

УДК 622.276.04

Особенности проектирования береговых сооружений объектов обустройства нефтегазового комплекса в условиях Обской губы

М.А. Магомедгаджиева^{1*}, Г.С. Оганов¹, И.Б. Митрофанов¹, А.М. Карпов¹

¹ ООО «Красноярскгазпром нефтегазпроект», Российская Федерация, 660075, г. Красноярск, ул. Маерчака, д. 10

* E-mail: m.magomedgadzhieva@krskgazprom-ngp.ru

Тезисы. В статье приведены особенности проектирования оснований береговых сооружений в сложных геокриологических условиях Обской губы, позволяющие не только обеспечить их устойчивость и многолетнюю эксплуатационную надежность, но и получить экономический эффект. Рассмотрен пример выбора местоположения площадки водозабора с учетом существующих геокриологических условий и предотвращения активизации геокриологических процессов. На основе прогнозных теплотехнических расчетов разработаны технические решения по обеспечению устойчивости инженерных сооружений с использованием современных систем температурной стабилизации. Эти решения приняты в проектной документации.

Освоение нефтегазовых месторождений арктического шельфа является одной из ключевых стратегических задач для нашей страны. Однако степень изученности шельфа крайне низка, территории месторождений часто имеют сложную геокриологическую обстановку, что в свою очередь затрудняет обеспечение устойчивости и надежности объектов обустройства нефтегазового комплекса.

Газовое месторождение Каменномысское-море (ГМ КММ) располагается в акватории Обской губы Карского моря, в районе мыса Каменный. Высокоширотное местоположение месторождения наряду с суровым арктическим климатом предопределяют значительное распространение многолетнемерзлых пород, развитых как на побережье Обской губы, так и в прибрежных участках акватории.

Неоднородность мерзлотно-геологической обстановки, обусловленная разнообразием природных условий в плейстоцене, а также значительные криогенные и посткриогенные преобразования отложений в современный период определяют геокриологические условия района работ как сложные, которые в силу грандиозности проекта освоения ГМ КММ обладают также большим разнообразием.

В ходе проектирования объектов обустройства авторы столкнулись с тем, что результаты выполненных разными организациями инженерно-геологических изысканий на границе смыкания участков изысканий расходятся настолько, что согласно значениям температуры начала замерзания грунтов они находятся в разном температурном состоянии [1]. Определение расчетных сопротивлений грунта в ряде случаев выполнено при одной назначенной температуре, которая не отвечает ни естественной температуре, ни ее прогнозным эксплуатационным значениям. В то же время для выявления зависимости прочностных характеристик грунтов от температуры и, соответственно, корректного выполнения расчетов несущей способности свайных фундаментов по результатам испытаний необходимо определить расчетные сопротивления грунта для нескольких значений температур¹.

В результате проектировщик в силу недостаточной изученности свойств мерзлых грунтов с большим запасом разрабатывает проектные решения применительно к худшим условиям. Вслед за ним теплотехник, который выполняет прогнозные теплотехнические расчеты, тоже вынужден разработать мероприятия по обеспечению

Ключевые слова: арктический шельф, сложные геокриологические условия, многолетнемерзлые грунты, устойчивость береговых сооружений, система термостабилизации грунтов, комплексный геотехнический мониторинг.

¹ См. СП 25.13330. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88.

надежности принятых конструктивных решений на весь срок эксплуатации с большим запасом. В случае если проектировщик и теплотехник не взаимодействуют, то запас увеличивается вдвое.

Следовательно, на этапе выполнения инженерно-геологических изысканий необходимо предусмотреть научно-техническое сопровождение, в процессе которого должны быть обобщены и проанализированы результаты инженерно-геологических изысканий и выданы рекомендации по дополнительным исследованиям свойств грунтов. На основе этих данных: типизируют инженерно-геокриологические условия, осуществляют инженерно-геокриологическое картирование и районирование по степени опасности геокриологических процессов, определяют высоты общепланировочной насыпи с оценкой грунтов по степени их морозной пучинистости. Следует отметить, что при инженерно-геокриологическом картировании выполняются прогнозные теплотехнические и деформационные расчеты с учетом тренда потепления климата и возможного теплового влияния строительного и эксплуатационного периодов, позволяющие оценить динамику изменения природных геокриологических процессов.

Освоение ГМ КММ будет проводиться с помощью ледостойкой стационарной буровой платформы ЛСП «А» и трех блок-кондукторов [2]. В акватории Обской губы, где расположены платформа и блок-кондукторы, на всю глубину (50 м) распространены талые супесчано-суглинистые и песчаные грунты, тепловое взаимодействие газодобывающих скважин с которыми не представляет никакой опасности с точки зрения развития деформаций и потери устойчивости добывающих скважин. Взаимодействие ледовых образований с ледостойкими сооружениями оценено [3], сами конструкции обеспечивают восприятие ледовых нагрузок.

В настоящей работе рассматривается пример выбора местоположения и проектирования водозаборных сооружений. Геокриологические условия исследуемого участка характеризуются развитием многолетнемерзлых грунтов (ММГ) сливающегося типа на поверхности террасы и в пойме у подножья берегового склона. Наличие подруслового сквозного талика в акватории Обской губы обуславливает постепенное погружение кровли ММГ. В 180 м

от береговой линии ММГ вскрыты на глубине 12,4 м. Далее от берега на глубинах изысканий ММГ встречены не были. ММГ рассматриваемой территории имеют классическое криогенное строение, свойственное для отложений с эпигенетическим типом промерзания. В верхней части разреза преобладают слоистая и сетчатая тонкошлировая криотекстуры. С глубиной толщина шлиров льда растет и расстояние между ними увеличивается. Температура грунтов на глубине годовых амплитуд варьирует в диапазоне от минус 2,1 °С на террасе до минус 5,2 °С на пойме. Температуры грунтов в русле губы на глубине годовых амплитуд положительные.

ММГ представлены глинами легкими пылеватыми, суглинками тяжелыми и легкими пылеватыми, супесями пылеватыми и песчанистыми, песками пылеватыми. Глины легкие пылеватые имеют слоистую криогенную текстуру (льдиность грунта (i_i) за счет ледяных включений равна 0,03...0,2 д.е.); суглинки тяжелые пылеватые – массивную криогенную ($i_i \leq 0,03$), слоистую криогенную ($i_i = 0,03 \dots 0,2$) и сетчатую криогенную ($i_i = 0,2 \dots 0,4$) текстуры; суглинки легкие пылеватые – массивную криогенную ($i_i \leq 0,03$), слоистую криогенную ($i_i = 0,03 \dots 0,2$) и сетчатую криогенную ($i_i = 0,2 \dots 0,4$ и $i_i = 0,4 \dots 0,6$) текстуры. Супеси пылеватые находятся в верхней части разреза и имеют сетчатую криогенную текстуру ($i_i = 0,4 \dots 0,6$). ММГ имеют небольшую засоленность (0,04...0,11 %); температура начала замерзания грунтов варьирует в диапазоне от минус 0,3 до минус 0,7 °С.

Талые грунты (ТГ) встречены в скважинах, пробуренных на акватории и пойме Обской губы. Грунты представлены суглинками тяжелыми пылеватыми тугопластичными (показатель текучести (I_L) равен 0,31) и полутвердыми ($I_L = 0,19$), песками пылеватыми и мелкими, насыщенными водой.

На рассматриваемом участке развиты следующие геологические процессы: сезонное пучение; денудационные, абразионные и термоэрозионные процессы, происходящие из-за непосредственной близости к береговой линии; волновое разрушение склона береговой линии.

Водозаборные сооружения состоят из водоприемника и станции насосной 1-го подъема. Станция насосная 1-го подъема, в свою очередь, состоит из приемного колодца и здания.

Водоводы с сетью воздухопроводов, проложенных совместно с водоводами от водоприемника, прокладываются в грунте дна с утяжелителями глубинными текстильными на глубине 3 м. Глубина заложения водоводов принята на отметках с максимальными температурами грунта в зимний период. Первоначальное расположение сооружений водозабора приведено на рис. 1. Участок водовода, проходящий по береговой части от уреза воды до приемного колодца, находится в зоне ММГ и прокладывается в стальной трубе, которая является обсадной при проходе горизонтальным шнековым бурением.

Для оценки взаимодействия приемного колодца и двух водоводов с двумя воздухопроводами в обсадной трубе (далее – трубопровода) с ММГ проведены прогнозные теплотехнические расчеты в программе Frost 3D Universal (сертификат соответствия № РОСС RU.СП15.Н00677). Программа позволяет численно решать пространственные задачи теплообмена с различными граничными условиями и прогнозировать температурный режим для разных инженерных сооружений с учетом сложной геометрии области моделирования и произвольного распределения охлаждающих элементов различного типа. Процесс фазового перехода влаги в расчетах происходит в спектре отрицательных температур с учетом степени минерализации, концентрация солей в поровой влаге определяет значение температуры начала фазового перехода. Влияние снежного покрова и процесса испарения влаги с поверхности земли учитывается модификацией граничных условий 3-го рода в соответствующих

точках границ трехмерной области расчета. Программа позволяет произвести теплотехнический расчет с учетом фильтрации.

Расчетная область моделирования (см. рис. 1) представляет собой трехмерное пространство (параллелепипед) размером 350,0×80,0×93,0 м (по осям x , y , z соответственно), что вмещает в плане рассматриваемые сооружения и прилегающую территорию, на границе которой влияние тепловыделяющих сооружений отсутствует. На верхней границе расчетной области заданы краевые условия 3-го рода: температура воздуха, сопротивление теплопередаче изоляционного слоя (снег, теплозащитный экран), коэффициент конвективного теплообмена с грунтами основания. На боковых и нижней границах заданы краевые условия 2-го рода (постоянный теплоток).

При выполнении расчетов приняты следующие параметры:

- температура воды в колодце – плюс 5 °С зимой, плюс 30 °С летом;
- температура воды в водоводах – плюс 40 °С зимой, плюс 10 °С летом;
- температура в воздухопроводах – плюс 42 °С зимой, плюс 17 °С летом;
- режим работы комплекса – круглосуточный;
- наружный диаметр труб водоводов и воздухопроводов – 110 мм, с изоляцией – 200 мм; диаметр стальной обсадной трубы – 820 мм;
- учтены теплоизоляция труб и воздушная прослойка между трубами воды, воздуха водоводов и обсадной трубой.

Результаты прогнозного теплотехнического расчета воздействия трубопровода и колодца

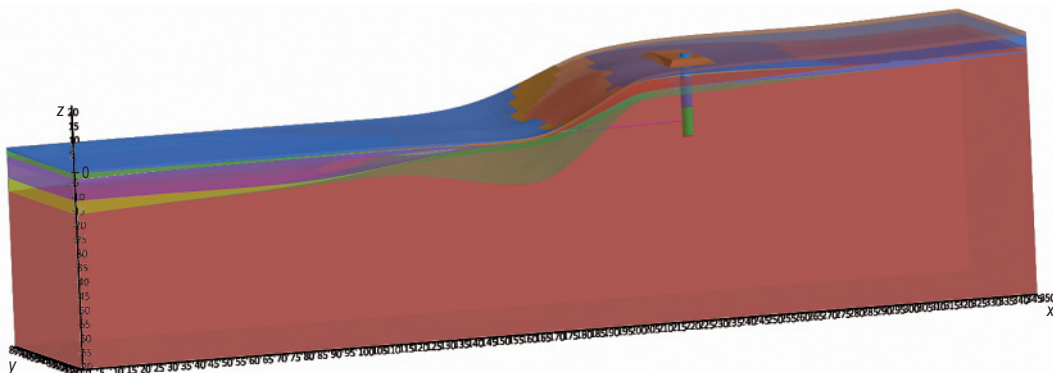


Рис. 1. Расчетная область с первоначальной посадкой сооружений водозабора:
оси x , y , z – соответственно длина, ширина, глубина, м; цветовые обозначения соответствуют разным объектам – грунтам и инженерным сооружениям, отметка «ноль» – уровню воды в Обской губе

на температурный режим грунтов на конец летних периодов представлены на рис. 2. Они показывают, что в основании сооружений происходит повышение температур грунтов. Максимальное тепловое воздействие наблюдается на 5-й год эксплуатации (см. рис. 2б) вследствие одновременного воздействия укладки талой насыпи и теплового излучения сооружений станции 1-го подъема. Со временем температура верхних слоев разреза под влиянием низких

природных температур воздуха понижается, и температуры грунтов стабилизируются (см. рис. 2в). В процессе эксплуатации колодца происходит оттаивание вмещающих мерзлых грунтов в радиусе 11 м.

Расчетная величина осадки основания в непосредственной близости от колодца составляет 2,8 м. В процессе эксплуатации колодца и развития осадки грунтов появляется возможность попадания надмерзлотных вод слоя

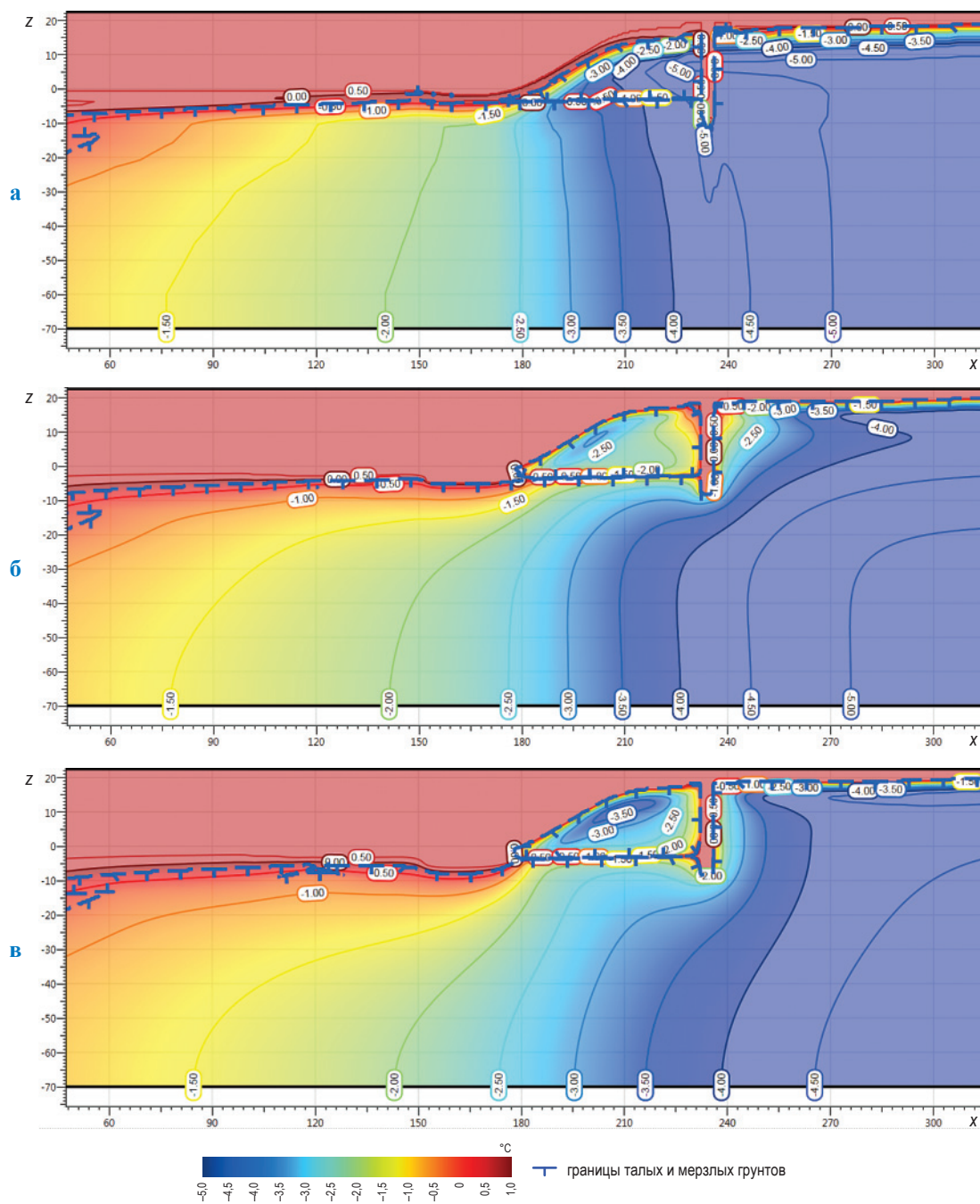


Рис. 2. Динамика температурного поля в основании сооружений водозабора за 30-летний период эксплуатации. Продольный разрез: а – начало воздействия сооружений на ММГ; б – через пять лет; в – через 30 лет

сезонного оттаивания в формирующуюся воронку, грунты обводняются, глубина оттаивания ММГ растет.

Повышение температуры грунтов достигает верхней бровки склона, что может активизировать процесс эрозии и создать благоприятные условия для возникновения новых криогенных процессов, таких как термоэрозия, термокарст и солифлюкция. Следовательно, такое расположение станции 1-го подъема не обеспечит устойчивости рассматриваемых сооружений.

В результате теплового воздействия трубопровода образуется ореол оттаивания радиусом 0,4...2,5 м (см. рис. 2в). В этом случае произойдет осадка оттаявших грунтов до 0,5 м. На участке перехода от основания, сложенного тальми грунтами, к основанию, сложенному просадочными грунтами, при оттаивании ММГ трубопровод будет претерпевать максимальные напряжения вследствие прогиба.

Вблизи береговой линии, на шельфе, происходит оттаивание мерзлых суглинков, температура начала замерзания которых составляет минус 0,7 °С. Оттаявшие грунты склона береговой линии с большей интенсивностью, нежели мерзлые, подвержены волновому разрушению. Анализ результатов моделирования литодинамического режима на акватории месторождения Каменномыское-море показал, что в исследуемой акватории основные деформации берега происходят севернее м. Парусного, где расположены водозаборные сооружения. При доминирующих волнах северного направления именно северная часть берега оказывается подвержена размыву.

Взаимодействие «теплого» трубопровода с ММГ основания может привести к возникновению и развитию следующих негативных

и опасных мерзлотных процессов: оттаивания вокруг трубопровода и осадки поверхности грунтов; термоэрозии; оползания оттаявших мерзлых грунтов на береговых склонах; волнового разрушения склона береговой линии и шельфа. Следовательно, устойчивость трубопровода на весь период эксплуатации не будет обеспечена.

Применение теплоизоляции вокруг колодца и теплозащитного экрана под его основанием уменьшает тепловое воздействие колодца на грунт. Оттаивание грунтов происходит лишь в области соединения трубопровода с колодцем. Однако температура грунтов существенно повышается – от минус 5,2 до минус 1,0 °С, изменяются состояние и свойства грунтов. Согласно опубликованным данным скорость эрозии склона для данного района составляет 0,5 м в год. При техногенном воздействии геокриологические условия рассматриваемого района могут претерпевать значительную трансформацию. Следовательно, при таком расположении станция 1-го подъема находится в зоне риска.

На основе анализа геокриологических условий и результатов прогнозных теплотехнических расчетов для обеспечения эксплуатационной надежности основания было принято решение о переносе станции 1-го подъема на 50 м выше по склону. Результаты прогнозного теплотехнического расчета при предлагаемом варианте расположения станции 1-го подъема представлены на рис. 3, где видно, что при таком расположении криогенные процессы у верхней бровки склона исключаются.

В целях сохранения твердомерзлого состояния сильнольдистых грунтов верхней части разреза непосредственно у колодца и предотвращения развития криогенных процессов

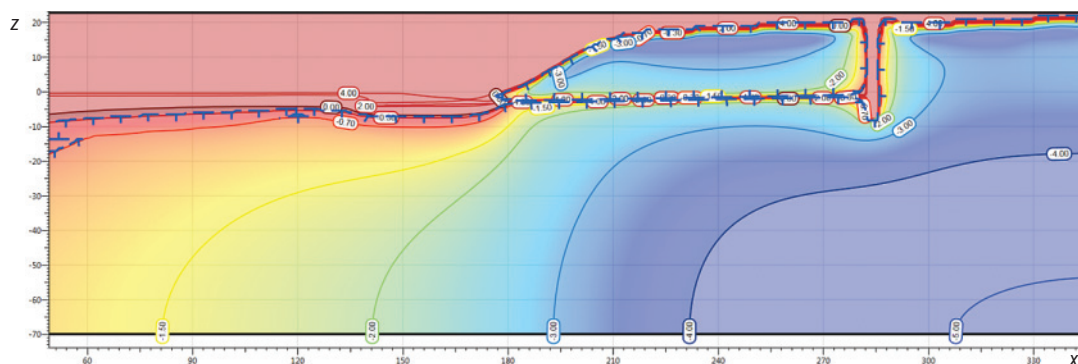


Рис. 3. Температурное поле, сформированное в основании сооружений водозабора через 30 лет эксплуатации. Продольный разрез: см. экспликацию к рис. 2

у подножия склона предусмотрены мероприятия по термостабилизации грунтов:

- устройство глубинных термостабилизаторов вокруг колодца;
- сооружение льдогрунтовой завесы у подножия склона с помощью термостабилизаторов, расположенных в два ряда в шахматном порядке с шагом 2 и 1 м;
- строительство льдогрунтовой опоры под трубопроводом с помощью анкерных термостабилизаторов с транзитным участком, подающих холод на необходимые расстояние и глубину.

Схемы расстановки и параметры термостабилизаторов в составе предусмотренных технических решений подобраны на основе прогнозных теплотехнических расчетов. Для предотвращения повреждения термостабилизаторов в процессе эксплуатации вблизи береговой линии они вынесены за пределы границы достижения стаух и припайного льда.

Научно-техническое сопровождение инженерных изысканий, проектирования и строительства обеспечат их качество и безопасность, а также последующую безопасную эксплуатацию зданий и сооружений.

Индивидуальный подход к объектам, качественное проведение инженерно-геологических изысканий и прогнозирование влияния геокриологических условий и опасных геокриологических процессов, а также геотехническое обоснование принимаемых технических решений по фундаментам и термостабилизации грунтов обеспечат устойчивость и многолетнюю эксплуатационную надежность оснований сооружений при любых технологических требованиях, а также позволят получить экономический эффект.

Создание эффективной системы геотехнического мониторинга за счет осуществления инструментального контроля динамики развития геологических и геокриологических условий оснований и устойчивости фундаментов с учетом изменений природно-технической обстановки позволит своевременно выявить развитие деструктивных процессов и принять управляющее техническое решение. Прогноз развития криогенных процессов, количественная оценка их воздействия по результатам расчетов должны быть сопоставлены и откорректированы по результатам реализации программы комплексного геотехнического мониторинга на этапах строительства и эксплуатации месторождений.

Список литературы

1. Магомедгаджиева М.А. Об оптимизации проектирования оснований объектов обустройства нефтегазового комплекса в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов / М.А. Магомедгаджиева // Материалы расширенного заседания научного совета по криологии Земли РАН «Актуальные проблемы геокриологии» 15–16 мая 2018 г. – М.: МГУ, 2018.
2. Оганов Г.С. Основные аспекты проектирования обустройства газового месторождения Каменномысское-море / Г.С. Оганов, И.Б. Митрофанов, А.М. Карпов // Ежеквартальный научно-технический журнал ООО «Красноярскгазпром нефтегазпроект». – Красноярск, 2017. – № 1. – С. 4.
3. Митрофанов И.Б. Особенности взаимодействия ледовых образований с ледостойкими сооружениями, предназначенными для освоения месторождения Каменномысское-море / И.Б. Митрофанов, А.М. Карпов, М.М. Карулина и др. // Ежеквартальный научно-технический журнал ООО «Красноярскгазпром нефтегазпроект». – Красноярск, 2018. – № 1. – С. 3.

Special features of beach installation design for oil-gas site facilities in the Gulf of Ob waters

M.A. Magomedgadzhieva^{1*}, G.S. Oganov¹, I.B. Mitrofanov¹, A.M. Karpov¹

¹ Krasnoyarskgazprom Neftegazproyekt LLC, Bld. 10, Mayerchaka street, Krasnoyarsk, 660075, Russian Federation

* E-mail: m.magomedgadzhieva@krskgazprom-ngp.ru

Abstract. The paper highlights specifics of beach installations design within complicated geocryological environment of the Gulf of Ob. The listed solutions provide both rigidity and longstanding functional reliability of beach installations and give cost advantages. Choosing of water inlet site location is illustrated in the light of real

geocryological environment and targeted prevention of permafrost expansion. On the grounds of the prognostic calculations of heating performance few technologies supporting rigidity of engineering constructions have been designed using modern systems for thermal stabilization. These solutions are included into project documentation.

Keywords: Arctic continental shelf, complicated geocryological environment, permafrost, rigidity of beach installations, system for thermal stabilization of subsoil, complex geotechnical monitoring.

References

1. MAGOMEDGADZHIYEVA, M.A. Optimizing design of foundations for oil-gas site facilities in permafrost environment [Ob optimizatsii proyektirovaniya osnovaniy obyektov obustroystva neftegazovogo kompleksa v usloviyakh rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh gruntov]. In: *Proc. of a broadened council of the RAS on Earth cryology "Topical issues of geocryology"*. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2018. (Russ.).
2. OGANOV, G.S., I.B. MITROFANOV, A.M. KARPOV. Main design aspects of Kamennomyskoye-more gas field facilities development [Osnovnyye aspekty proyektirovaniya obustroystva gazovogo mestorozhdeniya Kamennomyskoye-more]. *Quarterly Scientific-Technical Journal of the Krasnoyarskgazprom Neftegazproyekt LLC*. Krasnoyarsk, 2017, no. 1, p. 4. (Russ.).
3. MITROFANOV, I.B., A.M. KARPOV, M.M. KARULINA et al. Peculiar features of interaction between ice formations and ice-resistant constructions aimed at development of Kamennomyskoye-more field [Osobennosti vzaimodeystviya ledovykh obrazovaniy s ledostoykimi sooruzheniyami, prednaznachennymi dlya osvoyeniya mestorozhdeniya Kamennomyskoye-more]. *Quarterly Scientific-Technical Journal of the Krasnoyarskgazprom Neftegazproyekt LLC*. Krasnoyarsk, 2017, no. 1, p. 3. (Russ.).