

ПРИМЕНЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ НА ЗАСОЛЕННЫХ ГРУНТАХ БОВАНЕНКОВСКОГО НГКМ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ

Р.М. Баясан¹, Т.В. Баясан¹, С.И. Голубин², А.В. Лялин¹, Г.П. Пустовойт³

¹АОЗТ «Интер Хит Пайп», Москва, Россия

²ООО «Газпром ВНИИГАЗ» Москва, Россия

³Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

При наличии в основаниях сооружений, возводимых в криолитозоне, сильно засоленных грунтов их охлаждения за счет вентилируемого подполья может быть недостаточно. Для обеспечения устойчивости и эксплуатационной надежности сооружений требуются технологии и технические средства термостабилизации грунтов оснований зданий. Ситуация значительно осложняется, когда необходимо возводить здание или сооружение без вентилируемого подполья. В настоящей работе представлены инновационные технические решения, разработанные для использования при проектировании фундаментов зданий и сооружений, возводимых на засоленных грунтах Бованенковского НГКМ полуострова Ямал.

THE INNOVATION TECHNIQUE AND TECHNOLOGY USING FOR THERMAL STABILIZATION OF SALINE SOILS AT BOVANENKOVO OIL AND GAS FIELD ON YAMAL PENINSULA

R.M. Bayasan¹, T.V. Bayasan¹, S.I. Golubin², A.V. Lyalin¹, G.P. Pustovoi³

¹«Inter Heat Pipe» Corp., Moscow, Russia

²«Gazprom VNIIGAZ» Institute, Moscow, Russia

³Geological Faculty of M.V. Lomonosov Moscow State University, Russia

When bases of buildings or engineering structures in permafrost region include strongly saline soils then their cooling by means of ventilated cellars may be not enough. The technique and technology for thermal stabilization of frozen grounds is necessary to protect structures from deformation and destruction. The situation becomes more complicated for buildings and structures that do not permit ventilated cellars because of technological features. The paper presents the innovation technique and technology of thermal stabilization developed by the authors for saline soils prevailing at Bovanenkovo oil and gas field on Yamal peninsula.

Одним из главных стратегических нефтегазоносных регионов России является полуостров Ямал. На полуострове Ямал и в прилегающих акваториях открыто 11 газовых и 15 нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ). Крупнейшими месторождениями являются: Бованенковское, Харасавэйское, Новопортовское, Крузенштернское, Северо-Тамбейское, Западно-Тамбейское, Тасийское и Малыгинское. Основным по запасам газа месторождением Ямала является Бованенковское НГКМ. В настоящее время ведется проектирование и строительство многониточной газотранспортной системы, связывающей полуостров Ямал и центральные районы России. Согласно СНиП 23-01-99 [1] Бованенковское НГКМ находится в климатическом районе I Г. Территория полуострова Ямал характеризуется очень суровыми условиями, обусловленными её высокоширотным расположением на крайнем северо-западе Западно-Сибирской плиты и влиянием арктических масс воздуха. Среднегодовая температура воздуха от -9 до -11°C , абсолютный минимум достигает $-55\dots-56^{\circ}\text{C}$, продолжительность периода с отрицательной среднемесячной температурой составляет 8–9 месяцев (метеостанции Тамбей и Сеяха).

Бованенковское НГКМ расположено на равнинной территории с незначительными уклонами поверхности. В геологическом строении по глубине

заложения свайных фундаментов отложения представлены техногенными насыпными, современными озерно-болотными и четвертичными верхнеплейстоценовыми морскими отложениями. Насыпные грунты сложены пылеватými песками; озерно-болотные отложения представлены среднеразложившимися торфами; морские отложения преимущественно состоят из сильнольдистых засоленных суглинков и глин.

По геокриологическим условиям территория Бованенковского НГКМ относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Среднегодовая температура грунтов составляет $-4,5...-5,0^{\circ}\text{C}$. Грунты являются преимущественно засоленными, что смещает температуру их фазовых переходов в сторону отрицательных температур. В районе месторождения распространены следующие негативные геокриологические процессы и явления: пучение грунтов, термокарст, заболачивание территории, солифлюкция, морозобойное растрескивание.

Для большинства зданий и сооружений наибольшую опасность представляют процессы термокарста и пучения грунтов основания. Явление термокарста связано в основном с техногенной тепловой нагрузкой от зданий и сооружений. В результате в их основаниях формируются термокарстовые провалы и озера, что приводит к деформациям и разрушениям фундаментов. Вторым по степени воздействия на фундаменты является процесс пучения грунтов. Грунты основания свайных фундаментов являются преимущественно сильнопучинистыми и чрезмерно пучинистыми. Действие касательных сил пучения приводит к выпучиванию свай и деформациям фундаментов, а нормальные силы пучения воздействуют на фундаменты типа «полы по грунту», что также приводит к их деформациям.

Главной инженерно-геологической особенностью Бованенковского НГКМ является наличие средне- и сильнозасоленных грунтов морского типа засоления. Существуют три основных типа засоления: морской (хлоридно-натриевое засоление); континентальный (комплексное хлоридно-сульфатно-карбонатное засоление) и техногенный. Согласно ГОСТ 25100-95 [2] по степени засоленности выделяются следующие критические значения засоления для континентального типа (табл. 1) и морского типа (табл. 2) засоления.

Для мерзлых засоленных грунтов морского типа засоления многими исследователями установлено значительное снижение расчетных прочностных характеристик по сравнению с данными приложения СНиП 2.02.04-88 [3]. Это подтверждается, в том числе, и натурными испытаниями свай, вмороженных в засоленные грунты (табл. 3) [4, 5]. Засоленные грунты характеризуются смещением температуры фазовых переходов в сторону отрицательных значений. Температура начала замерзания грунта смещается к диапазону $-1,0...-2,0^{\circ}\text{C}$. Данный фактор существенно влияет на несущую способность свайных оснований в сторону ее уменьшения.

При проектировании зданий типа «теплые стоянки» на Бованенковском НГКМ основной задачей стало обеспечение удобного подъезда к данным зданиям. Необходимо было минимизировать воздействие нагрузок от транспорта, а также обеспечить въезд в здания транспортных средств и напольного транспорта без устройств пандусов. Одним из предлагаемых проектно-технических решений являлось возведение зданий со свайными фундаментами и полами по грунту. При непосредственном контакте такого сооружения с грунтами основания последние воспринимают существенную тепловую нагрузку от него, что приводит к их растеплению, неравномерным осадкам и деформациям фундамента. К деформациям также может привести негативное воздействие нормальных сил пучения. Все эти причины определили необходимость при проектировании объектов в криолитозоне предусматривать применение технологий и технических средств инженерной защиты,

отображенных в инновационных проектно-технических решениях, учитывающих всю специфику взаимодействия в геотехнической системе «сооружение – ММП».

Для разработки данного проекта в первую очередь необходимо было оценить степень тепловой нагрузки здания на грунты основания и затем решать задачу оптимизации технических решений по инженерной защите и термостабилизации грунтов оснований сооружений [6]. Для этих целей была выполнена серия прогнозных теплотехнических расчетов с использованием программы HEAT (ТЕПЛО), разработанной на кафедре геокриологии МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством профессора Л.Н. Хрусталева.

При расчете задавались следующие граничные условия (ГУ, рис. 1):

- II рода – на нижней и боковых поверхностях нулевой тепловой поток;
- III рода – за контуром здания сезонный ход температуры воздуха и термическое сопротивление снежного покрова по данным метеостанций Тамбей и Сеяха;
- III рода – температура в здании $+20^{\circ}\text{C}$, теплопроводность теплоизоляции в полах $0,035 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ при ее толщине $0,2 \text{ м}$.

Таблица 1

Классификация грунтов континентального типа засоления согласно ГОСТ 25100-95

Разновидность грунтов	Степень засоленности грунтов $D_{\text{з}}$, %					
	Суглинок	Супесь	Песок	Крупнообломочный грунт		
				Содержание песчаного заполнителя 40 % и более	Содержание заполнителя в виде суглинка 30 % и более	Содержание заполнителя в виде супеси 30 % и более
Незасоленный	< 10	< 5	< 3	< 3	< 10	< 5
Слабо засоленный	10-15	5-8	3-7	-	-	-
Средне засоленный	15-20	8-12	7-10	-	-	-
Сильно засоленный	20-25	12-15	10-15	-	-	-
Избыточно засоленный	> 25	> 15	> 15	-	-	-

Таблица 2

Классификация грунтов морского типа засоления согласно ГОСТ 25100-95

Разновидность грунтов	Суммарное содержание легкорастворимых солей, % массы сухого грунта	
	песок	глинистый грунт
Слабо засоленный	0,05-0,10	0,20-0,50
Средне засоленный	0,10-0,20	0,50-1,00
Сильно засоленный	> 0,20	> 1,00

Таблица 3

Результаты испытаний железобетонных свай в засоленных грунтах статической вдавливающей нагрузкой в пос. Амдерма [5].

Характеристика грунтов основания	Расчетная несущая способность по СНиП 2.02.04-88, кН	Несущая способность по результатам испытания свай, кН
Песок незасоленный до глубины 4 м, далее суглинок с засоленностью 0,1% и температурой -2°C	410	310
Суглинок с засоленностью 0,1-0,2%, влажностью 30-59% и температурой $-3,5^{\circ}\text{C}$	810	680
Суглинок с засоленностью 0,6-0,9%, влажностью 30-50% и температурой $-3,5^{\circ}\text{C}$	640	290
Суглинок с засоленностью 0,6-0,9%, влажностью 30-50% и температурой $-3,5^{\circ}\text{C}$	1140	590
Суглинок с засоленностью 0,6-0,9%, влажностью 30-50% и температурой $-3,5^{\circ}\text{C}$	680	310
Суглинок с засоленностью 0,6-0,9%, влажностью 30-50% и температурой $-3,5^{\circ}\text{C}$	880	230

Задача решалась как плоско-симметричная, поэтому в расчете закладывалась полуширина здания, равная 24 м. Разрез сложен следующими инженерно-геологическими элементами: насыпной грунт мощностью 1 м, представленный песком; суглинок сильнольдистый средnezасоленный мощностью 2 м; глины сильнольдистые сильнозасоленные на всю глубину разреза (30 м). Физико-механические и теплофизические характеристики грунтов основания брались по материалам инженерных изысканий и СНиП 2.02.04-88 [3]. Начальное распределение температуры, получалось из решения одномерной задачи.

По результатам проведенных расчетов были получены графики распределения температуры в грунтах под серединой и краем здания, а также в естественных условиях на 5-й, 10-й и 15-й год эксплуатации (рис. 2).

Анализируя полученное распределение температурных полей в грунте можно сделать выводы о том, что на 5-й год эксплуатации здания чаша оттаивания мерзлых пород составляет 4 метра (под серединой и краем здания), на 15-й год – 8,5 м под серединой и 6 м под краем здания. В результате к 15-му году эксплуатации на 55–80% своей длины сваи оказываются в талом водонасыщенном грунте, что наихудшим образом сказывается на их несущей способности и может повлечь деформации фундамента.

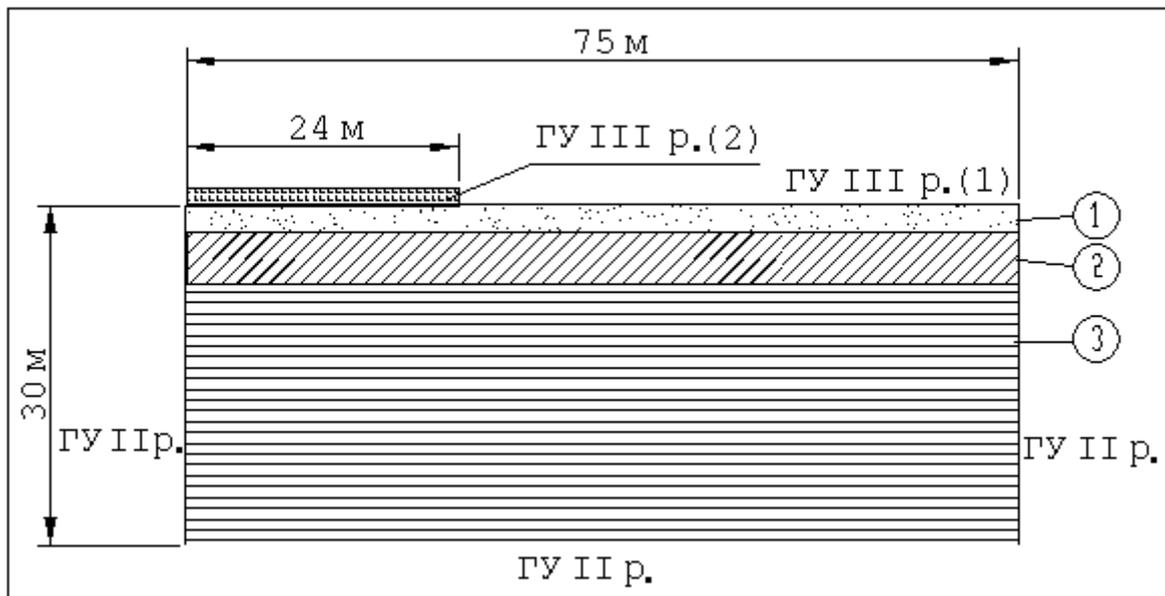


Рис. 1. Исходная расчетная модель теплового влияния здания на грунты основания: 1 – насыпной грунт, представленный песком $h = 1$ м; 2 – суглинок сильнольдистый среднезасоленный $h = 2$ м; 3 – глины сильнольдистые сильнозасоленные.

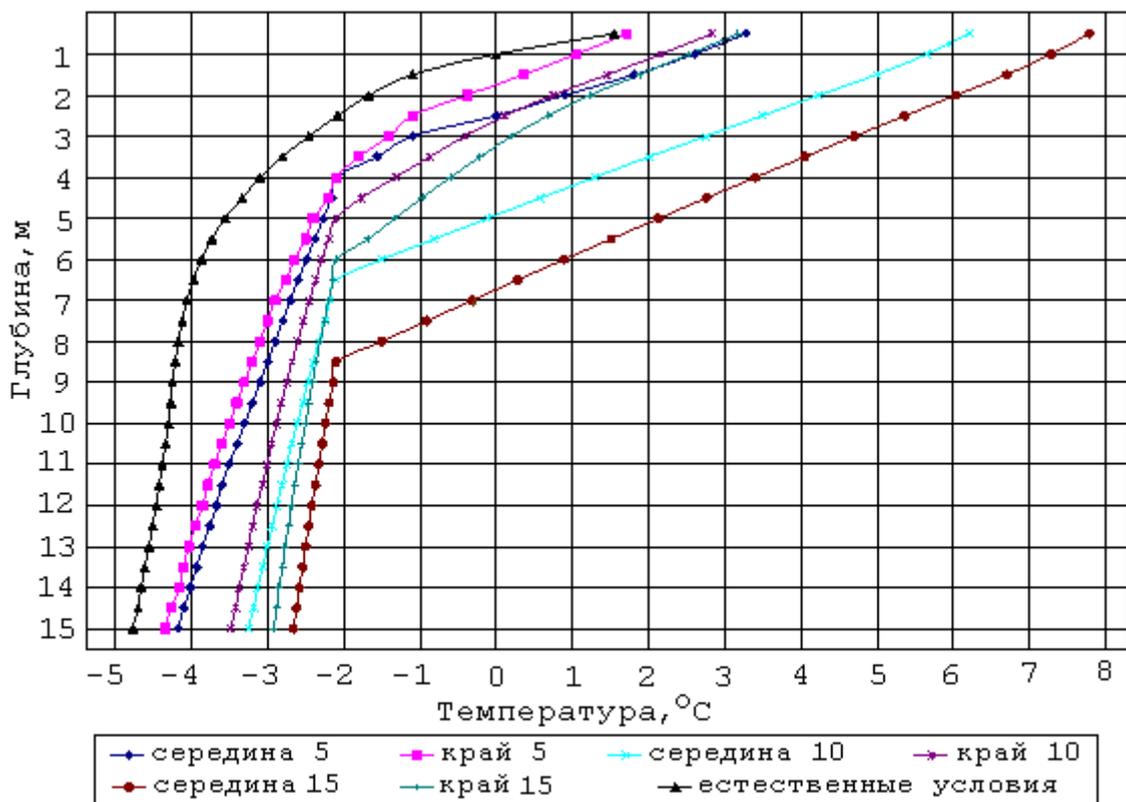


Рис. 2. Графики распределения температуры в грунтах под серединой и краем здания на 5-й, 10-й и 15-й год эксплуатации, а также в естественных условиях (на конец летнего периода).

В связи с этим была поставлена задача по термостабилизации грунтового основания с целью недопущения его оттаивания и обеспечения необходимой несущей способности свай. На сегодняшний день существуют различные типы и модификации охлаждающих устройств (ОУ), в том числе по конструктивным особенностям и материалу. Задача термической стабилизации грунтов включает в себя: выбор типа, конструкции и шага расстановки ОУ, монтаж ОУ и т.д.

Эта задача решалась с помощью применения технологии и технических средств термической стабилизации грунтов основания, а именно с помощью применения длинномерных охлаждающих устройств ДОУ-1 производства АОЗТ «Интер Хит Пайп» в комплексе с теплоизолирующим материалом.

Длинномерное охлаждающее устройство типа ДОУ-1 – это составной многосекционный термостабилизатор. ДОУ-1 может состоять из 2-х и более секций в зависимости от модификации, может выполняться как в вертикальном, так и в горизонтальном (слабонаклонном) варианте. Конструктивная специфика ДОУ-1 имеет целый ряд существенных преимуществ и расширяет возможности применения технологий и средств термостабилизации в любых самых сложных природно-климатических условиях. К ним относятся: полная заводская готовность технических средств термостабилизации (термостабилизаторов), что гарантирует их высокое качество, в отличие от применяемого иногда охлаждающего оборудования, изготовляемого и заправляемого на месте монтажа и установки (т.е. в любое время суток, при снегопаде, сильных морозах), что не может не отразиться на качестве и надежности такого охлаждающего оборудования. Еще одно важное преимущество: многосекционность ДОУ-1, как вертикальных, так и горизонтальных. Каждая секция может составлять от 0,5 до 10,0 м, вес этих секций с учетом материала корпуса (алюминиевых сплавов) не превышает 11 кг. Многосекционность расширяет возможности применения средств термостабилизации грунтов оснований объектов практически любой площади до 75 м шириной (установка в одну линию с противоположных сторон площадки строительства двух ДОУ-1 с длиной горизонтальной испарительной части по 37,5 м – на сегодняшний день максимальная длина испарительной части выпускаемых ДОУ-1). При этом ДОУ-1 будет состоять из четырёх прямолинейных испарительных секций и одной испарительно-конденсаторной Г-образной секции. Вертикальная конденсаторная часть ДОУ-1 составляет примерно 2,3–2,4 м. Секции собираются быстро и последовательно, ввиду малого веса и габаритов отдельных секций снимаются проблемы при транспортировке и монтаже охлаждающей системы. Монтаж ДОУ-1 занимает несколько минут и не требует специальной техники.

Теплотехнические характеристики ДОУ-1 те же, что и у вертикальных термостабилизаторов ТМД-5 и ТМД-5М [7, 8] (отдельные секции ДОУ есть аналоги ТМД-5): та же эффективность охлаждения, отсутствие температурных градиентов по длине, малое время самозапуска, малое внутреннее термическое сопротивление и т.д. Испарительная многосекционная часть ДОУ-1 должна укладываться в основание объекта под углом к горизонту 1,5...2,0 градуса либо непосредственно в грунт, либо в металлические гильзы (футляры), выполненные из труб диаметром не менее 76 мм с последующим заполнением их грунтовым раствором. Выбор данного типа термостабилизатора был обусловлен тем, что термостабилизаторы, изготавливаемые из алюминиевых сплавов, имеют существенно более высокую хладопроизводительность, чем стальные [8, 9], что позволяет уменьшить шаг их расстановки.

Выбранная конструктивная схема (рис. 3) была заложена в качестве расчетной модели для последующих теплотехнических расчетов. Исходные данные брались аналогичными описанным выше. В расчетной схеме были учтены укладка

теплоизолирующих плит с теплопроводностью 0,035 Вт/(м·К) под фундаментом здания и установка термостабилизаторов – длинномерных охлаждающих устройств типа ДОУ-1. Результаты математического моделирования представлены на соответствующих графиках (рис. 4).

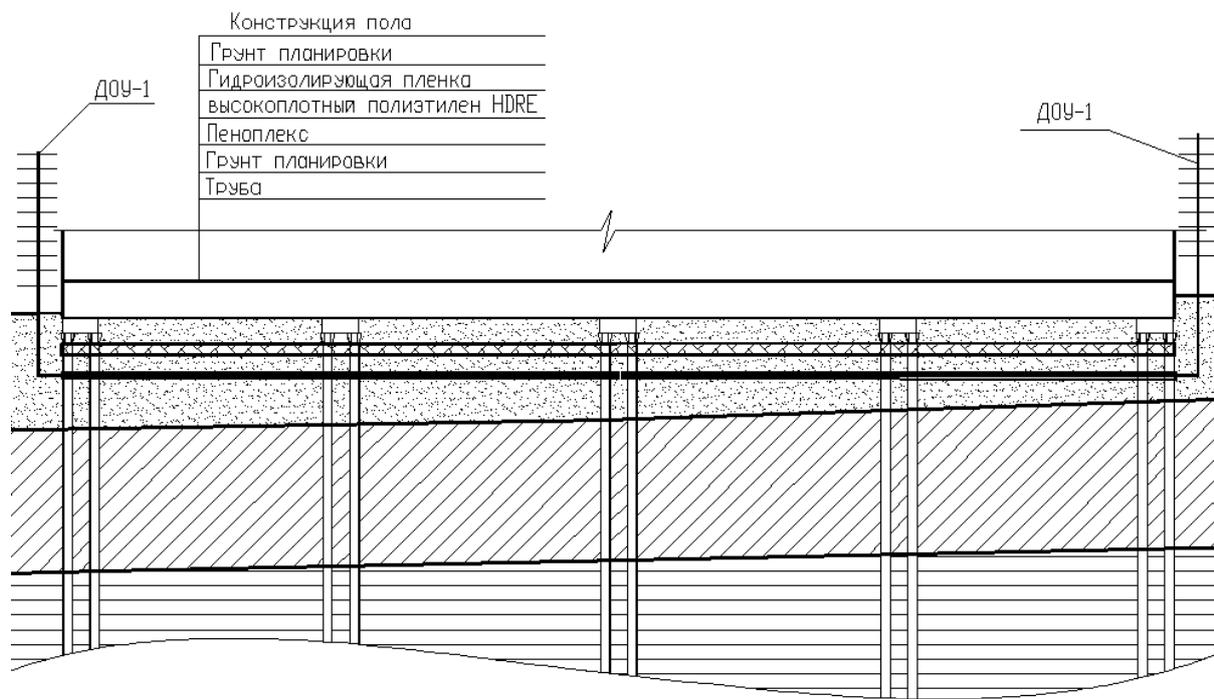


Рис. 3. Конструктивная схема термостабилизации грунтов основания здания со свайным фундаментом типа «полы по грунту».

По результатам расчетов уже в первый год работы термостабилизаторов к концу летнего периода температура грунта основания свайного фундамента ниже -4°C . Это обеспечивает необходимую несущую способность свай. В последующие годы аккумуляция вырабатываемого термостабилизаторами холода будет возрастать, а температура грунтов основания – снижаться.

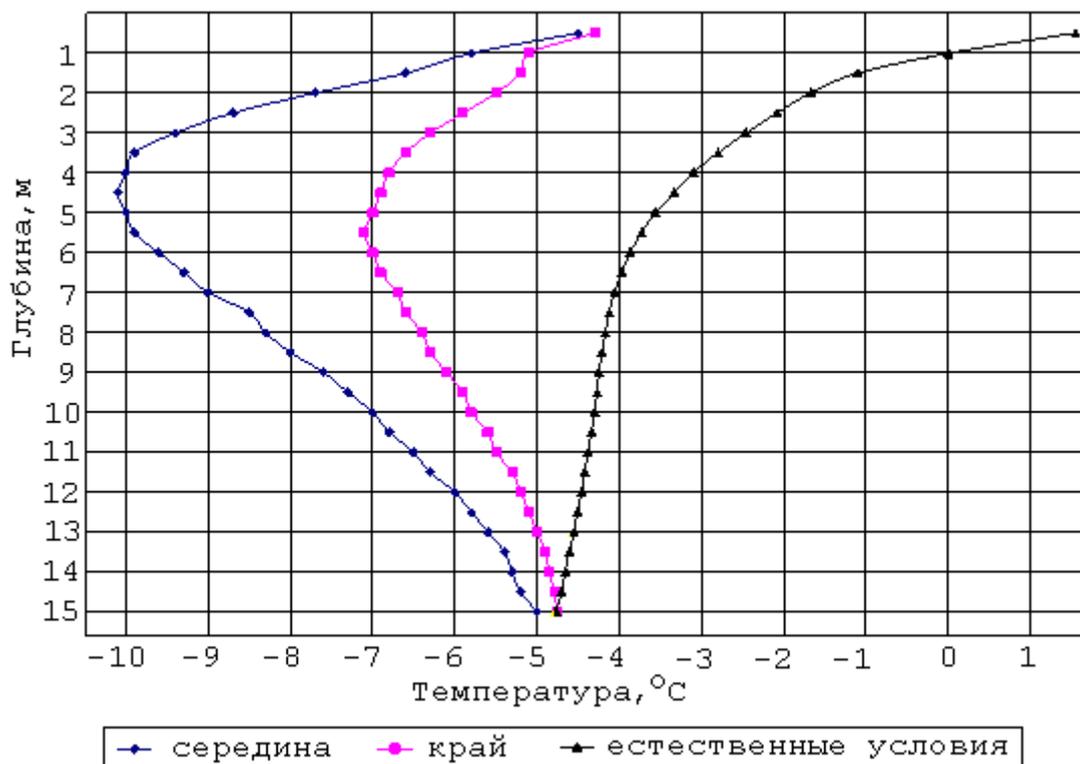


Рис. 4. Графики распределения температуры в грунтах под серединой и краем здания к концу первого года эксплуатации с термостабилизаторами типа ДОУ-1, а также в естественных условиях (на конец летнего периода).

Выводы: В условиях сплошного распространения засоленных многолетнемерзлых пород на Бованенковском НГКМ и развития различных геокриологических процессов (термокарст, пучение и т.д.) природного и техногенного генезиса проектирование зданий со свайными фундаментами и полами по грунту требует разработки специальных инновационных проектно-технических решений. Помимо научно-технической задачи стабилизации грунтового основания и обеспечения необходимой несущей способности фундаментов зданий необходимо решение оптимизационной задачи – выбор типа охлаждающих устройств с учетом их конструктивных особенностей; обоснование шага расстановки, глубины и количества ОУ; оптимизация строительно-монтажных работ (с учетом логистики). Специальные проектно-технические решения, в особенности разработанные нами длинномерные охлаждающие устройства типа ДОУ-1, позволяют использовать засоленные грунты оснований по первому принципу с сохранением мерзлого состояния, а также обеспечивают их несущую способность, не допуская развитие деформаций фундаментов сооружений. Учитывая перспективное развитие единой системы газоснабжения (ЕСГ), значительная часть которой пролегает в условиях распространения многолетнемерзлых пород, опыт проектирования зданий и сооружений Бованенковского НГКМ в разработке специальных проектно-технических решений инженерной защиты может быть заложен и использован при последующем проектировании и строительстве объектов инфраструктуры ЕСГ в соответствующих специфических условиях.

Литература

1. СНиП 23-01-99. Строительная климатология.
2. ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация.
3. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.
4. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов.- М.:МАИК «Наука/Интерпериодика». 2002. 426 с.
5. Брушков А.В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства.- М.: МГУ. 1998. 332 с.
6. Bayasan R.M., Golubin S.I., Pustovoit G.P., Proshina T.V., Korotchenko A.G. «Optimization of engineering solutions for thermal stabilization of saline permafrost soils at bases of structures by means of two-phase heat pipes». // VII Minsk International Seminar «Heat pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources». Minsk, Belarus. 2008. P.367–370.
7. Баясан Р.М., Коротченко А.Г., Пустовойт Г.П. Вероятность, детерминизм и новая техника в проблеме устойчивости вечномерзлых оснований. // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2002. N 5. С.26–31.
8. 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. Vol. 26. Supplement. Aug. 2004. P.201–206.
9. Bayasan R.M., Korotchenko A.G., Pustovoit G.P., Volkov N.G. Use of two-phase heat pipes with the enlarged heat-exchange surface for thermal stabilization of permafrost soils at the bases of structures. // Applied Thermal Engineering (ISSN 1359-4311). 2008. Vol.28. N 4. P.274–277.