

Парожидкостные термостабилизаторы грунта различных типов и назначения, их конструктивные и теплотехнические особенности

В последние 25 лет в России при строительстве, эксплуатации и ремонте объектов нефтегазового комплекса и других сооружений промышленного и гражданского назначения в криолитозоне нашла широкое применение технология термостабилизации мерзлых грунтов оснований и фундаментов, как наиболее эффективный активный метод инженерной защиты многолетних мерзлых грунтов (ММГ) от деградации. Технология термостабилизации с применением искусственного замораживания и охлаждения грунтов с помощью охлаждающих устройств (ОУ) – термостабилизаторов (ТС) различных типов позволяет расширить область использования мерзлых пород в качестве оснований сооружений по I принципу, повысить несущую способность грунтовых и свайных оснований и фундаментов и, тем самым, обеспечить их устойчивость и надежность, упростить технические решения и технологию нулевого цикла строительства, а кроме того, в ряде случаев снизить материалоемкость и трудозатраты, сократить сроки и, соответственно, стоимость строительства.

Предназначенные для реализации технологии активной термостабилизации ММГ в криолитозоне ОУ-ТС путем искусственного замораживания талых и охлаждения мерзлых грунтов оснований, являются автономными холодильными устройствами, работающими за счет низких температур атмосферного воздуха в холодное время года и не требующими в процессе эксплуатации никаких затрат.

По типу используемого теплоносителя (хладагента) существуют 4 типа охлаждающих устройств: газовые (воздушные), жидкостные, парожидкостные (двухфазные) и газожидкостные (эффект барботажа). ОУ принято подразделять по принципу работы на конвективные (газовые, жидкостные и газожидкостные) и испарительные (двухфазные).

Однофазные (конвективные) ОУ не имеют сегодня широкого применения



Р.М. Баясан
Генеральный директор АОЗТ «Интер Хит Пайп», Москва



С.И. Голубин
И.о. начальника лаборатории ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва



А.Д. Лобанов
Заместитель генерального директора АОЗТ «Интер Хит Пайп», Москва



Т.В. Баясан
Главный специалист АОЗТ «Интер Хит Пайп», Москва

► **Ключевые слова / Key words:**

- термостабилизация, криолитозона, инженерная защита, геотехническая система;
- thermal stabilization, permafrost, engineering protection, geotechnical system

в силу малой теплопередающей способности и худших технико-экономических характеристик.

Парожидкостные ТС – двухфазные термосифоны (ДТ), обладают очень высокой теплопередающей способностью, быстрым темпом вмораживания, изотермичностью по длине ТС, высокой эффективностью охлаждения, удобством транспортировки и монтажа, малыми металлоемкостью и весом. Данный тип ТС

не требует большого диаметра труб, для их заправки расходует незначительное количество хладагента, что согласуется с особыми экологическими нормами при работе в условиях тундры.

ТС – ДТ являются «тепловыми диодами», проводящими «холод» в зимний период года и не проводящими «тепло» в летний период года.

ТС могут применяться при строительстве и эксплуатации объектов промышленного и гражданского назначения в целях:

- восстановления мерзлого состояния грунтов в основании зданий и сооружений, построенных по I принципу;
- предпостроечного замораживания грунтов оснований зданий и сооружений;
- замораживания грунтов оснований в процессе строительства и эксплуатации;
- уменьшения теплового воздействия зданий и сооружений на грунты оснований в процессе эксплуатации;
- устройства фундаментов промышленных (склады, цеха, компрессорные и насосные станции и т.п.), жилых и общественных зданий;
- устройства фундаментов линейных сооружений (линий электропередач, линий связи, трубопроводов и др.);
- создания мерзлого основания автомобильных и железных дорог, взлетно – посадочных полос, рулежек, наземных резервуаров и хранилищ;
- создания противодиффузионных завес;
- создания мерзлотных (тепловых) завес;
- обеспечения устойчивости нефти- и газодобывающих скважин, шахтных стволов и горных выработок;
- устройства противодиффузионных льдогрунтовых ядер в теле дамб и плотин, а также льдогрунтовых стенок при проходке котлованов, колодцев и траншей;
- создания мерзлотных завес для защиты мерзлого состояния грунтов оснований сооружений от воздействия близкорасположенных тепловыделяющих объектов;
- создания в зимнее время переправ, дорог и ледовых островов для бурения скважин.

Выбор технологии (способов) активной термостабилизации грунтов, а

также типов и моделей ТС определяется конструктивными особенностями зданий и сооружений и технологическими особенностями их строительства и эксплуатации.

Для решения столь широкого спектра задач активной термостабилизации ММГ АОЗТ «Интер Хит Пайп» были разработаны ТС малого диаметра различных типов и назначения нового 2-го поколения – полной заводской готовности. Удалось создать, освоить производство и внедрить инновационные разработки на базе высоких технологий. С 1992/93 г.г. в «Интер Хит Пайп» были разработаны и внедрены в промышленность 12 конструкций ТС – ДТ малого диаметра (42 – 56 мм): вертикального, наклонного, слабонаклонного типов и с гибкой связью ТМД-4, ТМД-4М, ТМД-5, ТМД-5М, ТМД-5Н, ТСГ-6, ТМД-Р, ТН и ТГС (все – сезонного действия), ТТМ-1(круглогодичного действия) и составные длинномерные ТС – ДОУ-1Г, ДОУ-1В.

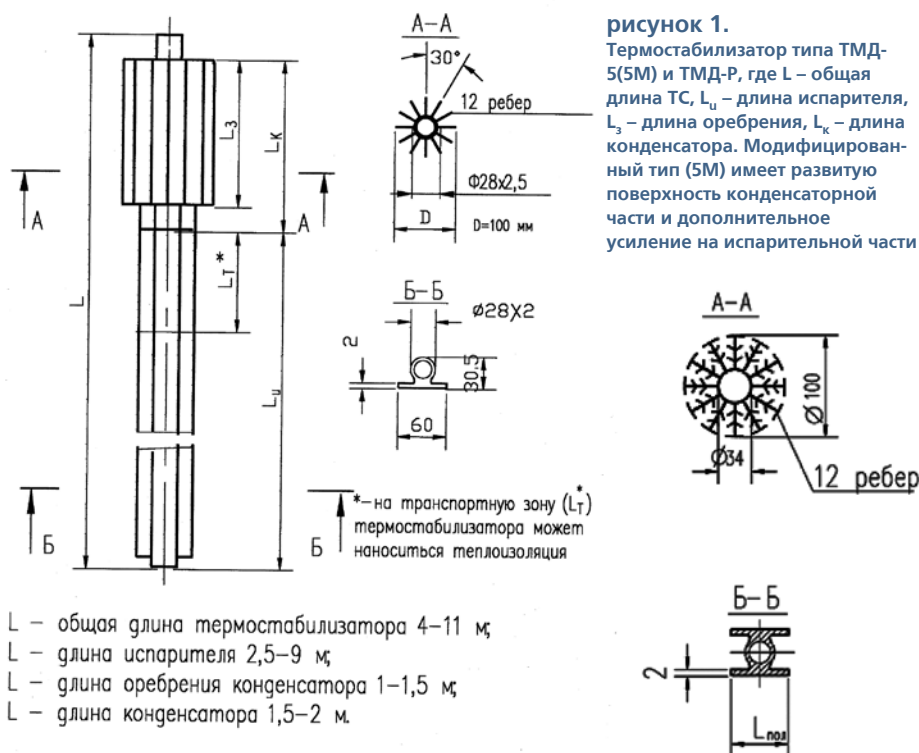
ТС – ДТ изготавливаются из различных углеродистых, хладостойких и нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов.

Результаты комплекса исследований и испытаний позволили оптимизировать технические решения по выбору материала термостабилизаторов, хлада-

гента, конструктивным особенностям и параметрам, технологии изготовления. В последнее время в качестве хладагента в представленных ДТ применяется, в основном, хладон, реже – аммиак. Выбор хладагента и его количество определяется с учетом необходимых термодинамических характеристик ДТ, требований санитарных норм и совместимости. Совместимость пары «конструкционный материал – хладагент» очень важна при разработке ТС. Неправильный подбор «пары» может привести к накоплению выделяющихся неконденсирующихся газов, например, водорода в конденсаторе ДТ и, как результат – к снижению эффективности (хладопроизводительности) ТС уже после первых нескольких лет эксплуатации. Важное значение имеет также соблюдение определенной технологии изготовления ДТ – ТС.

При оценке эффективности работы ТС – ДТ следует руководствоваться следующими характеристиками: внутреннее термическое сопротивление; наружное термическое сопротивление в зоне испарителя; термическое сопротивление зоны конденсации; время выхода на рабочий режим (время самозапуска); средний темп замораживания грунта в первый месяц работы; градиент температуры по длине ДТ; коэффициент эффективности охлаждения. Все выше перечисленные факторы учтены при разработке и изготовлении термостабилизаторов конструкций «Интер Хит Пайп».

Наиболее эффективными из всего «семейства» разработанных в «Интер Хит



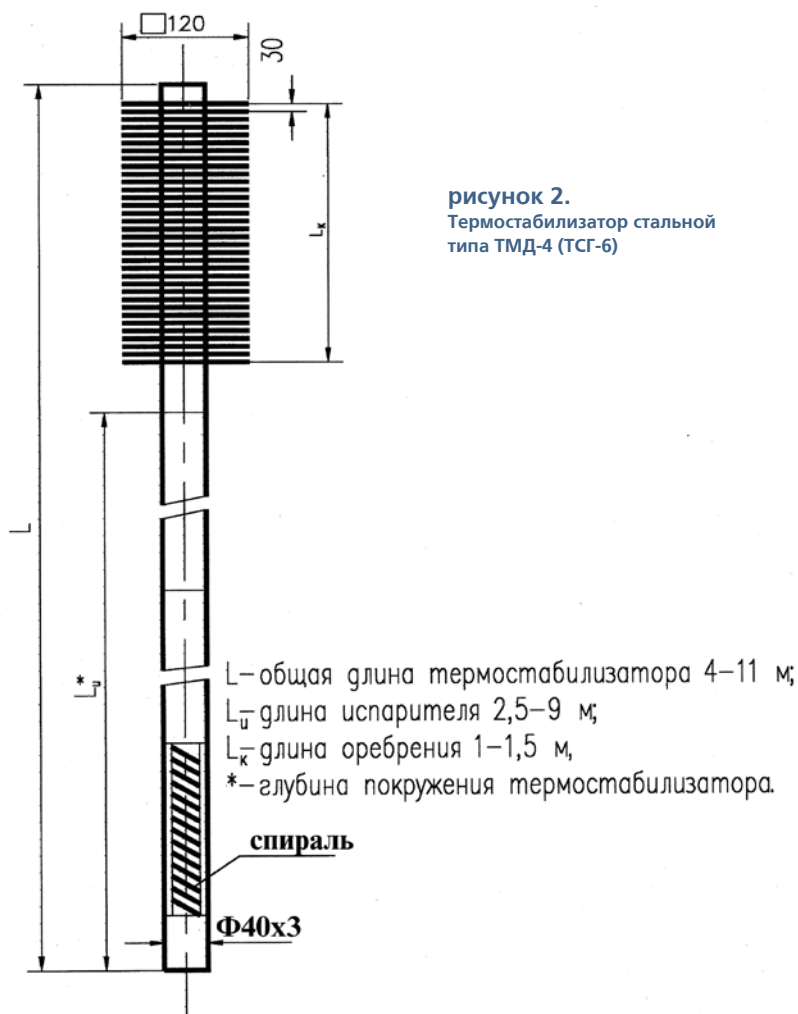


рисунок 2.
Термостабилизатор стальной
типа ТМД-4 (ТСГ-6)

Пайп» термостабилизаторов являются ДТ, изготавливаемые из легких антикоррозионных алюминиевых сплавов АД-31 и АМГ. К данным термостабилизаторам относятся: ТМД-5, ТМД-5М, ТМД-5Н и ТМД-Р разных модификаций, ТТМ – 1 и ДОУ – 1.

Остановимся подробно на эффективных и перспективных ТС.

Термостабилизаторы типа ТМД-5 (рисунок 1) и все его модели и модификации обладают существенно более высокими (в 3 – 7 раз) техническими, термодинамическими и теплофизическими характеристиками по сравнению со стальными ТС (рисунок 2). Кроме того, ТМД-5 имеют в 3 раза меньший вес.

ТС типа ТМД-4 диаметром 42 мм из нержавеющей стали по своим теплотехническим характеристикам (хладопроизводительность, радиус промораживания и т.д.) уступает ТМД-5 на 20 - 25%, а ТС типа ТСГ-6 диаметром 54 мм из хладостойкой стали (09Г2С) – на 10 – 15%. Стальные ТС обладают тем преимуществом, что они более прочны и «антивандалны».

Все ТС из алюминиевых сплавов (типа ТМД-5 и т.д.) малоинерционны. Время самозапуска (выхода на рабочий

режим) в 4 – 8 раз меньше, чем у стальных ТС, тем самым период их активной работы увеличивается за сезон в среднем на 1 месяц. ТМД-5 обладают очень малым градиентом температур по длине (0.1°С/м.). Высокая эффективность работы ТМД-5 наглядно подтверждена натурными испытаниями по замораживанию воды в Тазовской губе.

ТС типа ТМД-Р с развитой поверхностью теплообмена обладает большей тепловой мощностью.

Его радиатор длиной 1,5 м площадью 3 м² выполнен из коррозионностойкого алюминиевого сплава АМГ2 в виде трубы с 12 продольными ребрами, толщина стенки трубы радиатора – 3 мм, ребер – 2,5 мм. Каждое ребро радиатора имеет по 2 пары продольных «лепестков» толщиной – 2 мм (рисунок 1). Радиатор изготавливается методом экструзии (пресование при температуре около 400°С) и может иметь любую длину.

Термостабилизатор круглогодичного действия ТТМ-1 (рисунок 3) выполнен на базе ТМД-5, конденсаторная (надземная) часть которого снабжена блоком термомодулей – полупроводниковых устройств, реализующих эффект Пельтье за счет подводимого извне постоянного электрического тока 3А низкого напряжения 12 В. Блок термомодулей может быть съемным (при снятом или отключенном блоке ТТМ-1 работает как обычный ДТ типа ТМД-5), а может и оставаться на зиму для дополнительного охлаждения во время оттепелей. Термоэлектрические модули мощностью от 1 до 50Вт создают температурный перепад равный 67°С. При температуре атмосферы +25°С температура холодной стороны модуля составляет – 42°С.

Опытные образцы ТТМ-1 в 2000 г. успешно прошли приемочные межведомственные испытания на электроподстанции ОАО «Тюменэнерго» в районе Нового Уренгоя. Режимные наблюдения за работой ТТМ-1 показали их высокую эффективность.

В летнее время после включения термомодульного блока температура грунта вдоль стенки ТТМ-1 существенно понижается. Так в октябре температура грунта на глубинах 2 – 5 м в естественных условиях составляет +(2.4ч2.6)°С, а возле ТТМ-1 существенно понижается до отрицательных температур –(3.1ч3.3)°С. ТТМ-1 (а в перспективе и ТТМ-2) могут быть рекомендованы для установки внутри закрытых помещений, при работах на нулевом цикле и возведении фундаментов на слабонесущих ММГ в летнее и осеннее время, для поддержания круглогодичной отрицательной температуры ММГ при эксплуатации нефтегазовых скважин, плотин, дамб и т.п., где есть возможность подключения электропитания.

Слабонаклонные и наклонные ТС (ТН, ТМД-5(5Н) наклонной модификации, «Г»-образная секция ДОУ-1) характеризуются прежде всего наличием ручья жидкости в нижнем сегменте поперечного сечения корпуса ДТ. С учетом возможности переменных режимов работы ДТ, «лужа» теплоносителя, примыкающая к торцу корпуса в зоне испарения, может достигать значительной длины (десятки

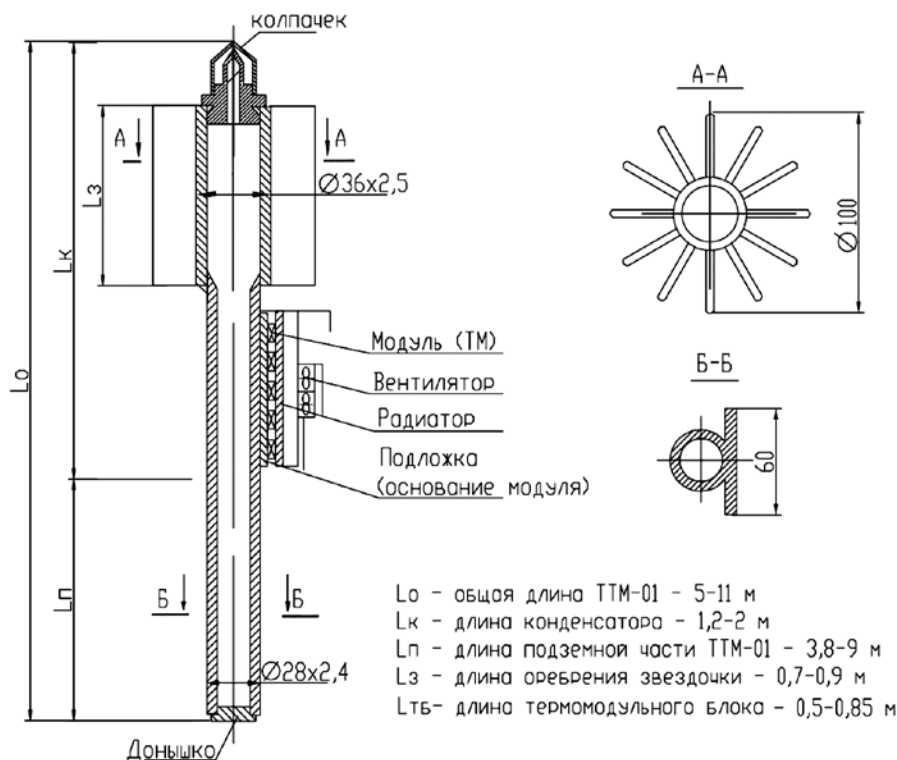


рисунок 3.
Термостабилизаторы типа ТТМ-1 круглогодичного действия

L₀ - общая длина ТТМ-01 - 5-11 м
 L_к - длина конденсатора - 1,2-2 м
 L_п - длина подземной части ТТМ-01 - 3,8-9 м
 L_з - длина оребрения звездочки - 0,7-0,9 м
 L_{тб} - длина термомодульного блока - 0,5-0,85 м

ТН и ТСН капиллярная структура выполняется в виде витков спирали из нержавеющей проволоки диаметром (0,8-1,2) мм с шагом спирали 10 мм на внутренней поверхности ЗИ ДТ (**рисунок 5**).

В результате исследований были определены оптимальные длины и угол наклона к вертикали конденсатора (около 5°) и угол наклона к горизонту испарительной части ДТ (1,5° - 2,0°) (**рисунок 5**). Следует отметить, что правильный выбор этих параметров необходим для большей равномерности охлаждения грунта над корпусом слабонаклонных ТС. Причем «овальность» замерзшего грунта вокруг ДТ из алюминиевых сплавов значительно меньше, чем у ДТ из углеродистой и нержавеющей стали.

Для решения задач инженерной защиты грунтов оснований площадных сооружений больших размеров, устьев скважин, а также создания мерзлотных завес, мерзлого ядра земляных плотин, дамб и т. п. глубинами в десятки метров в «Интер Хит Пайп» были проведены исследования с целью разработки и создания длинномерного охлаждающего устройства. При этом длинномерный двухфазный термосифон (ДДТ) должен был обладать термодинамическими и теплофизическими характеристиками, близкими к одиночным ДТ - ТС (длинной не более 12,0 м, что определяется, в основном, условиями транспортировки), по возможности, полной заводской

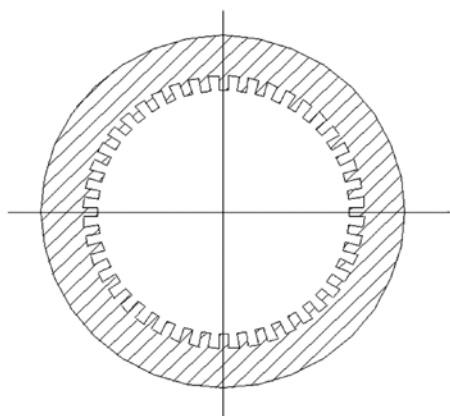


рисунок 4.
Капиллярная структура внутренней поверхности зоны испарения в виде «осевых канавок»

процентов от длины зоны испарения). В корпусах из любой стали необходимо создавать капиллярную структуру в зоне испарения (винтовая нарезка, спираль, канавки, сетка и т.д.).

При отсутствии капиллярной структуры в зоне испарения термическое сопротивление у ДТ из углеродистой стали в 1,5 раза, а у ДТ из нержавеющей стали - в 2 раза больше, чем у ДТ типа ТМД-5 из алюминиевых сплавов.

Следует отметить, что в ТС из алюминиевых сплавов (ТМД-5 всех моделей, ТТМ и ДОУ-1) при необходимости на внутренней поверхности зоны испаре-

ния (ЗИ) ДТ выполняются осевые канавки (**рисунок 4**), а в стальных ТС практически всегда используются пружины или спирали. Так, например, в ТС типа ТСГ-6,

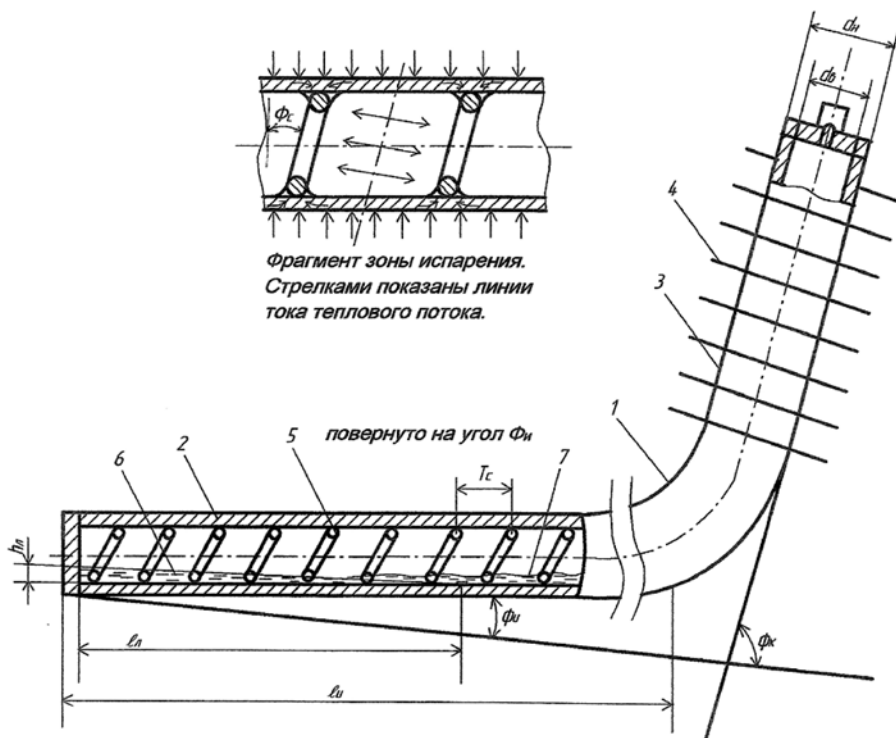


рисунок 5.
Термостабилизаторы слабонаклонный (ТСН) и наклонный (ТН)
 1 - корпус, 2 - зона испарения, 3 - зона конденсации, 4 - ребра, 5 - спираль, 6 - «лужа» теплоносителя, 7 - ручей жидкости, φи, φк - углы наклона к горизонту

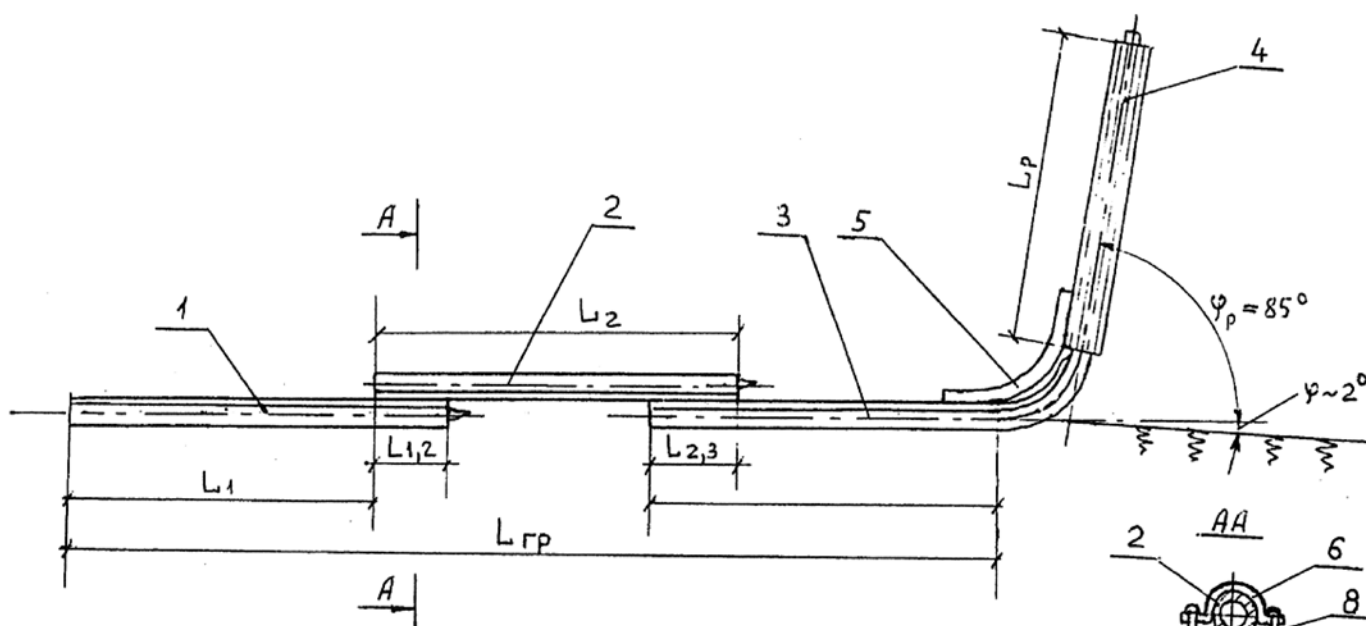


рисунок 6.
 Длинномерное охлаждающее устройство ДОУ-1Г (горизонтальной модификации), где 1,2,3 – первая, вторая и третья секции ДОУ-1, соответственно, 4 – радиатор, 5 – уголок, 6, 7 – хомуты, 8 – болты М6, $L_{1,2}$ и $L_{2,3}$ – длины контактов между секциями, L_p – длина радиатора, φ_p – угол между осями секций и осью радиатора, φ – угол наклона осей секций к горизонту

готовностью, а также удобством транспортировки и монтажа на месте внедрения с учетом крайне сложных природно-климатических условий районов распространения ММГ.

В процессе исследования стало очевидно, что ДДТ должны быть составными и состоять из нескольких секций – отдельных ДТ.

Следует отметить, что знание тепловых процессов в отдельном двухфазном термосифоне недостаточно для разработки и конструирования составного термосифона. Это связано, в основном, с решением двух задач. Первая – необходимость обеспечения эффективной теплопередачи на участках контакта между смежными ДТ, т.е. в зонах перекрытия одним термосифоном другого. Вторая – в составном ДДТ, состоящем из нескольких секций, в этих последних необходимо с большой точностью знать дозу заправки теплоносителем каждого термосифона. Это обусловлено тем, что в зонах испарения ДТ на участках контактов длина «лужи» должна быть минимальной в виду того, что она блокирует часть зоны конденсации смежной секции ДТ. Для решения этих задач были проведены исследования течения жидкой пленки теплоносителя в секциях вертикального и наклонного ДДТ. Полученные результаты

позволили определять дозу теплоносителя (хладога R 22) для каждой секции с учетом изменения граничных условий в течение рабочего сезона – активного периода работы ДТ в разрезе года.

Были установлены расчетные соотношения по определению длин участков контакта соседних секций ДДТ с учетом материала корпуса ДТ, количества и последовательности соединяемых секций.

Разработаны технические и конструктивные решения по вариантам соединения отдельных секций ДДТ, имеющих как цилиндрические (трубчатые) корпуса ДТ, так и корпуса других профилей.

Исследования показали, что более эффективным инновационным техническим решением является применение в составном ДДТ в качестве отдельных секций уже апробированных многие годы и широко применяемых в строительной практике ТС типа ТМД-5(5М). Эти ДТ обладают высокой хладопроизводительностью, практическим отсутствием температурного градиента по длине и другими высокими теплофизическими характеристиками; изготавливаются из специальных алюминиевых сплавов и имеют

корпус «омега»-образного профиля, что очень важно для эффективного сопряжения поверхности контактов двух смежных термосифонов (рис.6). В процессе исследований для корпусов с профилем «цилиндр – полка» («омега»-образный профиль) была разработана и испытана конструкция соединительных узлов, обеспечивающих перепад температуры на контакте секций не более 0,2°C.

В результате комплексных исследований и испытаний была разработана и создана конструкция составного ДДТ марки ДОУ-1 двух моделей: ДОУ – 1Г (рисунок 6) и ДОУ – 1В (рисунок 7). ДОУ-1 состоит из нескольких испарительных и одной испарительно-конденсаторной секции. ДОУ-1 могут быть как прямолинейного типа (для вертикального применения на нефтяных и газовых скважинах, дамбах, плотинах), так и слабонаклонного типа с «Г»-образной испарительно-конденсаторной секцией (для горизонтального применения на площадных сооружениях).

Конструктив ДОУ-1 имеет ряд существенных преимуществ. Полная заводская готовность секций (ДТ) гарантирует высокое качество применяемого оборудования в отличие от нашедшего иногда применение охлаждающего оборудования, изготовляемого и заправляемого на месте монтажа при любой погоде, что не может не отразиться на его качестве и надежности, а также времени и стоимости монтажа. Следующее преимущество – многосекционность. Каждая секция может быть длиной до 8 – 9 м. Вес секций, учитывая материал корпуса, не превышает 10 кг.

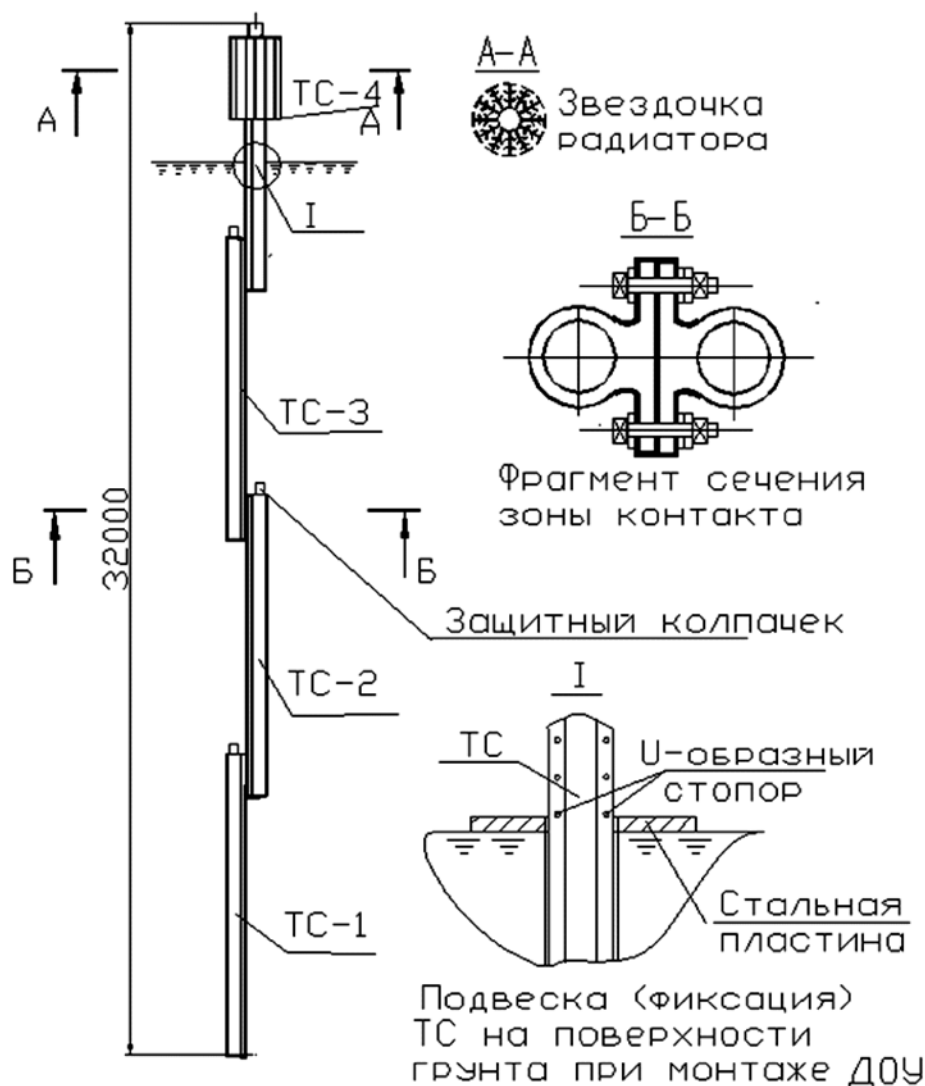


рисунок 7. Длинномерное охлаждающее устройство ДОУ-1В (вертикальной модификации)

Расширяются возможности применения термостабилизации грунтов оснований объектов практически любой высоты (глубины) до 50 м и площади до 90 м шириной (на сегодняшний день).

Расширяются возможности и снимаются проблемы транспортировки и монтажа ДОУ-1 любой длины, ибо секции собираются на месте быстро и последовательно, нет необходимости в специальной (подъемной) технике. Все это минимизирует время, трудоемкость и стоимость монтажа.

1. Баясан Р.М., Березин А.В., Коротченко А.Г., Лобанов А.Д. Стендовые испытания термостабилизатора круглогодичного действия // Потенциал. – 2001. – №3. – С. 47 – 49.
2. Баясан Р.М., Коротченко А.Г., Пустовойт Г.П. Вероятность, детерминизм и новая техника в проблеме устойчивости вечномёрзлых оснований. // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2002. №5. С. 26 – 31.
3. Возведение фундаментов типа «полы по грунту» на засоленных грунтах Бованенковского НГКМ / Р.М. Баясан, А.А. Иванов, С.И. Голубин // Инженерная геология. 2010, №1 стр. 40 – 44.
4. Применение инновационных технологий и технических средств термостабилизации на засоленных грунтах Бованенковского НГКМ полуострова Ямал / Баясан Р.М., Баясан Т.В., Голубин С.И., Лялин А.В., Пустовойт Г.П. // Материалы Четвертой конференции геокриологов России. Т.3. – МГУ, 2011 г., с. 266 – 273.
5. Application of two-phase heat pipes with thermo-module cooling of condensation zone for stabilization of soils in cold regions. // Heat pipes, heat pumps, refrigerators. Proc. of V Minsk Int. Seminar 8-11 September 2003. – Minsk: National Academy of Sciences. 2003. P. 157 – 160. R.M. Bayasan, A.G. Korotchenko, E.V. Leontiev, G.P. Pustovoyt, A.D. Lobanov, A.L. Lyazgin.
6. Technique for Thermal Stabilization of Soils at Bases of Structures in Permafrost Regions // Journal of Glaciology and Geocryology. Vol.26. Supplement. Aug. 2004. P. 201 – 206. R.M. Bayasan, A.G. Korotchenko, A.D. Lobanov, G.P. Pustovoyt.

ВЫВОДЫ



Наличие эффективных ТС малого диаметра 2-го поколения различных типов и назначения, созданных на основе ДТ, существенно расширяет возможности проектировщиков и строителей по возведению устойчивых и надежных промышленных и гражданских объектов в криолитозоне с применением технологии и технических средств активной термостабилизации ММГ оснований и фундаментов. ТС второго поколения уже многие годы успешно эксплуатируются на объектах ОАО «Газпром», РАО ЕЭС, ОАО «РЖД» и др. в Западной и Восточной Сибири, республике Саха, на Ямале и Чукотке.

При выборе технологии, технических средств инженерной защиты грунтов оснований сооружений в криолитозоне и принятии соответствующих управленческих решений необходимо использовать: базы данных по техносферной и геосферной подсистемам; методы математического моделирования теплового взаимодействия в геотехнической системе «грунты оснований – инженерные сооружения – окружающая среда»; краткосрочный и долгосрочный прогнозы; набор технических и конструктивных решений для реализации выбранной технологии; базу нормативной документации; технико-экономическую оценку предлагаемых технических решений и мероприятий.