

БАЯСАН Р.М.*Генеральный директор АОЗТ «Интер Хит Пайп»***ГОЛУБИН С.И.***И.о. начальника лаборатории нормативно-технического обеспечения проектирования и строительства линейных и площадных сооружений магистральных и промысловых газонефтепроводов Инжинирингового центра ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва, S_Golubin@vniigaz.gazprom.ru***BAYASAN R.M.***The general director of the «Inter Heat Pipe» CJSC, Moscow***GOLUBIN S.I.***The acting head of the laboratory of normative-technical engineering support of line and areal structures of trunk and field oil and gas pipelines of the Engineering Center of the «Gazprom VNIIGAZ» OJSC, Moscow, S_Golubin@vniigaz.gazprom.ru*

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ И ПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ

TECHNOLOGY AND TECHNIQUE OF PERMAFROST FOUNDATION SOIL THERMOSTABILIZATION OF TRUNK AND FIELD PIPELINES

Ключевые слова: магистральные и промысловые газопроводы; криолитозона; геокриологические процессы; инженерная защита; термостабилизация; многолетнемерзлые грунты оснований; технология; технические средства.

Key words: trunk and field gas pipelines; cryolithozone; permafrost processes; engineering protection; thermal stabilization; permafrost foundation soils; technology; technique.

Аннотация: в статье рассматривается опыт использования технологии и технических средств активной термостабилизации мерзлых грунтов вдоль трасс нефте- и газопроводов в криолитозоне. Дается техническая характеристика применяемых для этого устройств, описываются их возможности. Приводятся рекомендации, которые могут быть полезными при строительстве трубопроводов.

Abstract: the authors consider the experience of using the technology and technique of active permafrost soil thermostabilization along oil and gas pipelines, give technical specifications of the applied facilities, describe their possibilities, make recommendations that can be useful for constructing pipelines.

Введение

Освоение северных нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений, строительство систем магистральных трубопроводов и других объектов развитой инфраструктуры осуществлялось и осуществляется в основном по I принципу строительства с сохранением грунтов оснований в мерзлом состоянии. Ввиду значительной протяженности месторождений и трубопроводов с севера на юг геокриологическое строение грунтов территорий освоения крайне неоднородно. Одни сооружения располагаются в пределах островного и массивно-островного распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) с температурами от минус 0,1°C до минус 3,0°C, а другие — в зоне сплошного распространения ММГ с достаточно низкими отрицательными температурами (до минус 5°C).

Изменение геокриологических условий грунтов оснований объектов как в процессе строительства, так и в период эксплуатации оказывает существенное воздействие на стабильность оснований и фундаментов и, соответственно, на устойчивость самих сооружений. Развитие негативных инженерно-геокриологических процессов, в том числе пучения, термокарста, осадки при оттаивании мерзлых грунтов и др. начинается даже при незначительных изменениях установившегося теплового баланса в геотехнической системе «атмосфера — сооружение — ММГ».

В процессе многолетних обследований были зафиксированы многочисленные случаи деформаций и подвижек фундаментов различных сооружений вследствие как ошибок, допущенных при проектировании, отклонений от проектных решений при строительстве, так и техногенного влияния в процессе эксплуатации этих объектов на грунты оснований. Режимные наблюдения за температурой грунтов и сопоставление их состояния с прежним по материалам инженерно-геологических изысканий прошлых лет позволили в ряде случаев выявить изменения их температурных режимов и глубин сезонного промерзания (оттаивания), что и определило причины деформаций сооружений.

Наряду с оттаиванием вмещающих свайные фундаменты ММГ, сопровождаемым осадкой свай, наиболее распространенным типом деформаций оснований является сезонное и многолетнее выпучивание свай под воздействием сил морозного пучения, возни-

кающих в слое сезонного промерзания-оттаивания. Так, например, на месторождении «Медвежье» многолетнее выпучивание свай составило 150–180 мм, а на ЛЭП в районе города Новый Уренгой оно достигло тысяч миллиметров.

Северные районы Тюменской области и территория полуострова Ямал характеризуются сложными климатическими, инженерно-геологическими, геокриологическими и гидрологическими условиями. Грунты оснований здесь представлены преимущественно суглинками, глинами и органическими грунтами. Широко встречаются ледовые льды и грунты с морским типом засоления. В самой верхней части минеральные грунты являются преимущественно пылеватыми и относятся к категории пучинистых и сильно пучинистых. Среднегодовая температура грунтов меняется от минус 5°C до близкой к 0°C.

Цель настоящей статьи — дать обзор применения технологии и технических средств термостабилизации многолетнемерзлых грунтов на объектах нефтегазового комплекса в историческом аспекте и в настоящее время.

Необходимость реализации специальных проектов по термостабилизации грунтов

Анализируя опыт эксплуатации, а также результаты различных моделирований, можно сделать выводы о том, что жесткости трубопроводов не хватает для сопротивления нагрузкам, возникающим, например, при их всплывании и выпучивании в результате активизации негативных геокриологических процессов [3]. Последние, в свою очередь, развиваются в результате термомеханического воздействия подземного газопровода на мерзлые грунты оснований [4].

Наиболее негативное и интенсивное влияние на подземные трубопроводы оказывает процесс криогенного пучения грунтов.

При проектировании магистральных газопроводов (МГ) нормы и правила напрямую не учитывают дополнительные продольные деформации, которые зачастую возникают при прокладке и эксплуатации МГ в криолитозоне. В частности, в СНиП 2.05.06-85* [6] определение продольных напряжений производится без учета продольных и поперечных перемещений, связанных с осадками и пучением мерзлого грунта. В процессе эксплуатации газопровода реализуются нерав-

номерные деформации, которые невозможно напрямую учесть при проектировании.

Для защиты линейной части трубопровода от сил морозного пучения при прокладке в зоне распространения ММГ возможно применение как пассивного способа инженерной (тепловой) защиты (теплоизоляции наружной поверхности труб такими материалами, как пенополиуретан, пеноплекс и т.п.), так и технических средств активной термостабилизации, а также комбинации использования теплоизоляционных экранов и термостабилизаторов.

Согласно СНиП 2.02.04-88 [5] при использовании ММГ в качестве оснований сооружений по принципу I для сохранения мерзлого состояния грунтов необходимо предусматривать установку сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ) жидкостного или парожидкостного типов на основании теплотехнических расчетов с учетом конструктивных и технологических особенностей сооружения, опыта местного строительства и экономической целесообразности. Из вышеуказанного следует, что для засоленных грунтов необходимо использование технологии и средств термостабилизации. При этом обоснование их применения должно опираться на специальные теплотехнические расчеты (не предусмотренные самим СНиП). Также согласно СНиП 3.02.01-87 [7] и СП 50-101-2004 [8] работы по термостабилизации следует производить по специально разработанному проекту на основе статических и теплотехнических расчетов.

Исторический обзор применения термостабилизации грунтов в нефтегазовом комплексе

В первой половине 70-х годов прошлого века в связи с широкомасштабным освоением месторождений природного газа на севере Тюменской области, строительством северных магистральных газопроводов и объектов инфраструктуры в институте ВНИИГАЗ были начаты исследования, посвященные тепловому воздействию объектов газотранспортных систем (ГТС) на грунты оснований в районах распространения вечной мерзлоты [9]. Соответственно, получили развитие исследования методов и средств инженерной защиты от негативных инженерно-геологических, гидрологических и геокриологических явлений и процессов, проявляю-

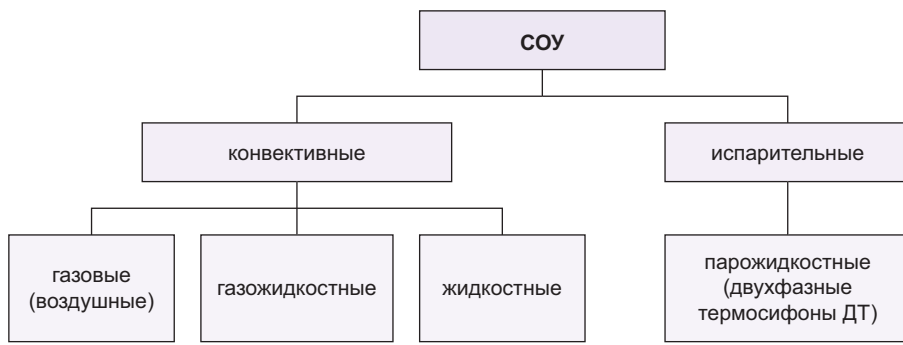


Рис. 1. Типы охлаждающих установок сезонного действия

щихся и развивающихся при строительстве и эксплуатации сооружений в криолитозоне.

На стендах и в натурных условиях проводились многолетние циклы экспериментальных исследований теплового и термомеханического взаимодействия «теплых» и «горячих» трубопроводов большого диаметра (1420 мм) с вмещающими их многолетнемерзлыми грунтами. В качестве средств пассивной инженерной защиты испытывались теплоизоляционные экраны различных типов и определялась их эффективность. Многолетний цикл натурных испытаний прошли также такие технические средства активной инженерной защиты, как охлаждающие термоустановки (ОТ). Исследовались как взаимодействие ОТ в системе «ММГ — трубопровод — теплоизоляция — термоустановка — атмосфера», так и сравнительная эффективность охлаждения грунта термоустановками различных типов и конструкций (всего 16 шт.).

С середины 1970-х годов в институте ВНИИГАЗ руководителем работ по разработке, исследованиям и внедрению технологий и технических средств инженерной защиты и термостабилизации ММГ в основаниях объектов обустройства северных месторождений и ГТС являлся один из авторов данной публикации Р.М. Баясан.

В начале 1980-х годов ВНИИГАЗ приступил к разработке и освоению серийного производства ОТ парожидкостного (двухфазного) типа, причем разноцелевого назначения. В 1981 году в обиход был введен технический термин (понятие) «термостабилизатор» (ТС) [2].

С 1990 года был начат переход на широкое применение двухфазных ТС малого диаметра (42–56 мм). Опытным заводом ВНИИГАЗа была выпущена опытная партия термостабилизаторов нового поколения — ТС вер-

тикального (ТМД-1) и слабонаклонного (1,5° к горизонту) (ТСН-1 и ТСН-2) типов.

В 1992 году были разработаны и начали производиться термостабилизаторы малого диаметра второго поколения. Переходу выпускаемых ТС на новый качественный уровень — появлению двухфазных термосифонов (ДТ) разных типов — способствовало создание в конце 1990 года научно-производственного центра «Хит Пайп», учредителем которого был ВНИИГАЗ, а в 1992 году — фирмы «Интер Хит Пайп», одним из учредителей которой была компания «Межреспубликанская научная ассоциация “Тепловые трубы”» (МНАТТ). Благодаря совместным усилиям удалось создать инновационные разработки на базе высоких технологий, освоить их производство и внедрить их использование на практике.

С 1992–1993 годов фирмой «Интер Хит Пайп» были созданы и внедрены в производство 12 конструкций термостабилизаторов — вертикального, наклонного, слабонаклонного типов и с гибкой связью (сезонного действия: ТМД-4, ТМД-4М, ТМД-5, ТМД-5М, ТМД-Р, ТСГ-6, ТСГ-8АС, ТН и ТГС; круглогодичного действия: ТТМ-1) и составные длинномерные (ДОУ-1 и ДОУ-1Р).

Анализ проектных решений по температурной стабилизации мерзлых грунтов и опыт применения СОУ подтвердили актуальность и перспективность разработки новых технических средств термостабилизации, технологии и нормативной документации по их применению.

Обоснование необходимости и способа применения, а также выбор всех конструктивных и теплотехнических параметров ОТ для термостабилизации грунтов основывается на специальных теплотехнических и теплофизических расчетах.

В настоящей работе описана технология активной термостабилизации грунтов, дана классификация охлаждающих термоустановок, приведены принципы их работы, обоснован выбор для реализации этой цели двухфазных термосифонов.

Активная термостабилизация грунтов использует технические средства, осуществляющие теплообмен непосредственно с грунтами, расположенными на различных глубинах. Среди них наиболее известны и распространены сезоннодействующие охлаждающие устройства. Причем самыми продуктивными и эффективными (по тепловой мощности, темпу и степени охлаждения) являются двухфазные (парожидкостные) термосифоны.

Физические основы применения СОУ и их классификация

Физической основой использования СОУ в качестве термостабилизаторов для инженерной защиты сооружений в криолитозоне является зависимость свойств дисперсных пород 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 как от возводимых сооружений, так и возникающих вследствие нарушений естественного режима тепло- и влагообмена. Эти физические эффекты реализуются, в частности, при создании с помощью термостабилизаторов мерзлотных завес, грунтовых дамб и плотин с мерзлым ядром, мерзлых «чехлов» в приустьевых зонах добывающих скважин и т.д. Термостабилизация весьма эффективна и как средство защиты от морозного пучения. Кроме того, термостабилизация грунтов посредством СОУ является мощным средством нейтрализации негативного влияния случайной изменчивости климатических факторов на устойчивость сооружений. Экономический эффект от применения сезоннодействующих охлаждающих устройств может многократно превышать их собственную стоимость. Никакие пассивные средства (теплоизоляционные покрытия и экраны, вентилируемые подполья, подсыпки и пр.) не могут дать такого эффекта.

На рисунке 1 приведена классификация СОУ-термостабилизаторов (рис. 1). В зависимости от используемых теплоносителей (хладагентов) существует четыре типа охлаждающих устройств: газовые (воздушные), жидкостные, парожидкостные (двухфазные) и газожидкостные. По принципам работы их делят на испарительные (двухфазные) и конвективные (газовые, жидкостные и газожидкостные).

Однофазные (конвективные) термосифоны не получили широкого применения, что обусловлено их малой теплопередающей способностью.

В парожидкостных термостабилизаторах (двухфазных термосифонах) конвекция низкокипящего рабочего хладагента, находящегося в двухфазном состоянии, сопровождается процессами испарения в нижней (грунтовой) и конденсации в верхней (воздушной) части устройства. Они обладают очень высокой теплопередающей способностью (на порядок большей, чем однофазные СОУ), быстрым темпом вмораживания, изотермичностью по длине термостабилизатора, большой хладопроизводительностью, высокой эффективностью охлаждения, удобством транспортировки и монтажа и другими преимуществами. Глубина промораживания грунта может достигать десятков метров. Такие термостабилизаторы не требуют большого диаметра труб, для их заполнения расходует незначительное количество хладагента. Парожидкостные устройства могут выполняться в полной заводской готовности. Область их применения значительно обширнее, чем у жидкостных и других типов СОУ.

По сути, ДТ — это автономные теплопередающие устройства с фазовым превращением промежуточного теплоносителя (хладагента), работа которых основана на использовании в качестве побудителя движения находящейся в них жидкости гравитационных сил. Именно это обстоятельство и определяет относительную простоту таких технических устройств, большие объемы и области их практического применения, а также разнообразие решаемых с их помощью задач.

Замкнутый (закрытый) двухфазный термосифон (ЗДТ) представляет собой герметично закрытую трубу, полость которой частично заполняется теплоносителем. В полости ЗДТ происходят термодинамические процессы, совершается парорезфрижераторный цикл: кипение (испарение), в результате которого образуются две фа-

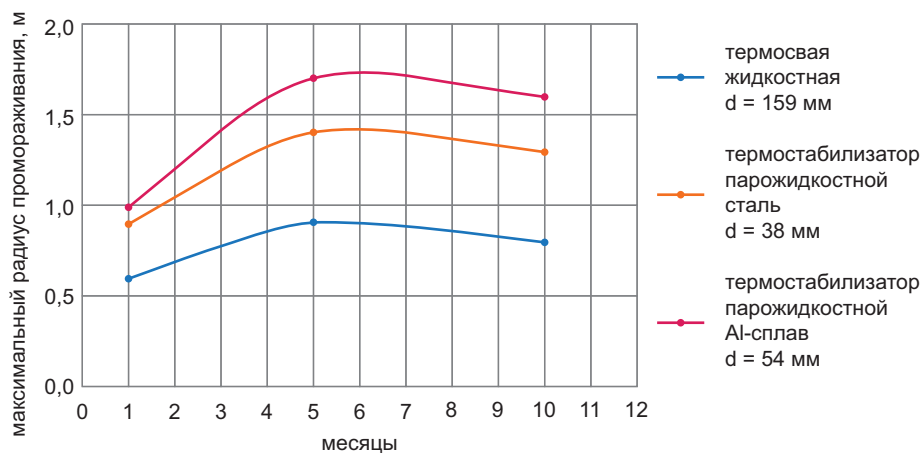


Рис. 2. Графики максимальных радиусов промораживания грунта в зависимости от времени при использовании СОУ различных типов

зы (паровая и жидкая), конденсация и свободно-конвективный теплоперенос между участками кипения и конденсации термосифона. Все термостабилизаторы являются вакуумированными ЗДТ.

Работают двухфазные термосифоны 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 окружающей испаритель ДТ среды (грунта или воды). Пар, поднимаясь вверх, конденсируется на стенке корпуса на участке надземного радиатора, конденсат стекает вниз в виде пленки. При этом атмосферный холод передается через пленку конденсата и стенку корпуса в грунт. Затем термодинамический цикл повторяется. Процессы теплопереноса в ДТ

протекают непрерывно, и это обеспечивает эффективную теплопередачу от одной среды к другой.

«Зимний» период (октябрь–апрель) работы двухфазных термосифонов называется активным, а «летний» (май–сентябрь), когда они термодинамически «запираются» (не функционируют), — пассивным.

В настоящее время известны различные варианты ДТ, различающихся по конструктивному исполнению, способу циркуляции рабочего теплоносителя (хладагента), условиям применения и типу теплоносителя.

Сегодня в качестве хладагента в представленных двухфазных термосифонах используются в основном аммиак и хладон. Выбор хладагента и его количество определяются с учетом необходимых термодинамических характеристик термостабилизатора, требований санитарных норм и

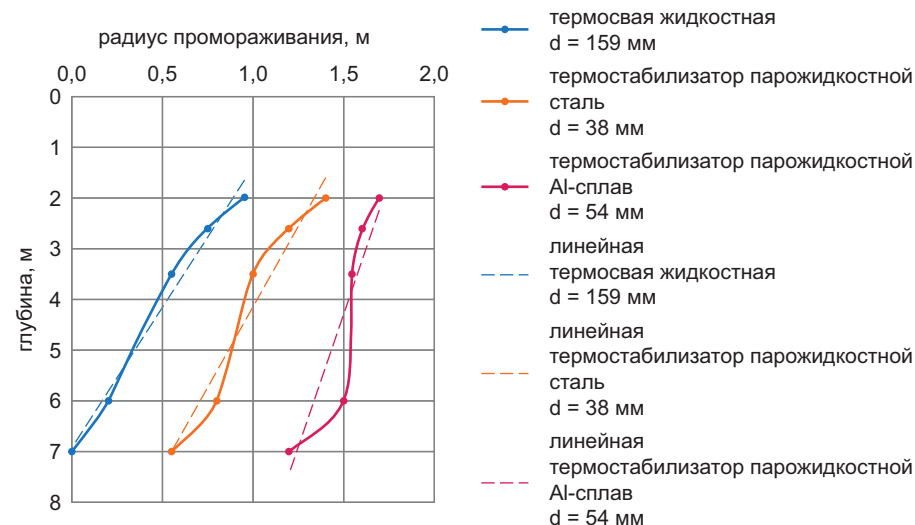


Рис. 3. Графики радиусов промораживания суглинистого грунта в зависимости от глубины при использовании СОУ различных типов. Прямыми линиями показаны соответствующие графики линейной регрессии

Несущая способность сваи d426 мм длиной 10 м в охлажденном различными типами СОУ массиве засоленного грунта, рассчитанная по СНиП 2.02.04-88

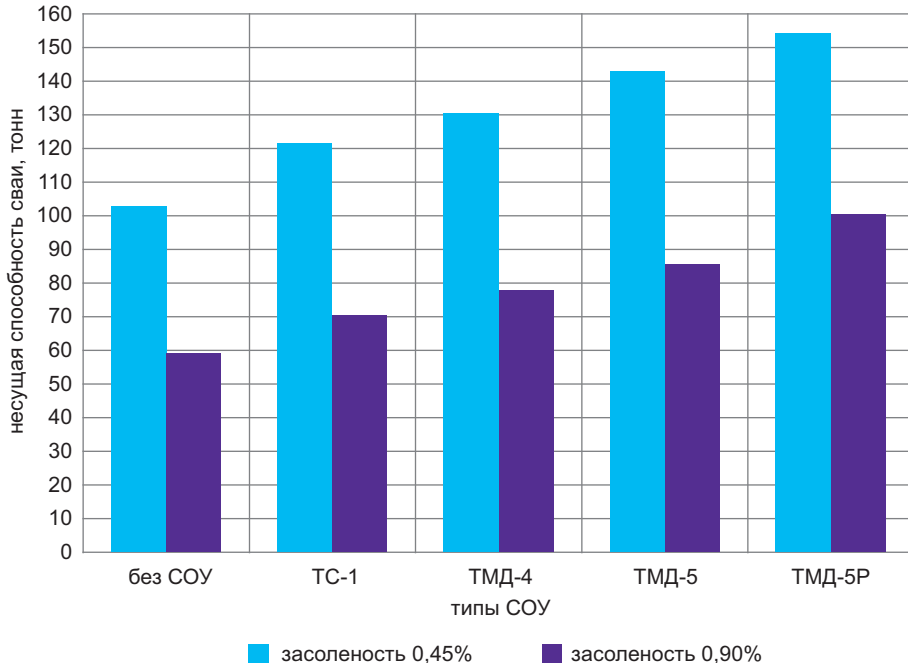


Рис. 4. Несущая способность сваи при использовании СОУ различных типов



Рис. 5. Выпученный магистральный газопровод Ямбург — Ныда (2005 год) и сохранившая устойчивость вдольтрассовая высоковольтная линия (10 кВ), установленная на термостабилизаторах-пасынках ТСГ-1П в 1986 году (19 лет эксплуатации)



Рис. 6. Термостабилизаторы типа ТМД-4 на опорах надземного газопровода

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 в результате к снижению эффективности (хладопроизводительности) термостабилизатора уже после первых нескольких лет эксплуатации. Соблюдение определенной технологии изготовления ДТ имеет большое значение.

Основными преимуществами двухфазных термостабилизаторов малого диаметра перед однофазными (в основном жидкостными) являются:

- малые диаметры (42–56 мм);
- более низкие внутренние и наружные термические сопротивления;
- весьма малый температурный градиент по длине СОУ;
- более высокие темп замораживания и эффективность охлаждения;
- существенно более короткое время самозапуска, то есть выхода на рабочий режим;
- большее время активного функционирования, ибо для самозапуска в работу требуется существенно меньший перепад температур между окружающим СОУ массивом грунта и атмосферой;
- меньшая металлоемкость;
- существенно (в 50–100 раз) меньшее количество теплоносителя (хладагента), расходуемого при заправке (заполнении) СОУ;
- меньшая стоимость;
- удобство транспортировки, монтажа и демонтажа ввиду малого веса.

Экспериментальные исследования и сравнительные теплотехнические расчеты температурных полей грунта при его замораживании с помощью СОУ различных типов (жидкостных однотрубных СОУ типа ТС-1 диаметром 159 мм; ДТ типа ТМД-4 диаметром 40 мм; ДТ типа ТМД-5 с эквивалентным диаметром 54 мм) показали, что хладопроизводительность и радиусы замораживания грунта на конец активного и конец пассивного периода первого года работы у двухфазных термосифонов во много раз больше (рис. 2). Кроме того, замороженный массив (грунта или воды) у ДТ имеет практически форму цилиндра, а у жидкостного ТС-1 — форму усеченного конуса с основанием меньшего диаметра в нижней его части (рис. 3).

Применение двухфазных термостабилизаторов позволяет существенно

увеличить несущую способность свай в засоленных грунтах (до 1,5–1,7 раза для наиболее эффективных ДТ). На рисунке 4 для наглядности и большей информативности представлены результаты расчетов (по СНиП 2.02.04-88 [5]) несущей способности сваи диаметром 426 мм и длиной 10 м в массиве засоленного грунта, охлажденном различными типами СОУ.

На рисунках 5, 6, 7 приведены примеры практического применения двухфазных термосифонов различного типа. ДТ изготавливаются из различных углеродистых, нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов.

Заключение

В последние 20–30 лет в России при проектировании, строительстве, эксплуатации и ремонте сооружений в криолитозоне нашла широкое применение технология термостабилизации мерзлых грунтов оснований и фундаментов как наиболее эффективный активный метод инженерной защиты ММГ от деградации. Термостабилизаторы типа ТСГ-1, ТСГ-4, ТСГ-1П, ТМД-4, ТМД-5, ТМД-5М, ТСГ-6, ТГС, ДОУ-1, разработанные и изготавливаемые до 1991 года в институте ВНИИГАЗ, а затем в АОЗТ «Интер Хит Пайп», многие годы успешно эксплуатируются на объектах ОАО «Газпром», ОАО РЖД, энергетических компаний и других объектах промышленного и гражданского назначения в Западной и Восточной Сибири, Республике Саха (Якутия), вдоль трассы Байкало-Амурской магистрали и на Чукотке.

На сегодняшний день технология термостабилизации мерзлых грунтов оснований и фундаментов как активный метод инженерной защиты широко применяется на объектах нефтегазового комплекса. Результаты комплекса исследований и испытаний позволяют оптимизировать проектные технические решения по выбору материала и хладагента термостабилизаторов, их конструктивным особенностям и параметрам, технологии изготовления.

Для оценки эффективности работы ДТ следует использовать следующие характеристики: 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 темпера-



Рис. 7. Устройство горизонтальных термостабилизаторов типа ДОУ-1 при строительстве здания с полами по грунту на Бованенковском НГКМ

туры по длине ДТ; коэффициент эффективности охлаждения. Все это учитывается при разработке и изготовлении термостабилизаторов конструкций «Интер Хит Пайп». По своим технико-экономическим параметрам они превосходят известные отечественные и зарубежные аналоги.

Таким образом, для решения задач активной термостабилизации грунтовых и свайных оснований объектов, сооружаемых в районах распространения ММГ, можно рекомендовать использование только термостабилизаторов, изготавливаемых на основе двухфазных термосифонов.

Список литературы

1. Баясан Р.М., Баясан Т.В., Пустовойт Г.П., Голубин С.И., Цеева А.Н. Инновационные технические решения по термостабилизации многолетнемерзлых пород при строительстве в криолитозоне // Материалы 9-го Международного симпозиума «Проблемы инженерного мерзлотоведения», 3–7 сентября 2011 г., г. Мирный, Россия. С. 225–230.
2. Велиулин И.И., Тимофеев А.Л., Баясан Р.М., Решетников А.Д. Комплексная диагностика технического состояния магистральных газопроводов с использованием вертолетного обследования // Материалы 2-й Международной конференции «Обслуживание и ремонт газопроводов». Вып. 2. М.: ООО «Геоинформмарк», 2005. С. 114–118.
3. Голубин С.И. Математическое моделирование теплового взаимодействия подземного газопровода с многолетнемерзлыми грунтами полуострова Ямал // Инженерная геология. 2009. № 4. С. 20–27.
4. Голубин С.И., Великоднев В.Я., Каленский В.С. Тепловое и механическое взаимодействие подземного газопровода с многолетнемерзлыми грунтами и методы геотехнического мониторинга // Инженерные изыскания. 2011. № 9. С. 54–60.
5. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. М.: Госстрой СССР, 1988.
6. СНиП 2.05.06-85*. Магистральные трубопроводы. М.: Минстрой России, 1996.
7. СНиП 3.02.01-87. Земляные сооружения, основания и фундаменты. М.: Госстрой СССР, 1987.
8. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. М.: Госстрой России, 2004.
9. Bayasan R.M., Bayasan T.V., Lobanov A.D., Pustovoit G.P. The experience of thermal stabilization technology application for engineering protection of bases of structures in permafrost regions // Материалы международной научной конференции МАИГ «Инженерная защита территории и безопасность населения: роль и задачи геоэкологии, инженерной геологии и изысканий», 6–8 сентября 2011 г., г. Москва. С. 58.
10. Bayasan R.M., Korotchenko A.G., Lobanov A.D., Pustovoit G.P. Technique for thermal stabilization of soils at bases of structures in permafrost regions // Journal of Glaciology and Geocryology. 2004. V. 26 (Suppl.). P. 201–206.