, действующие перпендикулярно поверхности фундамента и возникающие при промерзании грунта под его подошвой. Наибо-



http://accident.perm.ru/files/images/2015/winter2015/100_3024.JPG

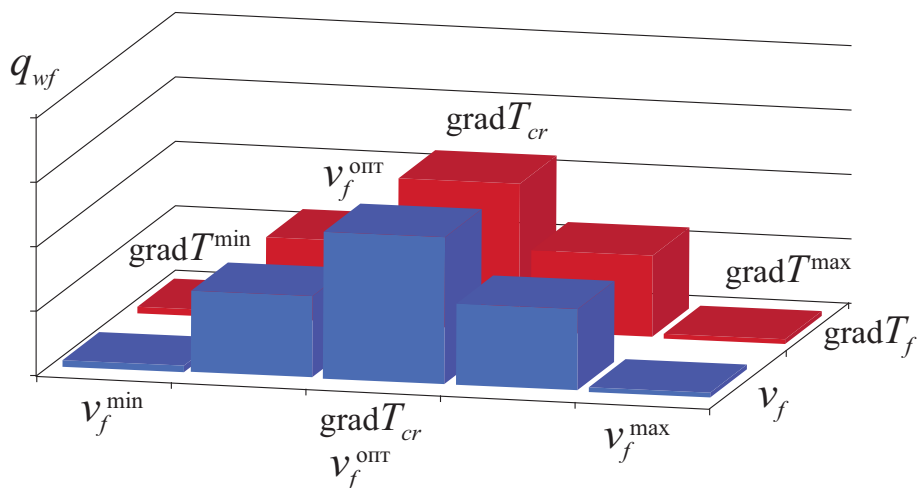


Рис. 1. Зависимости миграционного потока воды от скорости промерзания грунта при минимальном расстоянии от уровня подземных вод $z = 0,1$ м (по [12]) и от температурного градиента зоны промерзания. Буквенные обозначения: q_{wf} — миграционный поток влаги; v_f — скорость промерзания; v_f^{opt} — оптимальная скорость промерзания; v_f^{min} — «минимальная» скорость промерзания, при достижении которой в случае уменьшения v_f миграционный поток влаги q_{wf} прекращается; v_f^{max} — «максимальная» скорость промерзания, при достижении которой в случае увеличения v_f миграционный поток влаги q_{wf} прекращается; $grad T_f$ — температурный градиент зоны промерзания; $grad T_{cr}$ — критическое значение температурного градиента, при котором скорость миграции пленочной воды к фронту промерзания будет максимальной и будет достигаться максимальная интенсивность пучения; T_{cr} — критическая температура охлаждения, при которой скорость перемещения пленочной воды будет максимальной; $grad T_{min}$ — «минимальное» значение температурного градиента, при котором скорость миграции и интенсивность пучения будут минимальны; $grad T_{max}$ — «максимальное» значение температурного градиента, при котором скорость миграции влаги к фронту промерзания будет отсутствовать

лее опасно совместное воздействие на фундаменты указанных сил. Иногда наблюдаются горизонтальные деформации фундаментов и крены сооружений, разрушения подвальных стен и других ограждающих конструкций от горизонтального давления, вызванного действием сил пучения грунтов, нормальных к боковым граням фундаментов.

В соответствии со строительными нормами (СП 22.13330.2011 [10]) к основным деформационным характеристикам промерзающего грунта относятся абсолютная (h_{fh}) и относительная (ϵ_{fh}) деформации морозного пучения. Под абсолютной деформацией морозного пучения h_{fh} принято понимать высоту перемещения некоторой точки поверхности грунта, промерзающего на глубину z , относительно ее исходного положения, наблюдавшегося в предзимний период. Относительной деформацией (или интенсивностью) морозного пучения ϵ_{fh} называют величину dh_{fh}/dz , отнесенную к толщине элементарного слоя dz .

В общем виде величина деформаций пучения h_{fh} промерзающих грунтов может быть выражена соотношением [8]:

$$h_{fh} = h_{ic} + h_{img} - s_{sh} - s_c, \quad (1)$$

где h_{ic} — величина пучения грунта за счет увеличения на 9% объема замерзающей поровой влаги (массивное распушивание); h_{img} — величина пучения за счет миграционного льдонакопления; s_{sh} — деформация усадки талой зоны грунта за счет обезвоживания; s_c — компрессионное уплотнение, вызванное действием внешних и внутренних давлений.

Величина пучения грунта за счет поровой влаги «невелика», а значения s_{sh} и s_c напрямую зависят от расчетных показателей пучения за счет миграционного льдонакопления (h_{img}). Таким образом, для определения деформации пучения ключевым фактором является миграция влаги к фронту промерзания. По данным книги [8] величина пучения за счет миграционного льдонакопления может быть выражена следующим образом:

$$h_{img} = 1,09 K_w K_{an} \delta \left(\frac{\Phi}{T} \right) grad T \cdot \xi / v_f, \quad (2)$$

где K_{an} — коэффициент, равный косинусу угла наклона шлиров льда, $\delta(\Phi/T) = \partial w_{w,p} / \partial T$ — термоградиентный коэффициент; ξ — мощность (глубина) промерзающего слоя; v_f — скорость промерзания; K_w — коэффициент диффузии влаги; $grad T$ — градиент температуры T .

К «значимым» показателям выражения (2), оказывающим влияние на процесс миграции влаги к фронту промерзания, относятся $grad T$ и v_f . Отношение ξ/v_f характеризует время, за которое промерзнет грунт на определенную глубину ξ , откуда вытекает, что увеличение скорости промерзания приводит к уменьшению пучения за счет миграционного льдонакопления:

$$h_{img} \sim \xi / v_f. \quad (3)$$

В работах Чистионова и Фельдмана [7, 12, 13] была установлена зависимость интенсивности миграционного потока влаги q_{wf} к фронту промерзания от скорости промерзания v_f . Ими показано, что для каждого грунта имеется своя оптимальная скорость промерзания v_f^{opt} , при которой создаются наиболее благоприятные

условия для миграции влаги к фронту промерзания, соответствующие максимальному миграционному потоку q_{wf} (рис. 1).

Объем миграционного потока воды к фронту промерзания в первую очередь влияет на степень заполнения пор, трещин и других полостей водой. Согласно СП 25.13330.2012 [11] для оценки степени пучения песчаных грунтов используется степень влажности, или коэффициент влагонасыщения S_s , а для глинистых грунтов — показатель текучести I_L , которые и характеризуют степень заполнения пор водой. Миграция влаги к фронту промерзания может привести к полному заполнению пор, трещин и других полостей водой, что приведет к увеличению пучения за счет миграционного льдонакопления.

На рисунке 1 отражен характер изменений скорости промерзания v_f относительно оптимальной скорости промерзания v_f^{opt} . При уменьшении v_f величина миграционного потока влаги q_{wf} уменьшается. Когда v_f достигает некоторой «минимальной» скорости v_f^{min} , миграционный поток влаги прекращается. При увеличении v_f относительно v_f^{opt} наблюдается аналогичное уменьшение миграционного потока вплоть до его прекращения при достижении «максимальной» скорости промерзания v_f^{max} , что будет способствовать отсутствию пучения за счет того, что свободное пространство в грунте не будет заполнено водой.

Скорость промерзания имеет синусоидальный характер, вызванный разнообразными климатическими условиями. В наиболее холодные промежутки времени степень охлаждения грунта будет высокой, что выразится в увеличении скорости промерзания и приведет к минимизации миграции влаги. В другие промежутки времени условия будут способствовать «максимальному» миграционному потоку влаги.

Таким образом, на морозное пучение грунтов влияет скорость промерзания. Она будет зависеть от степени охлаждения грунта, то есть от температурного режима охлаждающей среды.

В соответствии с рекомендациями [9], составленными В.О. Орловым в научно-производственной лаборатории изучения свойств мерзлых грунтов ПНИИС Госстроя СССР, связь между степенью охлаждения и интенсивностью пучения грунта выражается через величину и периодичность изменений температурного градиента зоны промерзания $gradT_f$. Условием для миграции влаги к фронту промерзания является неразрывность пленок воды при ее движении. Неразрывность пленок сохраняется благодаря наличию температурного градиента содержания незамерзшей влаги, образующего этот градиент (являющийся возбудителем движения влаги). Формированию градиента температур будет способствовать исходная темпера-

тура охлаждения — в конкретном случае температура воздуха, которая и будет оказывать ключевое влияние на перемещение пленочной воды, миграцию влаги к фронту промерзания и в конечном счете на интенсивность пучения грунта. Согласно данным В.О. Орлова [9] существует такое критическое значение температурного градиента $gradT_{cr}$, при котором скорость перемещения пленочной воды будет максимальной, то есть при $gradT_{cr}$ будет достигаться максимальная интенсивность пучения. Интенсивность пучения будет понижаться по мере отклонения $gradT_f$ в ту или иную сторону от критического значения. Изменения интенсивности пучения в зависимости от градиента температуры будут сходны с зависимостью величины миграционного потока воды от скорости промерзания грунта (см. рис. 1). Формированию $gradT_{cr}$ будет способствовать некая критическая температура охлаждения T_{cr} , при которой скорость перемещения пленочной воды будет максимальной. При повышении температуры охлаждения относительно T_{cr} интенсивность перемещения пленочной воды сократится, что приведет к уменьшению миграции влаги к фронту промерзания и, как следствие, к уменьшению пучения. При понижении температуры охлаждения относительно T_{cr} неразрывность пленок воды будет нарушена, поэтому не будет выполняться условие миграции влаги к фронту промерзания, что приведет к отсутствию основного фактора, способствующего увеличению возможного пучения.

В рекомендациях [9] приведены значения сопротивления сдвигу мерзлого грунта относительно фундамента в зависимости от минимальной температуры и средней скорости пучения грунта, промерзающего под подошвой фундамента. Графики зависимостей сопротивления сдвигу от минимальной температуры при различных скоростях пучения представлены на рис. 2. Они демонстрируют, что сопротивление сдвигу мерзлого грунта относительно фундамента зависит от температуры промерзающего грунта: чем ниже температура (отрицательные значения), тем выше сопротивление сдвигу мерзлого грунта относительно фундамента. Согласно СП 25.13330.2012 [11] несущая способность основания зависит от сопротивления сдвигу по поверхности смерзания фундамента, которое увеличивается при понижении темпера-

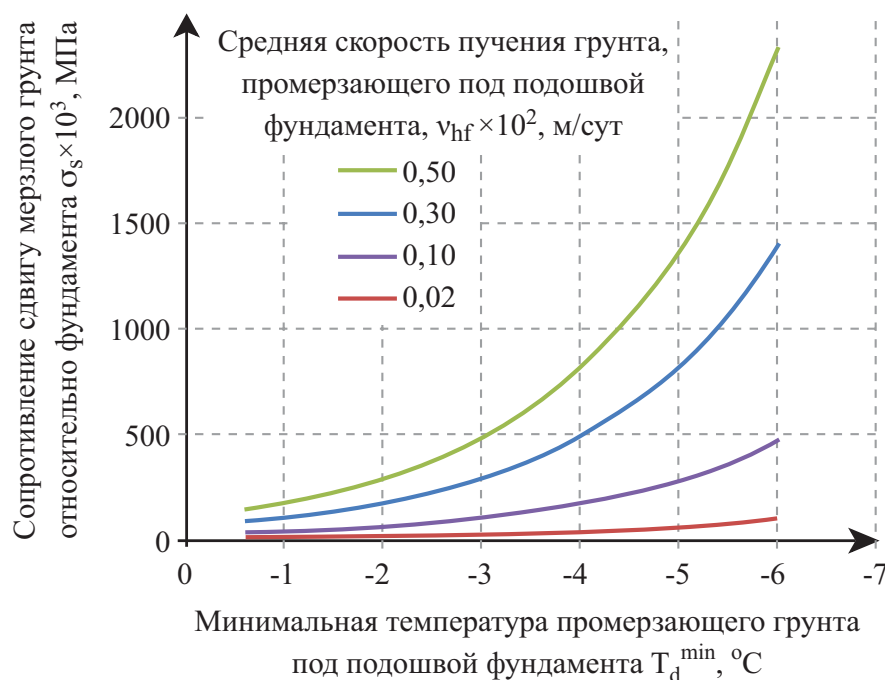


Рис. 2. Графики зависимостей сопротивления сдвигу мерзлого грунта относительно фундамента от минимальной температуры промерзающего грунта под подошвой фундамента в соответствии с рекомендациями [9]

туры. Таким образом, понижение температуры способствует повышению несущей способности фундаментов.

Методы инженерной защиты при развитии морозного пучения грунтов условно можно разделить на две группы — активные и пассивные. К пассивным относятся: организация дополнительной теплоизоляции, изменение характеристик поверхности фундаментов, изменение альбеда поверхности грунта и др. Наиболее надежным методом является замена грунта основания на непучинистый, однако при проектировании и строительстве протяженных и площадных объектов Крайнего Севера зачастую отсутствует местный непучинистый грунт, а доставка привозного становится необоснованно дорогой. В связи с этим наиболее эффективным становится метод инженерной защиты, позволяющий осуществлять охлаждение/промораживание грунта в рамках обозначенных выше оптимальных параметров. Таким методом является использование технологий и технических средств активной термостабилизации грунтов, весьма эффективное для защиты от морозного пучения.

Физической основой применения термостабилизаторов (ТС) для инженерной защиты сооружений в криолитозоне является зависимость свойств дисперсных грунтов от температуры (когда она ниже температуры начала замерзания). Их прочность (на сжатие, на сдвиг, на отрыв от поверхностей фундаментов) многократно возрастает с понижением температуры, а сжимаемость и влагопроницаемость при этом снижаются. Поэтому активное глубинное охлаждение грунтового массива приводит к значительному повышению его несущей способности и устойчивости к воздействию потоков тепла и влаги, возникающих как под влиянием возводимых сооружений, так и вследствие нарушений естественных режимов тепло- и влагообмена.

В качестве технических средств термостабилизации грунтов оснований в криолитозоне нашли широкое применение охлаждающие установки (ОУ). По принципу работы они подразделяются на конвективные (газовые, газожидкостные, жидкостные) и испарительные (двухфазные) [2, 3, 5, 6].

На сегодняшний день основными техническими средствами термостабилизации грунтов являются парожидкостные ТС — двухфазные термосифоны (ДТ). В них конвекция низко-

кипящего рабочего хладагента, находящегося в двухфазном состоянии, сопровождается испарением в нижней (грунтовой) и конденсацией в верхней (воздушной) части устройства. Они обладают очень высокой теплопередающей способностью — на порядок большей, чем у однофазных охлаждающих установок. По сути, двухфазные термосифоны — это автономные теплопередающие устройства с фазовым превращением промежуточного теплоносителя (хладагента). Замкнутый (закрытый) ДТ представляет собой герметично закрытую трубу, полость которой частично заполняется теплоносителем. В полости ДТ происходят термодинамические процессы, совершается парорефрижераторный цикл — кипение (испарение), в результате которого образуются две фазы (паровая и жидкая), конденсация и свободно-конвективный тепломассоперенос между участками кипения (испарения) и конденсации. Все такие термостабилизаторы являются вакуумированными двухфазными термосифонами.

Работают ДТ следующим образом. При отрицательной температуре атмосферного воздуха, которая ниже температуры грунта, термостабилизаторы, установленные в грунт, запускаются в работу. Хладагент, например хладон R22, испаряется, отобрав тепло от среды (грунта или воды), окружающей испаритель ДТ. Пар, поднимаясь вверх, конденсируется на стенке корпуса на участке надземного радиатора. Конденсат стекает вниз. При этом атмосферный холод передается через пленку конденсата и стенку корпуса в грунт. Затем термодинамический цикл повторяется. Процессы тепломассопереноса в двухфазных термосифонах протекают непрерывно, и это обеспечивает эффективную теплопередачу от одной среды к другой. «Зимний» период (октябрь — апрель) работы ДТ называется активным, а «летний» (май — сентябрь), когда они термодинамически «запираются» (не функционируют), — пассивным.

В настоящее время выпускается целый ряд двухфазных термосифонов различных типов и конструкций и разного назначения, изготавливаемых из различных сталей, алюминиевых сплавов и их комбинаций. Сорокалетний опыт исследований, разработки, проектирования, производства и внедрения технологии и технических средств (термосвай, термостабилизаторов и т.д.) термо-

стабилизации позволяет изготавливать эффективные ТС, обладающие высокой надежностью, большим ресурсом, оптимальными техническими, теплофизическими, термодинамическими, экономическими и другими показателями.

Подробнее принципы работы и основные технические параметры парожидкостных термостабилизаторов описаны в работах [1, 3, 6].

Наиболее важными показателями, отражающими работу двухфазных термосифонов, являются: внутреннее термическое сопротивление; наружное термическое сопротивление в зоне испарителя; термическое сопротивление зоны конденсации; эффективный (суммарный) коэффициент теплоотдачи; время выхода на рабочий режим (время самозапуска); градиент температуры по длине (высоте) ДТ; пусковой перепад температур между грунтом и атмосферным воздухом, необходимый для начала функционирования ДТ; длительность периода активной работы.

ДТ разных типов различаются термодинамическими режимами внутреннего тепломассопереноса двухфазного хладагента.

В *однофазных* (жидкостных) охлаждающих установках термодинамический режим тепломассопереноса является *конвективным*. Их эффективный (суммарный) коэффициент теплоотдачи α составляет 3–5 Вт/(м²·°C). В *двухфазных* (парожидкостных) термостабилизаторах в зависимости от их конструкции и условий термодинамический режим тепломассопереноса может быть *смешанным* или *с пленочным кипением* (когда осуществляется передача тепла со скрытой теплотой парообразования). При смешанном режиме поверхность испарения теплоносителя очень мала и коэффициент теплоотдачи α равен 10–20 Вт/(м²·°C), а при испарении с пленки жидкого теплоносителя $\alpha=35\div40$ Вт/(м²·°C).

Гладкостенные термостабилизаторы из стали имеют значительно более плохие теплопередающие характеристики, чем аналогичные ТС из алюминиевых сплавов. В целях повышения эффективности ТС из стали при их изготовлении необходимо применять конструктив с капиллярной структурой. Это особенно важно для термостабилизаторов с корпусом из стали диаметром более 20–25 мм, ибо организация пленочного режима стекания теплоносителя по внутренней поверхности корпуса ТС возможна

только при создании капиллярной структуры в виде канавок, насечек, сеток, винтовой резьбы, шероховатости и т.п.

При работе эффективных типов и конструкций термостабилизаторов «нового поколения» создаются условия пленочного режима стекания теплоносителя по внутренней стенке корпуса ТС в зоне испарения (происходит испарение с поверхности тончайшей пленки жидкого теплоносителя).

У термостабилизаторов с упрощенными типами конструкций капиллярная структура в корпусе в основном отсутствует. Термическое сопротивление у подобных ТС в 10–100 раз выше, чем у ТС «нового поколения». Термодинамический режим в них является смешанным (в лучшем случае), испарение хладагента в испарителе происходит с «зеркала» столба жидкости, а поверхность испарения очень мала.

Термостабилизаторы «нового поколения» обладают целым рядом преимуществ, которые обусловлены выбором эффективного термодинамического режима внутреннего процесса тепломассопереноса двухфазного хладагента, оптимального материала конструкции, соответствующего диаметра корпуса и типа хладагента, а также конструктивными особенностями (ка-

пиллярной структурой в корпусе) и эффективным радиатором (оребрением конденсатора) с повышенной теплопередающей мощностью (с конструкцией, оптимальной для климатических условий криолитозоны).

При оценке эффективности работы двухфазных термосифонов в качестве средств инженерной защиты от морозного пучения грунтов следует рассматривать следующие их основные характеристики:

- эффективный (суммарный) коэффициент теплоотдачи α ;
- время самозапуска термостабилизатора τ ;
- термический градиент по длине (высоте) корпуса испарителя $\text{grad}T_u$;
- пусковой перепад температур между грунтом и атмосферным воздухом Δt_n , необходимый для начала функционирования.

Совокупность оптимальных величин указанных параметров улучшает основные теплотехнические и термодинамические характеристики эффективных термостабилизаторов относительно упрощенных ТС в 1,5–2 раза и более (в зависимости от типа ТС или других охлаждающих систем).

Значения эффективного (суммарного) коэффициента теплоотдачи α двухфазных термосифонов различных типов указаны выше. *Время самозапуска* τ у ТС «нового поколения» и малоэффективных ТС (упрощенной конструкции) равно 0,6–2 и 6–10 ч соответственно. *Пусковой перепад температур* Δt_n , необходимый для начала функционирования, у ТС «нового поколения» и малоэффективных ТС равны 1 и 5–6 °С соответственно. *Градиент температур* $\text{grad}T_u$ по длине (высоте) у ТС «нового поколения» и малоэффективных ТС равны 0,1 и 0,3 °С/м соответственно.

Анализ значений основных характеристик двухфазных термосифонов различных типов указывает на то, что вышеприведенные параметры являются определяющими при выборе термостабилизаторов для решения обозначенных в данной работе задач инженерной защиты от морозного пучения грунтов.

Так, при больших величинах пускового перепада температур и времени самозапуска термостабилизатора в работу скорость промерзания грунта может приблизиться к величине v_f^{onm} быстрее, чем в естественных условиях, и остаться в этой области, и в сочетании с другими факторами это не остановит развитие морозного пучения грунта.

При быстром самозапуске ТС скорость промерзания становится значительно выше v_f^{onm} , что в соответствии с графической зависимостью, представленной на рис. 1, позволяет минимизировать величину миграционного потока, а значит, и морозное пучение.

Эффективный коэффициент теплоотдачи α , характеризующий холодопроизводительность термостабилизатора, является определяющим для таких характеристик, как минимальная температура промерзающего грунта T_d^{min} и скорость промерзания v_f , которые определяют несущую способность грунтов и количество миграционной влаги, движущейся к фронту промерзания, соответственно. Понижение температуры промораживания способствует увеличению несущей способности и повышению кровли мерзлых грунтов, что уменьшит глубину слоя сезонного промерзания/оттаивания в следующем сезоне и приведет к значительному уменьшению морозного пучения грунта. При уменьшении глубины сезонного промерзания будет снижаться значение h_{ic} (см. формулу (1)), а величина h_{img} будет уменьшаться за счет высоких скоростей и абсолютных значений температур промерзания. Таким образом:

$$h_{ph} \sim \frac{1}{\alpha}. \quad (4)$$

Для термостабилизаторов жидкостного типа и некоторых парожидкостных ТС значения эффективного коэффициента теплоотдачи настолько малы (5–10 Вт/(м·°С)), что за активный период работы происходит лишь уменьшение времени полного промораживания на проектную глубину, однако в пассивный (летний) период этот мерзлый массив полностью оттаивает и в годовом цикле не происходит приращения мерзлого «ядра» вокруг фундамента.

Практическое отсутствие термического градиента по длине корпуса испарителя термостабилизатора ($\text{grad}T_u$) гарантирует равномерное эффективное охлаждение (замораживание) грунта (воды) вокруг испарителя по всей его длине (рис. 3). Равномерное охлаждение грунта обеспечивает относительно одинаковые скорости промерзания и способствует равномерности промораживания грунта (воды) по длине (высоте) вокруг сваи, установленной рядом с ДТ [5, 14].

Для двухфазного термосифона с «низкой» эффективностью охлажде-

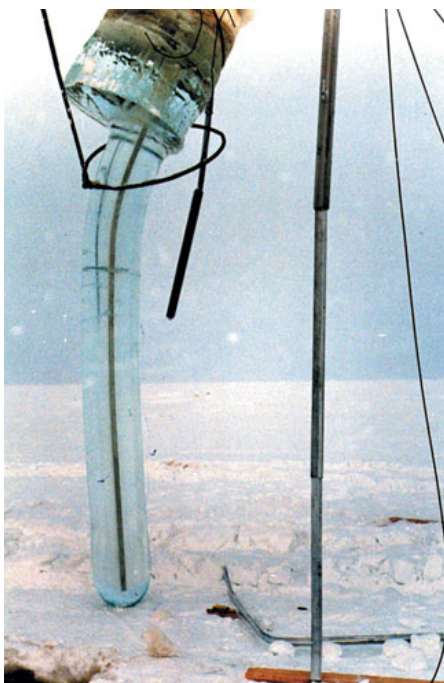


Рис. 3. Результаты эксперимента по замораживанию воды в Тазовской губе: за трое суток диаметр замороженного льда вокруг термостабилизатора «высокой» эффективности типа ТМД-5 с отсутствием градиента температур составил 49–50 см по всей длине его подводной части

ния эффективный коэффициент теплоотдачи (а соответственно, и температура охлаждения) будет выше в приповерхностной зоне испарителя/фундамента. С глубиной эти показатели из-за наличия температурного гради-

ента будут уменьшаться, а значит, будет сокращаться и радиус промораживания. Таким образом, формируется конусообразная форма мерзлого массива и не всегда будет обеспечено условие смыкания вершины конуса с

кровлей многолетнемерзлых грунтов. Неравномерность промораживания и наличие конусообразного мерзлого основания могут привести к усилению нормальных и касательных сил пучения и, как следствие, к деформациям сооружения. Усилению касательных сил пучения будет способствовать повышенное охлаждение верхней части промерзшего грунта, которое увеличит сопротивление сдвигу, а невысокие скорости промерзания приведут к подтоку влаги, что увеличит силы морозного пучения.

Вышеописанные условия могут способствовать достижению в грунте критических значений $\text{grad}T_{cr}$ и v_f^{onm} , при которых морозное пучение грунта интенсифицируется раньше, чем в естественных условиях. Значит, термостабилизаторы «низкой» эффективности не защищают от морозного пучения, а влияют на сдвиг температуры или даже на интенсификацию процесса пучения.

Термостабилизаторы «нового поколения» за счет быстрого самозапуска, малого пускового перепада температур, высокого суммарного коэффициента теплоотдачи и температурной «безградиентности» по длине испарителя позволяют снизить или полностью исключить морозное пучение за счет:

- обеспечения условия развития максимальных скоростей промерзания v_f^{max} (см. рис. 1), что позволяет остановить миграционный поток влаги;
- уменьшения толщины слоя сезонного промерзания/оттаивания благодаря высокой холодопроизводительности и аккумуляции отрицательных температур в годовом цикле;
- формирования «безградиентного» цилиндра (радиуса) промороженного грунта.

На рисунке 4 для наглядности и большей информативности показано влияние вышеуказанных параметров на примере результатов расчета динамики температурных полей вокруг одиночно установленных термостабилизаторов различных типов при промораживании талого грунта. На рис. 4, а представлены результаты расчета для однотрубной жидкостной термосвай с диаметром трубы 159 мм (ТС1), на рис. 4, б — для парожидкостного термостабилизатора с трубчатым корпусом из стали диаметром 38 мм (ТС2), на рис. 4, в — для «высокоэффективного» парожидкостного термостабилизатора «нового поколе-

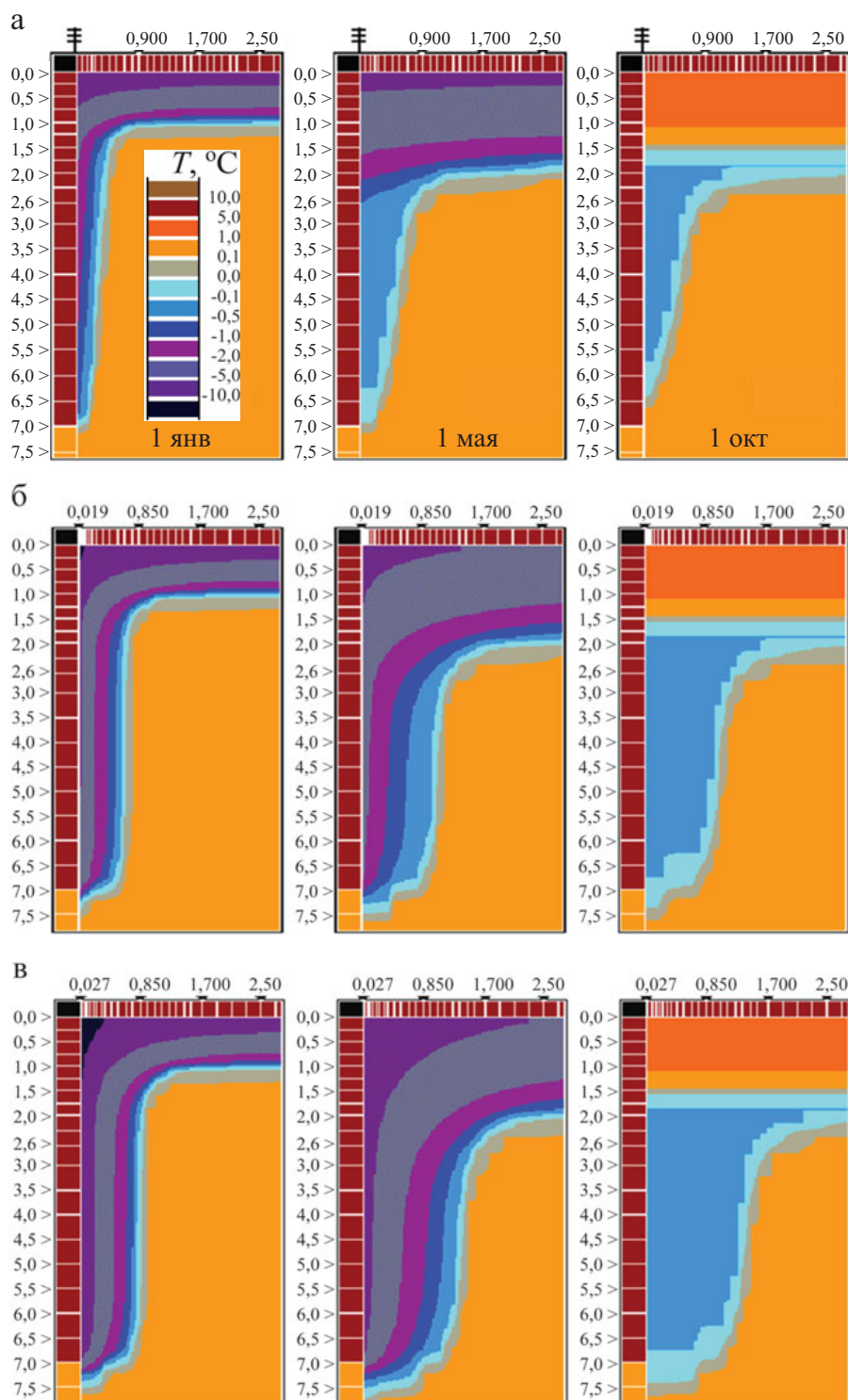


Рис. 4. Динамика температурных полей вокруг одиночно стоящих термостабилизаторов различных типов при промораживании талого грунта в первый активный период: а — жидкостная однотрубная термосвай с диаметром трубы 159 мм (ТС1); б — парожидкостный термостабилизатор с трубчатым корпусом из стали диаметром 38 мм (ТС2); в — парожидкостный термостабилизатор ТМД-5 с корпусом из алюминиевого сплава АД-31 диаметром 54 мм (ТС3). Вертикальная ось — глубина, м. Горизонтальная ось — расстояние, м (начало координат — место установки термостабилизатора). Цветовая шкала — температура T , °C

ния» ТМД-5 с корпусом из алюминиевого сплава АД-31 диаметром 54 мм (ТС3) [4, 5].

Наиболее демонстративным является моделирование динамики температурного поля грунта на примере ТС1 (см. рис. 4, а). Данный тип термостабилизатора характеризуется длительным временем самозапуска, большим пусковым перепадом температур, низким эффективным коэффициентом теплоотдачи и неравномерным термическим градиентом. Установка такого ТС увеличит срок ввода в эксплуатацию сооружения, не обеспечит понижения температур грунтов должным образом, а неравномерное распределение термического градиента будет способствовать формированию конусообразного промораживания. Для эффективного охлаждения грунта потребуется значительное увеличение количества термостабилизаторов такого типа и уменьшение шага их расстановки (в 2–6 раз), что приведет к увеличению сметных расходов на проектирование и строительство.

Разница между результатами прогнозных расчетов температурных полей талых однородных грунтов для ТС2 (см. рис. 4, б) и ТС3 (см. рис. 4, в) визуально выражается в радиусе промораживания и небольшом различии градиентов температур по глубине. Эффективность защиты от морозного пучения оказывается выше при использовании термостабилизатора типа ТС3. Однако эта разница будет гораздо «контрастней» и будет иметь большее значение, например, в зоне распространения мерзлых засоленных пучинистых грунтов полуострова Ямал и других северных территорий Западной Сибири. Отсутствие привозного грунта, наличие обводненных пылеватых песков и глинистых грунтов, наличие смещений температур фазовых переходов засоленных грунтов в сторону отрицательных температур создают комплекс особо сложных в инженерно-геокриологическом плане условий в указанных регионах. Анализируя рисунок 2, можно сделать вывод, что при больших скоростях и величинах морозного пучения (как, например, для указанных территорий) уменьшение температуры даже на 1 °C может привести к изменению сопротивления сдвигу мерзлого грунта относительно фундамента в 1,5 раза. Таким образом, для ТС3 увеличение радиуса промораживания на 0,5–1 м и более, а также понижение отрицатель-

ной температуры на 1–2 °C и более по сравнению с ТС2 и тем более ТС1 смогут обеспечить проектную несущую способность в первый год строительства и эксплуатации, а также увеличить (аккумулировать) эти значения в несколько раз в последующие годовые циклы работы термостабилизатора, в целом повысив эксплуатационную надежность здания или сооружения. Подробнее данный аспект отражен в работах [2, 3, 6].

Таким образом, в данной статье проведен факторный анализ развития процесса пучения, а также приведено научно-техническое обоснование технологии и технических средств термостабилизации при инженерной защите. Основными факторами развития морозного пучения грунтов являются критическое значение температурного

градиента $\text{grad}T_{cr}$, при котором скорость миграции пленочной воды к фронту промерзания и интенсивность пучения будут максимальными, и оптимальная скорость промерзания v_f^{opt} . Работа термостабилизаторов «низкой» эффективности может не только не остановить процесс пучения, но и привести к достижению «критических» значений его интенсификации. Такие факторы работы термостабилизаторов «нового поколения», как уменьшение мощности слоя сезонного оттаивания, отсутствие градиента температуры по длине корпуса при промораживании, увеличение скорости промерзания, эффективно позволяют не допускать развития процесса морозного пучения грунтов, а значит, повышают эксплуатационную надежность объекта, возведенного на этих грунтах. ❄

Список литературы

1. Баясан Р.М. Оценка эффективности работы двухфазных термосифонов, применяемых в качестве термостабилизаторов грунтов оснований сооружений в криолитозоне / Материалы Международной конференции «Криогенные ресурсы полярных регионов». Т. 2. Салехард, 2007. С. 296–298.
2. Баясан Р.М., Голубин С.И. Технология и технические средства термостабилизации мерзлых грунтов оснований магистральных и промышленных трубопроводов в криолитозоне // Инженерные изыскания. 2012. № 8. С. 71–76.
3. Баясан Р.М., Голубин С.И., Лобанов А.Д., Баясан Т.В. Парожидкостные термостабилизаторы различных типов и назначения, их конструктивные и теплотехнические особенности // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2012. № 4 (32). С. 14–19.
4. Баясан Р.М., Коротченко А.Г., Волков Н.Г., Комаров И.А., Лобанов А.Д. Эффективность работы различных типов СОУ в засоленных многолетнемерзлых грунтах // Материалы 3-й Конференции геокриологов России. Т. 4. М.: Изд-во МГУ, 2005. С. 27–32.
5. Баясан Р.М., Коротченко А.Г., Исмаилов И.А., Лобанов А.Д. Применение сезонных охлаждающих устройств для повышения несущей способности грунтов оснований и обеспечения устойчивости инженерных сооружений на вечномерзлых грунтах // Материалы 2-й Конференции геокриологов России. Т. 4. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 11–16.
6. Баясан Р.М., Лобанов А.Д., Баясан Т.В., Голубин С.И. Сравнительная оценка эффективности работы двухфазных термосифонов для термостабилизации грунтов в криолитозоне // Инженерные изыскания. 2012. № 8. С. 66–69.
7. Кудрявцев С.А. Влияние миграционной влаги на процесс морозного пучения сезоннопромерзающих грунтов // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2003. № 7. С. 233–240.
8. Основы геокриологии. Часть 5. Инженерная геокриология / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1999. 526 с.
9. Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов. М.: Стройиздат, 1986. 72 с.
10. СП 22.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*). Основания зданий и сооружений. М.: Минрегион России, 2010.
11. СП 25.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88). Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Минрегион России, 2011.
12. Фельдман Г.М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. Новосибирск: Наука, 1988. 258 с.
13. Чистотин Л.В. Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах. М.: Наука, 1973. 144 с.
14. Bayasan R.M., Korotchenko A.G., Lobanov A.D., Pustovoi G.P. Technique for thermal stabilization of soils at bases of structures in permafrost regions // Journal of Glaciology and Geocryology. 2004. V. 26. P. 201–206.