

БАЯСАН Р.М.*Генеральный директор АОЗТ «Интер Хит Пайп»***ЛОБАНОВ А.Д.***Заместитель генерального директора АОЗТ «Интер Хит Пайп»***БАЯСАН Т.В.***Главный специалист 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***LOBANOV A.D.***The deputy director of the «Inter Heat Pipe» CJSC, Moscow***BAYASAN T.V.***A chief specialist 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*

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДВУХФАЗНЫХ ТЕРМОСИФОНОВ ДЛЯ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE OPERATING EFFICIENCY OF TWO-PHASE THERMOSIPHONS FOR SOIL THERMAL STABILIZATION IN THE CRYOLITHOZONE

Ключевые слова: магистральные и промысловые газопроводы; криолитозона; геокриологические процессы; инженерная защита; термостабилизация; термостабилизаторы; двухфазные термосифоны.

Аннотация: в первой половине 70-х годов прошлого века в институте ВНИИГАЗ были начаты исследования, посвященные тепловому воздействию объектов газотранспортных систем на грунты оснований в криолитозоне. На сегодняшний день одним из наиболее применяемых и эффективных методов инженерной защиты магистральных трубопроводов и обеспечения несущей способности фундаментов зданий и сооружений в многолетнемерзлых грунтах является активная термостабилизация грунтов оснований. В данной статье приведена классификация основных типов существующих термостабилизаторов, рассмотрены их конструктивные особенности, а также физические основы применения двухфазных термосифонов в указанных целях. Проведен сравнительный анализ эффективности их работы.

Key words: trunk and field gas pipelines; cryolithozone; permafrost processes; engineering protection; thermal stabilization; thermal stabilizer; two-phase thermal thermosiphons.

Abstract: in the first half of the 70th of the last century the VNIIGAZ institute began to conduct researches on thermal effects of gas-transport system objects on permafrost foundation soils. Today one of the most commonly used and effective methods of trunk pipeline engineering protection and foundation bearing capacity ensuring of buildings and structures in permafrost soils is active thermal stabilization of soil foundations. This paper presents a classification of the main types of existing thermal stabilizers, considers their design features and the basic physics of using two-phase thermal thermosiphons for the mentioned purposes. Comparative analysis of their work is carried out.

Введение

На сегодняшний день при строительстве, проектировании и эксплуатации объектов нефтегазового комплекса, а также других зданий и сооружений в криолитозоне для инженерной защиты от опасных геокриологических процессов и явлений, а также для обеспечения проектной несущей способности их фундаментов наибольшее применение нашли технология и технические средства активной термостабилизации грунтов. Данный метод инженерной защиты регламентируется следующими нормативными документами: СНиП 2.02.04-88; СНиП 3.02.01-87; СП 50-101-2004; СТО Газпром 2-2.1-390-2009, а также другими методическими рекомендациями и справочными пособиями. Однако выбор проектно-технического решения по термостабилизации многолетнемерзлых грунтов (ММГ) оснований сооружений основывается исключительно на технико-экономической целесообразности и прогнозных теплотехнических расчетах для конкретных инженерно-геокриологических условий площадки проектирования и строительства. Проектные решения должны основываться на решении оптимизационной задачи, включающей в себя выбор типа и модификации термостабилизаторов, оптимального шага расстановки и глубины их погружения, удобства и времени проведения строительно-монтажных работ в условиях тундры, а также надежности и долговечности эксплуатации данных устройств. Все это диктует особый подход при выборе того или иного типа термостабилизатора исходя из его эффективности, хладопроизводительности, конструктивных особенностей, а также долговечности и ресурса.

Целью настоящей статьи является сравнительный анализ эффективности работы двухфазных термосифонов.

Физические основы работы термостабилизаторов

В физической основе использования термостабилизаторов для инженерной защиты сооружений в криолитозоне лежит зависимость свойств дисперсных пород от температуры (температуры фазовых переходов — начала замерзания). При активном глубинном охлаждении грунтового массива прочностные свойства грунта (поведение при сжатии, сдвиге) многократно возрастают с понижением температуры, а сжимаемость и влагопроницаемость снижаются, что обуславливает значительное повышение его несущей спо-

собности и устойчивости к воздействию потоков тепла и влаги как от возводимых сооружений, так и вследствие нарушений естественного режима тепло- и влагообмена. Данные 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 эффективно применяется также как средство защиты от морозного пучения.

В научно-технической, нормативной и методической литературе широко встречается понятие «сезонное охлаждающее устройство» (СОУ); а до 80-х годов прошлого века охлаждающие термоустановки было принято называть по-разному: устройство для аккумуляции холода в основании сооружений, охлаждающая колонка, термосвая, криоанкер. В 1981 году институтом ВНИИГАЗ в процессе разработки и освоения серийного производства СОУ парожидкостного (двухфазного) типа разноцелевого назначения в обиход был впервые введен технический термин (понятие) «термостабилизатор грунта». На взгляд авторов, это понятие наилучшим образом соответствует прямому назначению подобных устройств — стабилизации температурного режима ММГ. В настоящее время в отраслевых стандартах применяется термин «термостабилизатор», а также термин «термостабилизация», обозначающий соответствующую технологию.

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

Однофазные (конвективные) СОУ не имеют сегодня широкого применения в силу малой теплопередающей способности и худших технико-экономических характеристик.

Парожидкостные термостабилизаторы — двухфазные термосифоны (ДТ) — обладают очень высокой теплопередающей способностью, быстрым темпом вмораживания, изотермичностью по своей длине, высокой эффективностью охлаждения, удобством транспортировки и монтажа, малыми металлоемкостью и весом. Термостабилизаторы (ТС) этого типа не требуют большого диаметра труб, для их заправки

расходуется незначительное количество хладагента, что согласуется с особыми экологическими нормами при работе в условиях тундры. За последние 25 лет ДТ нашли широкое применение в качестве ТС при строительстве и эксплуатации объектов промышленного и гражданского назначения в районах криолитозоны.

В физической основе использования двухфазных термосифонов (автономных теплопередающих устройств с фазовым превращением промежуточного теплоносителя, или хладагента) лежит использование для обеспечения движения находящейся в них жидкости гравитационной силы. ДТ представляет собой герметично закрытую трубу, полость которой частично заполняется теплоносителем. Отметим, что обычно все ТС являются вакуумированными закрытыми ДТ.

В полости двухфазного термосифона происходят термодинамические процессы, совершается парорефрижераторный цикл: кипение (испарение), в результате которого образуются две фазы (паровая и жидкая), конденсация и свободно-конвективный теплоперенос между участками кипения и конденсации. При этом принято выделять в ДТ три зоны — нагрева (испаритель), транспорта и конденсации (конденсатор), хотя деление это является несколько условным, так как перенос жидкости и пара происходит по всей полости термосифона.

Функционирует ДТ следующим образом: при подводе теплоты к испарителю теплоноситель (хладагент) начинает кипеть, образующийся пар движется (поднимается) в конденсатор и конденсируется на его внутренних стенках, отдавая при этом теплоту фазового перехода охлаждающей среде (например, холодному воздуху). Конденсат под действием гравитационных сил движется (опускается) в испаритель, отдавая при этом холод охлаждаемой среде (например, грунту). Процесс теплопереноса в двухфазном термосифоне протекает непрерывно, и это обеспечивает эффективную теплопередачу от одной среды к другой.

Эффективность работы термостабилизаторов и ее оценка

Эффективность (хладопроизводительность) термостабилизаторов, в том числе двухфазных термосифонов, определяется их тепловой мощностью и зависит в основном от общего термического сопротивления в системе «грунт — ТС — атмосфера». ДТ, применяемые

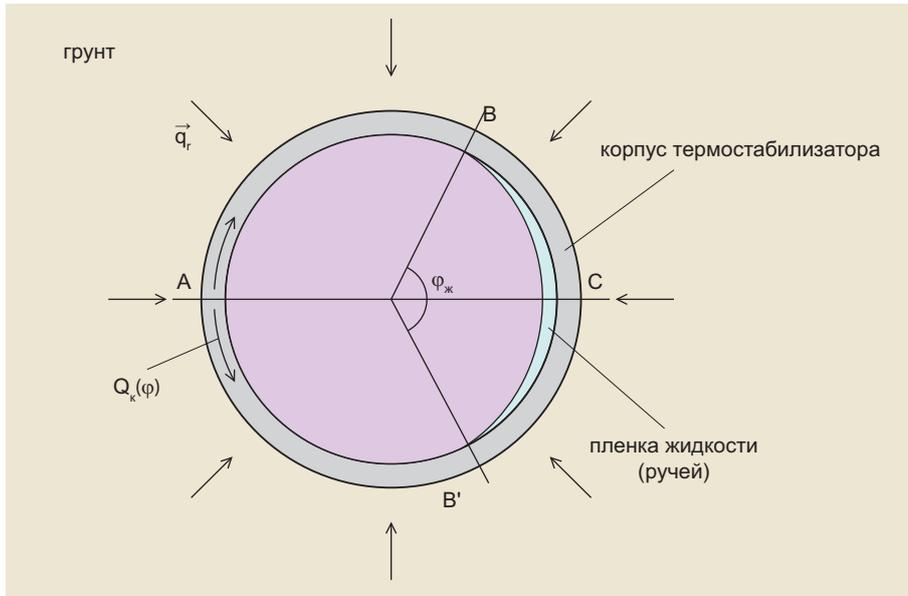


Рис. 1. Поперечное сечение зоны испарения термостабилизатора: $j_{ж}$ — центральный угол смоченной части периметра поперечного сечения корпуса ТС; $Q_k(\varphi)$ — тепловые потоки корпуса; q_r — тепловые потоки от грунта

для стабилизации температурного режима ММГ в основаниях сооружений в криолитозоне, имеют, как правило, протяженную (до 10 м и более) зону испарения (ЗИ) с относительно низкой плотностью теплового потока ($q \ll 0,1$ Вт/см²), что обусловлено термическим сопротивлением грунта.

В идеальном случае теплоноситель в ДТ, испарившийся в подземной зоне и сконденсировавшийся в надземном теплообменнике, стекает вниз в виде тонкой кольцевой пленки по всему внутреннему периметру корпуса двухфазного термосифона.

В реальной ситуации (при отсутствии внутренней капиллярной структуры ДТ) конденсат стекает в виде локального «ручья», что обуславливается отсутствием строгой осевой симметрии геометрических и тепловых параметров термосифона, а также всегда имеющимся (большим или меньшим) отклонением оси корпуса ДТ от вертикали

(после установки термостабилизатора в предварительно пробуренную скважину). В этом случае на части внутренней поверхности корпуса в зоне испарения образуется сухой участок, что может существенно влиять на теплотехнические характеристики гладкостенных (без капиллярной структуры) термостабилизаторов. Степень этого влияния зависит от того, из какого материала изготовлен корпус ДТ.

Решение о целесообразности и (или) необходимости применения того или иного типа двухфазного термосифона — гладкостенного или с размещенным в зоне испарения конструктивом с капиллярной структурой — принимается на основе аналитической оценки. Капиллярные структуры во втором случае выполняются по всей внутренней поверхности ЗИ корпуса ДТ в виде проволочных сеток, пружин, канавок и т.д.

Рассмотрим установленный в грунт гладкостенный ДТ. Поперечное сече-

ние его зоны испарения приведено на рис. 1. В общем случае при наличии «ручья» жидкости суммарное термическое сопротивление термостабилизатора $R_{ТС}$ в системе «грунт — ТС — атмосфера» можно приближенно представить в следующем виде:

$$R_{ТС} = R_{Г,ТС} + R_{СХ} + R_p + R_{Р,В}, \quad (1)$$

где $R_{Г,ТС}$ — термическое сопротивление грунта, вмещающего термостабилизатор, $R_{Г,ТС} = \ln(r_r/r_o) / (2\pi \cdot l_r \cdot L_{ЗИ})$; r_r, r_o — эффективные радиусы для грунта и корпуса ТС соответственно; $L_{ЗИ}$ — длина зоны испарения; l_r — теплопроводность грунта; $R_{СХ}$ — эффективное термическое сопротивление сухой части корпуса ТС в зоне испарения (участки АВ, АВ') с учетом распределения плотности теплового потока q от А к В (В'); R_p — термическое сопротивление ребер радиатора (надземного конденсатора); $R_{Р,В}$ — термическое сопротивление ТС на участке «радиатор — атмосферный воздух», $R_{Р,В} = 1/(\alpha F_p)$; α — средний коэффициент теплоотдачи от радиатора к воздуху; F_p — площадь ребер радиатора.

Рассмотрим типичные реальные случаи, когда «ручей» занимает малую часть ($\beta_{ж}$) периметра корпуса ТС, то есть $\beta_{ж} = j_{ж}/(2\pi) \ll 1$, и влияние «ручья» сводится в основном к появлению термического сопротивления в зоне испарения.

Положим, что при квазистационарном режиме охлаждения грунта в первом приближении величина теплового потока $q_r \approx \text{const}$ (в большинстве случаев такое допущение является оправданным). Учитывая, что $\lambda_r \ll \lambda_k$ (где λ_k — теплопроводность материала корпуса ТС), и при условии, что $\delta_k \ll r_o$ (где δ_k — толщина стенки корпуса ТС), участок АВ корпуса термостабилизатора (см. рис. 1) можно представить в виде плоской полоски (рис. 2). Определим термическое сопротивление и распределение температуры для такой полоски металла шириной a .

Тепловой поток Q через полоску:

$$Q = -\lambda_k(dT/dx) \cdot a \cdot \delta_k. \quad (2)$$

После дифференцирования:

$$dQ = -\lambda_k(d^2T/dx^2) \cdot a \cdot \delta_k \cdot dx = q_r \cdot a \cdot dx. \quad (3)$$

Отсюда получим дифференциальное уравнение для температуры $T(x)$:

$$d^2T/dx^2 = (-q_r/\lambda_k) \cdot \delta_k. \quad (4)$$

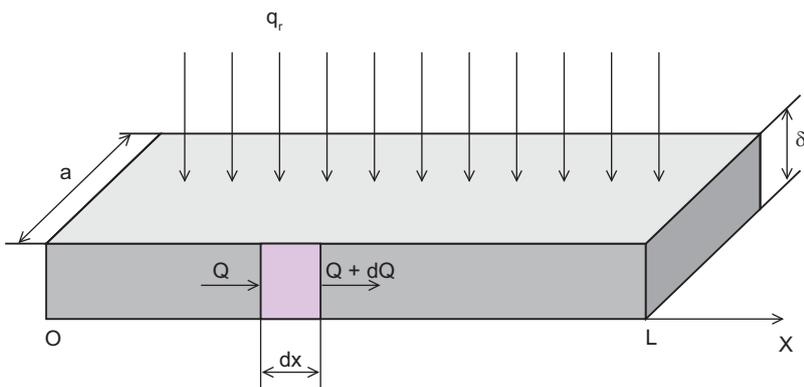


Рис. 2. «Развертка» участка АВ корпуса термостабилизатора

При граничных условиях:

$$T(0) = T_o; \quad dT/dx = 0 \quad \text{при } x = 0. \quad (5)$$

Решение дифференциального уравнения (4) имеет вид:

$$T(x) = T_o - x^2 \cdot q_r / (2\lambda_k \cdot \delta_k). \quad (6)$$

Учитывая, что $L = (1 - \beta_{ж}) \cdot \pi \cdot (d_n/2)$ (где d_n — наружный диаметр корпуса ТС; $\beta_{ж}$ — доля внутреннего периметра корпуса ТС, занятая ручьем, $\beta_{ж} = (j_{ж}/2) \cdot \pi$), получим выражение для расчета величины $R_{СХ}$:

$$R_{СХ} = (1 - \beta_{ж}) \cdot \pi \cdot d_n / (8 \cdot \lambda_k \cdot \delta_k \cdot L_{3И}). \quad (7)$$

Оценим влияние ручейкового режима течения жидкого конденсата на величину термического сопротивления гладкостенных ТС, изготовленных из различных материалов: углеродистой стали (Ст20), нержавеющей стали (1Х18Н9Т), алюминиевого сплава (АД31). Температурный диапазон примем от минус 15 до 0°C. В качестве теплоносителя используем аммиак.

Теплотехнические расчеты выполнялись при следующих значениях исходных параметров, принятых для всех трех ТС: $L_{3И} = 10$ м; $d_n = 0,05$ м; $\delta_k = 0,002$ м; $F_p = 2$ м²; $\lambda_r = 2$ Вт/м·К; $\alpha = 15$ Вт/м²·К; $\beta_{ж} = 0,075$; $r_r = 0,75$ м.

Как показали опытные данные и численные оценки (приближенные тепловые расчеты для стоков тепла от грунта к корпусам термостабилизаторов, изготовленных из различных материалов), для ТС из стали перепад температуры по периметру корпуса при $\beta_{ж} \ll 1$ (угол смачивания $j_{ж} = 20 \div 30^\circ$) становится одного порядка с радиальным перепадом температуры в грунте. Из этого следует, что величина r_o для термостабилизатора из стали уменьшается на порядок по сравнению с таковой для ТС из алюминиевого сплава. По результатам предварительных расчетов величины эффективного радиуса r_o для корпусов ТС принимались следующими: $0,5d_n$ — для корпуса из алюминиевого сплава; $0,05d_n$ — из углеродистой стали; $0,037d_n$ — из нержавеющей стали.

В целях упрощения расчетов для всех трех ТС были приняты одинаковые значения термических сопротивлений: $R_p = 0,002$ град/Вт; $R_{PB} = 0,033$ град/Вт.

Результаты расчета термических сопротивлений, входящих в выражение (1), для всех трех типов гладкостенных термостабилизаторов приведены в табл. 1.

Результаты расчета величин термического сопротивления для трех типов гладкостенных термостабилизаторов

Материал корпуса ТС	λ_k , Вт/м·К	$R_{ТС}$, град/Вт	$R_{СХ}$, град/Вт	$R_p + R_{PB}$, град/Вт	$R_{ТС}$, град/Вт
Ст20	57,0	0,046	0,016	0,035	0,097
1Х18Н9Т	16,8	0,048	0,054	0,035	0,137
АД31	188,0	0,027	0,005	0,035	0,067

Результаты оценки эффективности работы термостабилизатора и выводы

Как видно из табл. 1, при наличии «ручейкового» режима течения теплоносителя у стальных термостабилизаторов значительно возрастает термическое сопротивление участка «грунт — корпус ТС» и «сухой зоны» корпуса ТС, то есть зоны испарения. Для корпуса из алюминиевого сплава увеличение термического сопротивления этих участков на порядок меньше. Общее суммарное термическое сопротивление термостабилизатора из углеродистой и нержавеющей стали соответственно на 50 и 100% больше, чем у ТС из алюминиевого сплава.

Из приведенного анализа следует, что гладкостенные термостабилизаторы из стали имеют более плохие теплоте-

редающие характеристики, чем аналогичные ТС из алюминиевых сплавов.

В целях повышения эффективности двух типов ТС из стали при их изготовлении необходимо применять конструктив с капиллярной структурой.

Таким образом, при оценке эффективности работы двухфазных термосифонов следует руководствоваться следующими такими их основными характеристиками, как:

- внутреннее термическое сопротивление;
- наружное термическое сопротивление в зоне испарителя;
- термическое сопротивление зоны конденсации;
- время выхода на рабочий режим (время самозапуска);
- градиент температуры по длине ДТ.

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. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: Госстрой СССР, 1990.
3. СНиП 3.02.01-87. Земляные сооружения, основания и фундаменты. М.: Госстрой СССР, 1987.
4. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. М.: Госстрой России, 2004.
5. СТО Газпром 2-2.1-390-2009. Руководство по проектированию и применению сезонно-охлаждающих устройств для термостабилизации грунтов оснований фундаментов. М.: ОАО «Газпром», 2009.
6. 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 // Proceedings of the International Conference of International Association of Engineering geology «Environmental Geosciences and Engineering Survey for Territory Protection and Population Safety» («EngeoPro-2011»). Moscow, Russia, 6–8 September 2011. P. 58.
7. Bayasan R.M., Golubin S.I., Lobanov A.D., Bayasan T.V., Lobanov M.A., Pustovoit G.P. Development and using of long-length composite two-phase heat pipes // Proceedings of the 8th Minsk International Seminar «Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources». Minsk, Belarus, 12–15 September 2011.
8. Tseeva A.N., Bayasan R.M., Pustovoit G.P., Okoemova A.P. Increasing the bearing capacity of pile foundations by using thermostabilizers of small diameter in cryolithozone of Russia // Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost. Fairbanks, June 29 — July 3, 2008. Fairbanks, Alaska, USA: University of Alaska, 2008. V. 2. P. 1787–1792.