ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Моделирование эффективности работы сезоннодействующих охлаждающих устройств при изменении статистического распределения погодных условий

О.М.Ермилов[1], **А.А.Джалябов**[2], **Г.Г.Васильев**[3], **И.А.Леонович**[3]✉

[1] *ООО «Газпром добыча Надым», Надым, Россия*

[2] *ООО «Газпром добыча Ноябрьск», Ноябрьск, Россия*

[3] *РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М.Губкина, Москва, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Ермилов О.М., Джалябов А.А., Васильев Г.Г., Леонович И.А. Моделирование эффективности работы сезоннодействующих охлаждающих устройств при изменении статистического распределения погодных условий // Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 272-282. EDN UZQOVK

***Аннотация*.** Климатический фактор потепления, о котором свидетельствует значительное число ученых и исследовательских коллективов в России и мире, оказывает существенное влияние на мерзлотное состояние многолетнемерзлого грунта, сохранение которого – один из наиболее распространенных принципов строительства на Севере. Рассматривается влияние прогнозных климатических изменений при планировании до 2050 г. на эффективность работы сезоннодействующих охлаждающих устройств, принцип работы которых построен на сезонном промораживании грунта. Проведенное моделирование показало, что в ситуации стабильного климата сохранение мерзлотного состояния многолетнемерзлого грунта реализуется без применения дополнительных мер. При потеплении с трендом 0,1 °С в год сезоннодействующие охлаждающие устройства не обеспечивают сохранение текущего уровня мерзлотного состояния грунта и требуются дополнительные меры, которые позволили бы повысить их эффективность работы в летний период. В случае более экстремального потепления с темпом 0,25 °С в год результаты моделирования показывают, что сезоннодействующие охлаждающие устройства не оказывают значительного влияния на темпы растепления грунта и решением проблемы должна стать их полная замена на системы с круглогодичным действием.

***Ключевые слова*:** многолетнемерзлый грунт; термосифон; сезоннодействующее охлаждающее устройство; потепление; климат; повышение эффективности

Поступила: 05.09.2022 ***Принята: 20.09.2023*** ***Онлайн: 06.12.2023*** ***Опубликована: 25.04.2024***

Введение. Перспективные территории развития нефтегазовой отрасли Российской Федерации имеют тенденцию к смещению на север и восток. Освоение Ямальского центра газодобычи, месторождений Гыданского полуострова, Якутии и Дальнего Востока ставит перед нефтегазовыми компаниями важнейшую задачу качественного и надежного функционирования объектов нефтегазового сектора в условиях сплошного распространения многолетнемерзлого грунта (ММГ).

Комплексное освоение месторождений Арктического региона России предполагает поиск новых методов разведки месторождений, которые позволили бы уменьшить техногенное влияние на ММГ за счет сокращения доли полевых этапов работ [1, 2], новых методов освоения месторождений с сокращением теплового воздействия на мерзлый грунт при бурении [3] или при производстве строительных и монтажных работ [4], а также новых методов и технологий обеспечения надежности эксплуатации промысловых объектов в целях сокращения влияния выбросов и утечек добываемых и транспортируемых продуктов [5]. При сооружении объектов добычи и транспорта природного газа на участках сплошного распространения ММГ их использование осуществляется по первому принципу – сохранение мерзлоты как в процессе строительства [6, 7], так и эксплуатации [8, 9]. Нарушение условий эксплуатации грунта в мерзлотном состоянии может привести к катастрофическим последствиям природного и техногенного характера [10, 11], которые наносят значительный вред хрупкой экосистеме северных регионов. Анализ научных работ по методам

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 272-282
© О.М.Ермилов, А.А.Джалябов, Г.Г.Васильев, И.А.Леонович, 2024

освоения Арктики показывает, что на каждом этапе жизненного цикла промышленного объекта решается задача уменьшения теплового воздействия на мерзлый грунт как за счет применения новых конструкций оснований и фундаментов [4, 7], так и оптимизации технологических процессов [1, 3].

Типовым техническим решением для реализации данного принципа является применение различных конструкций сезоннодействующих охлаждающих устройств (СОУ). Обзор таких систем выполнен в работе [12], а в статье [13] показано, как системы термостабилизации грунтов при строительстве в криолитозоне позволяют поддерживать нужную отрицательную температуру оснований или восстанавливать деградированную мерзлоту. Эффективность работы СОУ напрямую зависит от климатических условий окружающей среды, и при их проектировании обычно используются стационарные климатические модели, опирающиеся на статистические данные климата территории строительства [14].

По оценкам значительного числа ученых [15, 16] и международных климатических организаций [17], в России идут активные процессы потепления климата, особенно сильно выраженные в северных широтах [18, 19] Российского Севера. Показано [16], что за последние 20 лет территория Ямала подверглась аномальному снижению среднегодовых температур, а также количества дней в году с низкими температурами. Отчеты [17] известной климатической группы Intergovernmental Panel on Climate Change фиксируют годовое потепление в диапазоне от 0,03 до 0,1 °С, а данные Росгидромета [18] для Севера России демонстрируют динамику потепления выше 0,1 °С. Такие климатические изменения могут нанести значительный ущерб мерзлотному состоянию грунта и привести к его растеплению, что приведет к значительному снижению несущей способности свайных оснований и фундаментов [20, 21].

В работах [22, 23], посвященных состоянию СОУ, рассматриваются вопросы повреждения и разрушения этих конструкций в процессе строительства и эксплуатации или вопросы эффективности СОУ в зависимости от различных факторов антропогенного и техногенного характера [24]. Исследованы проблематика устойчивости инженерных сооружений при потеплении климата [25, 26], отдельные вопросы моделирования работы СОУ [27, 28] или оценки устойчивости свай при тепловом воздействии [29], но проблема снижения эффективности работы действующих СОУ по причинам глобального потепления климата не рассматривается.

Целью данного исследования являлась оценка поведения СОУ в различных климатических моделях, основанных на текущем понимании климатических изменений в России и мире. Объектом исследования стала система мерзлый грунт – климат – СОУ, а предметом исследования – устойчивость данной системы к климатическим изменениям.

Методы. Выполнено моделирование совместной работы мерзлого грунта и СОУ в различных климатических условиях с применением программного комплекса Борей 3D. Комплекс Борей 3D зарегистрирован в Роспатенте, № 2018660189 от 17.08.2018. Сертифицирован и соответствует требованиям СП 25.13330.2012 (СНиП 2.02.04-88), РСН 67-87, СТО Газпром 2-2.1-435-2010, СТО Газпром 2-2.1-390-2009, ГОСТ Р ИСО/МЭК 12119-2000, ГОСТ Р ИСО 9127-94, ГОСТ Р ИСО 9126-93, ГОСТ 28806-90. Реализует математический аппарат численного моделирования распространения температурных полей в грунтовом массиве с учетом фазового перехода незамерзшей воды в спектре отрицательных температур. Программный комплекс нашел практическое применение и использовался специалистами в рамках расчетов применения СОУ на ММГ [30, 31].

Основная задача исследования – оценка устойчивости ММГ к процессам потепления, оценка скорости деградации мерзлоты при наличии СОУ, отсутствии СОУ, а также применении методик повышения эффективности СОУ на период с 2011 до 2051 год применительно к участку ММГ, параметры которого соответствуют типовой геокриологической картине п-ова Ямал. Проработка включала варианты стабильного климата, ежегодного потепления на 0,1 и 0,25 °С. При этом рассматривалась возможность изменения геокриологической картины участков ММГ в естественном состоянии (без применения СОУ), с применением СОУ и вариант с обеспечением работы СОУ в летний период. Расчетная модель участка ММГ принята в виде куба размером 50×50×50 м, с заданными грунтовыми условиями. В качестве грунтов в модели приняты типичные для п-ова Ямал пластичномерзлые суглинки с параметрами: плотность 1750-1840 кг/м^3; суммарная

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

влажность 0,124-0,181 д. ед.; число пластичности 0,114; степень засоленности 0,065-0,081 %; температура начала замерзания –0,48 °С; без включений торфа. В центре массива грунта установлено СОУ глубиной 10,5 м. В 0,5 м по оси *Y* моделируется термоскважина 1, в 1 м – термоскважина 2, в 2 м – термоскважина 3. Куб модели отображает область, которая подвергнется дискретизации для выполнения расчета. На верхней грани куба модели принимается граничное условие третьего рода. Значения для расчета представлены в терминах скорости ветра, толщины и плотности снежного покрова. На боковых и нижней гранях куба модели принимаются граничные условия нулевого теплового потока. Для решения дифференциального уравнения распространения тепла в грунте с фазовыми переходами в спектре отрицательных температур применяется метод с динамическим разбиением области на подобласти с явной и неявной вычислительной схемой. В качестве неявной вычислительной схемы применен метод простой итерации. Для улучшения сходимости неявного метода применяется метод регуляризации и динамический подбор шага по времени. На сайте программного комплекса Борей 3D показаны результаты положительной верификации применяемых расчетных моделей на задачах, имеющих аналитическое решение. Моделирование работы СОУ производится путем постановки граничных условий второго рода в виде внутренних источников/стоков теплоты.

Прогнозирование процессов динамики состояния ММГ осуществлялось на основе экстраполяции данных климатической станции Марресаля [32, 33]. Климатические показатели для стабильного климата получены путем обработки статистических данных (средняя температура пятидневки и средняя толщина снегового покрова) за 2011-2021 гг., которые повторялись до 2051 г. Прогнозирование параметров динамики изменения климатических данных для случая потепления на 0,1 и 0,25 °С производилось путем увеличения температуры стабильного климата ежегодно на соответствующее значение. Интервал потепления 0,1 °С принят на основе проведенной авторами аппроксимации реальных климатических данных 1990-2020 гг. [16], а также оценки скорости потепления в северных регионах России по данным Росгидромета за 1976-2016 гг. [34], интервал 0,25 °С – на основе наихудшего сценария изменения климата северных территорий России на 10-12 °С в конце 21 в. по данным доклада [18]. Срок моделирования принят на основе методологии расчетов Межправительственной группы экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) [17].

Исходя из характерного для п-ова Ямал диапазона скорости ветра 5-7 м/с, в расчетах принято среднее значение скорости ветра – 6 м/с. Для моделирования использовались представленные в ПК Борей 3D данные о режиме работы и характеристики СОУ ТК32/12.М5-03 (ФСА) теплоноситель R-744 (углекислота). Для варианта перевода режима работы СОУ в летний период разработана отдельная модель климатических данных для конденсатора СОУ. В этой модели в период с 15 мая по 15 октября конденсатор СОУ находится в температурном поле –5 °С, в остальной период года климатические данные конденсатора СОУ соответствуют климатическим параметрам температурного режима того варианта климата, который моделируется. Дополнительно, исходя из анализа динамики климата при тренде потепления 0,25 °С, по причине существенного увеличения летнего периода (температура стабильно выше 0 °С) было решено рассмотреть следующий вариант режима работы: с 01.01.2024 режим установлен с 01.05 по 31.10, а начиная с 01.01.2025 – с 01.04 по 31.10.

Результаты. При условии стабильного климата моделирование показало сохранение мерзлотного состояния грунта независимо от использования СОУ. На рис.1 представлены полученные данные по мерзлотному состоянию грунта на 2050 г. при отсутствии СОУ (рис.1, *а*), наличии СОУ для скважины 1 (рис.1, *б*), наличии СОУ и варианте перевода его на работу в теплое время года для скважины 1 (рис.1, *в*). На рис.2 приведены среднегодовые данные о мерзлотном состоянии грунта при стабильном климате. При отсутствии СОУ глубина сезонного растепления грунта к 2050 г. составит 1,6 м, что соответствует среднему уровню глубины растепления п-ова Ямал на сегодняшний день. При наличии СОУ глубина растепления грунта также составит 1,6 м. При использовании в варианте перевода СОУ на работу в теплое время года глубина сезонного растепления снизится до 1,4 м. При отсутствии СОУ глубина грунта, ниже которой температура не превышает –1 °С, составит 3,5 м, при наличии СОУ – 2,5 м, а при использовании в варианте перевода

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 272-282
© О.М.Ермилов, А.А.Джалябов, Г.Г.Васильев, И.А.Леонович, 2024

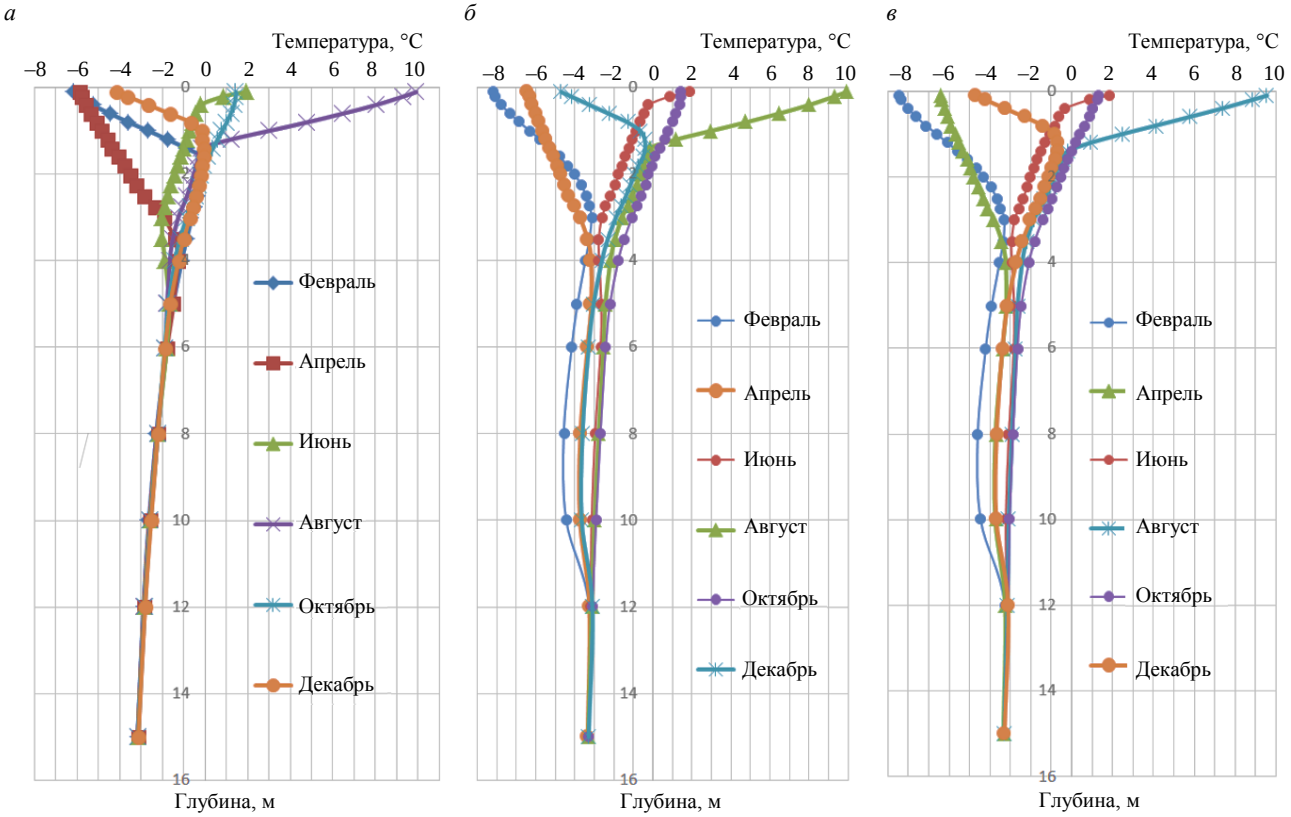


Рис.1. Состояние мерзлого грунта для модели стабильного климата на 2050 г.

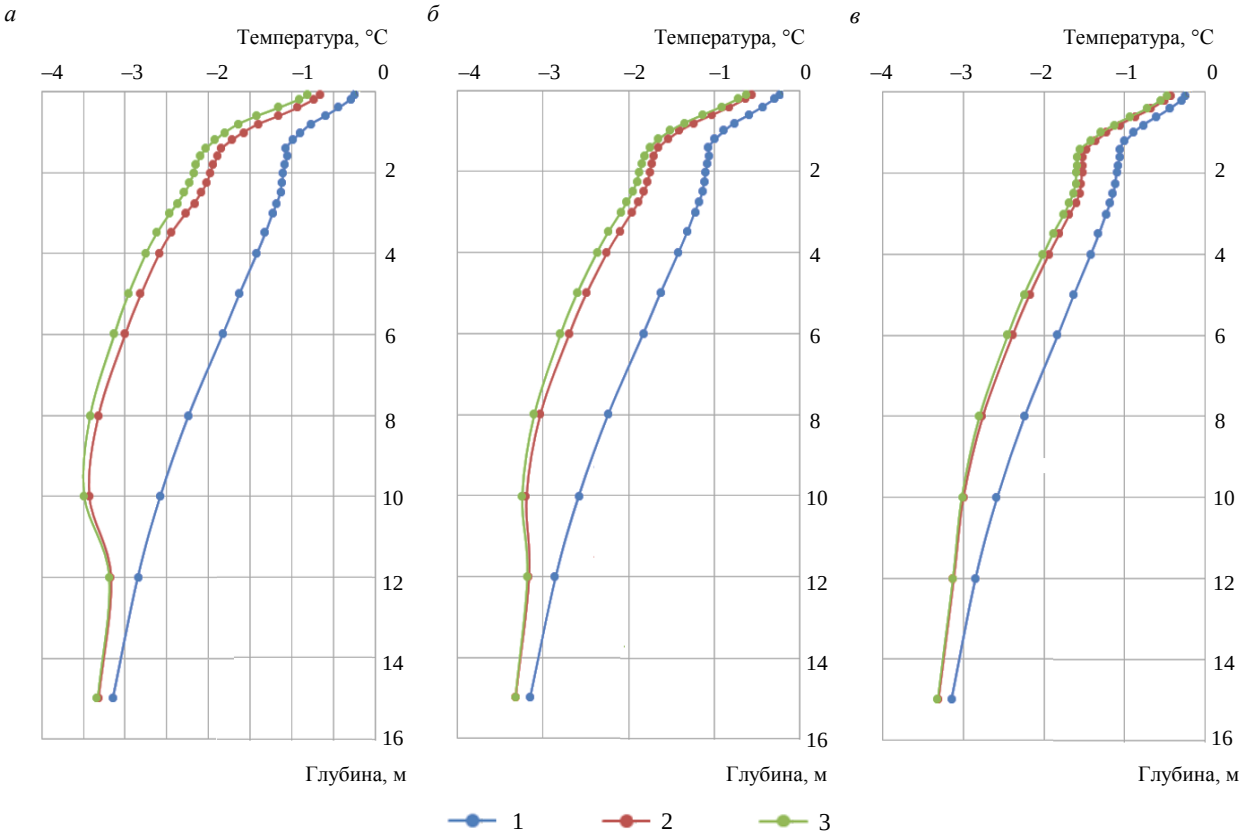


Рис.2. Прогноз среднегодовой температуры грунта на 2050 г. при стабильном климате:
а – термоскважина 1; *б* – термоскважина 2; *в* – термоскважина 3

1 – без СОУ; 2 – при наличии СОУ; 3 – при наличии СОУ и переводе его на работу в теплое время года

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

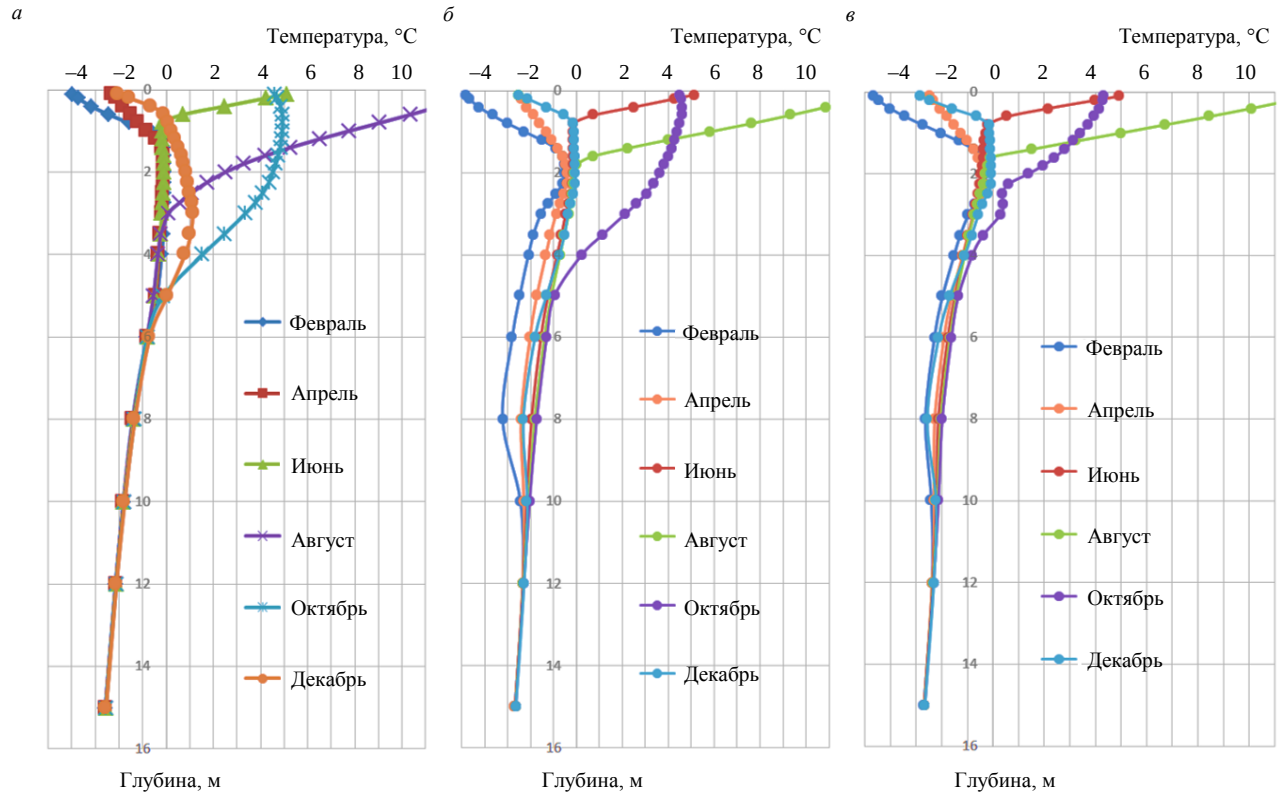


Рис.3. Состояние мерзлого грунта для модели потепления 0,1 °С на 2050 г.

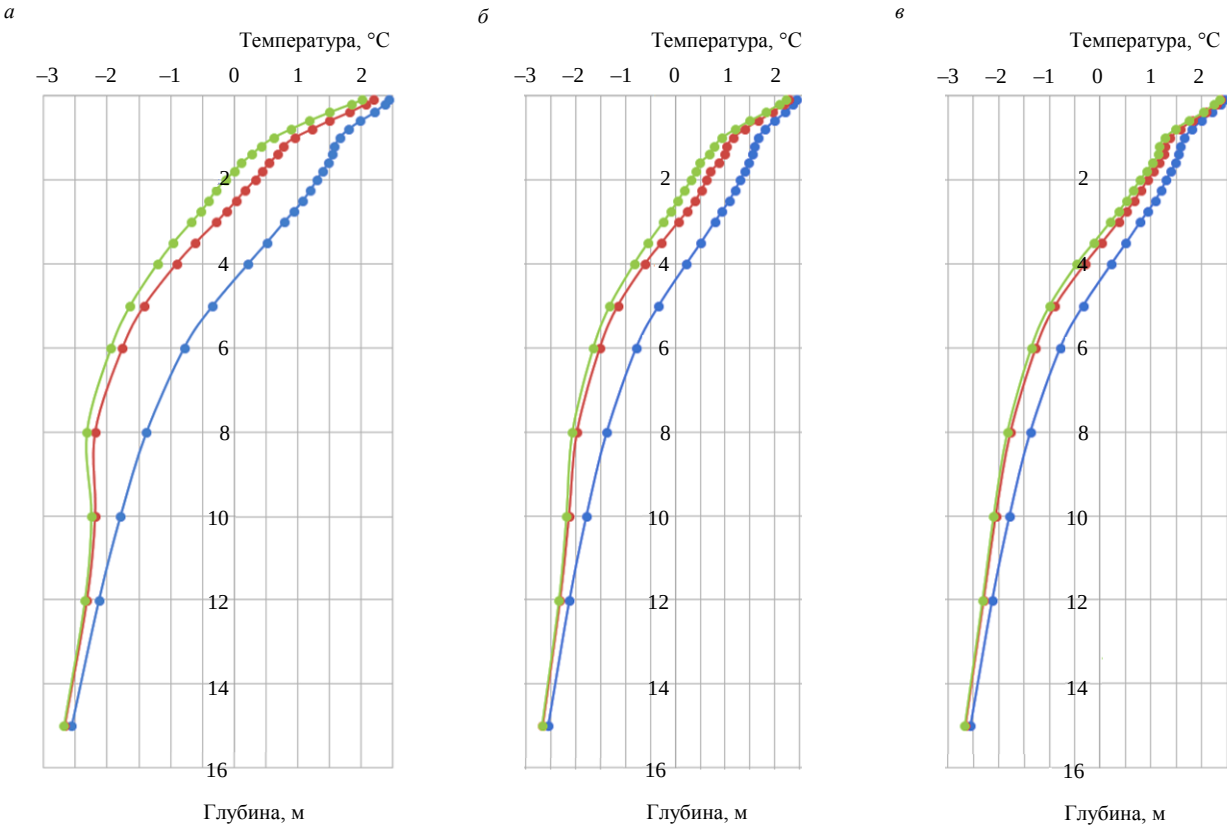


Рис.4. Прогноз среднегодовой температуры грунта на 2050 г. при потеплении 0,1 °С:
а – термоскважина 1; *б* – термоскважина 2; *в* – термоскважина 3
Условные обозначения см. на рис.2

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 272-282
© О.М.Ермилов, А.А.Джалябов, Г.Г.Васильев, И.А.Леонович, 2024

СОУ на работу в теплое время года – 2,25 м. Анализ данных температурных полей показал, что наличие СОУ понижает температуру мерзлого грунта на 1 °С на расстоянии 0,5 м от СОУ, 0,8 °С на расстоянии 1 м и 0,5 °С на расстоянии 2 м. Использование СОУ в варианте перевода на работу в теплое время года понизит среднегодовую температуру мерзлого грунта в диапазоне глубин от 0,8 до 8 м на 0,5 °С на расстоянии 0,5 м от СОУ, 0,1 °С на расстоянии 1 м от СОУ и 0,07 °С на расстоянии 2 м от СОУ. Для стабильного климата эти изменения не носят критический характер, поскольку мерзлотное состояние грунта, достаточное для эффективного функционирования основания, сохраняется при применении только СОУ. Однако даже в этом случае при использовании в варианте перевода СОУ на работу в теплое время года повышается эффективность его применения на 15-20 % в зависимости от расстояния от оси СОУ.

На рис.3 представлены данные по мерзлотному состоянию грунта на 2050 г. при отсутствии СОУ (рис.3, *а*), наличии СОУ для скважины 1 (рис.3, *б*) и переводе СОУ на работу в теплое время года (рис.3, *в*). На рис.4 приведены среднегодовые данные о мерзлотном состоянии грунта при потеплении климата на 0,1 °С. При отсутствии СОУ глубина сезонного растепления грунта к 2050 г. составит 5 м, что значительно превышает средний уровень глубины растепления п-ова Ямал на текущий момент (1,5-2,0 м). При наличии СОУ глубина растепления грунта составит 4 м, при использовании в варианте перевода СОУ на работу в теплое время года глубина растепления грунта снизится до 3 м. При отсутствии СОУ глубина грунта, ниже которой температура не превышает –1 °С, к 2050 г. составит 7 м, а при наличии СОУ – 5,5 м. При использовании в варианте перевода СОУ на работу в теплое время года слой мерзлоты с температурой ниже –1 °С начинается с глубины 4 м, что практически соответствует естественному состоянию мерзлоты (3,5 м).

Анализ данных температурных полей показал, что наличие СОУ понижает температуру мерзлого грунта на 1,5 °С на расстоянии 0,5 м от СОУ, 1 °С на расстоянии 1 м и 0,6 °С на расстоянии 2 м. Использование СОУ в варианте перевода на работу в теплое время года понизит среднегодовую температуру мерзлого грунта в диапазоне глубин от 0,8 до 8 м на 1,4 °С на расстоянии 0,5 м от СОУ, 1 °С на расстоянии 1 м от СОУ и 0,5 °С на расстоянии 2 м от СОУ. В такой модели климата использование в варианте перевода СОУ на работу в теплое время года существенно сказывается на состоянии мерзлоты, повышая эффективность применения СОУ на 34-40 %. Для оценки скорости растепления грунта были проведены расчеты и анализ среднегодовых температур для 2020-2050 гг. Среднегодовая температура по глубине грунта в модели без СОУ снижается на 1 °С каждые 10 лет и к 2050 г. составит меньше –1 °С, поддерживаясь с глубины порядка 7 м. Наличие СОУ снизило скорость растепления примерно на 1 °С, а при переводе СОУ на работу в теплое время года дополнительно понизило температуру на 0,5°С.

На рис.5 представлены температурные поля мерзлотного состояния грунта модели с потеплением 0,1 °С. В условиях ежегодного потепления на 0,25 °С моделирование показывает деградацию мерзлотного состояния грунта на значительную глубину и масштабное растепление как при отсутствии СОУ, так и его наличии. Вариант перевода СОУ на работу в теплое время года не оказывает значимого положительного эффекта для стабилизации мерзлотного состояния грунта.

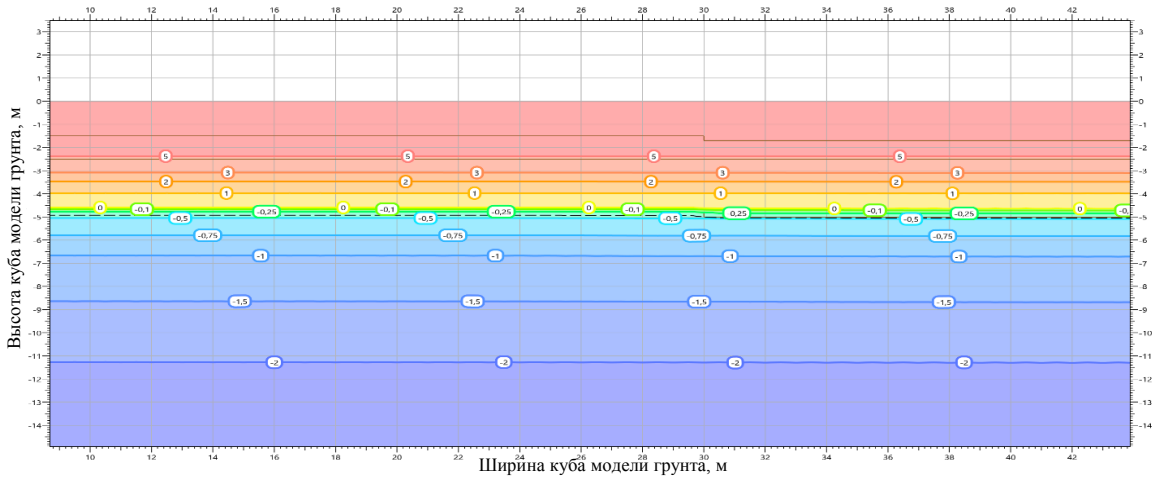
Приведены данные по мерзлотному состоянию грунта на 2050 г. при отсутствии СОУ (рис.6, *а*), наличии СОУ для скважины 1 (рис.6, *б*) и использовании в варианте перевода СОУ на работу в теплое время года (рис.6, *в*). На рис.7 представлены среднегодовые данные о мерзлотном состоянии грунта при потеплении климата на 0,25 °С. При отсутствии СОУ глубина сезонного растепления грунта к 2050 г. составит 9 м, что значительно превышает средний уровень глубины растепления п-ова Ямал на текущий момент (1,5-2,0 м). При наличии СОУ глубина растепления грунта составит 8 м. В варианте перевода СОУ на работу в теплое время года глубина растепления грунта снизится до 6 м. При отсутствии СОУ глубина грунта, ниже которой температура не превышает –1 °С, к 2050 г. составит 11 м, а при наличии СОУ – 10 м. Вариант перевода СОУ на работу в теплое время года не оказал влияние на эту характеристику мерзлотного состояния грунта.

Анализ данных температурных полей показывает, что наличие СОУ снизит температуру грунта на 0,5 °С на расстоянии 0,5 м от СОУ, 0,25 °С на расстоянии 1 м и 0,15 °С на расстоянии 2 м. Вариант перевода СОУ на работу в теплое время года понизит температуру грунта в диапазоне глубин от 0,8 до 8 м на 0,69 °С на расстоянии 0,5 м от СОУ, 0,44 °С на расстоянии 1 м от СОУ

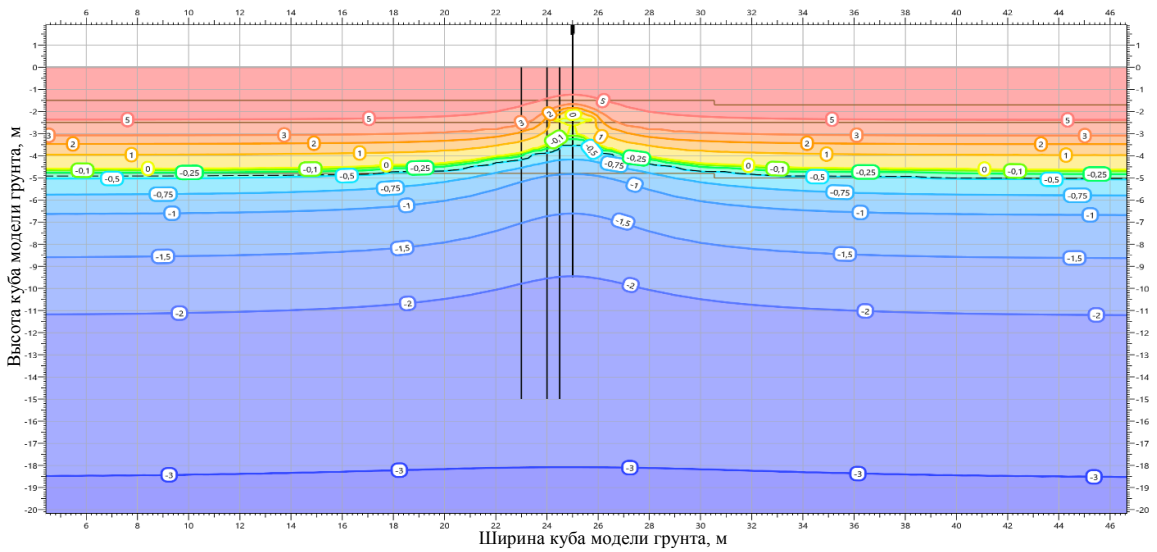
Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN UZQOVK

а



б



в

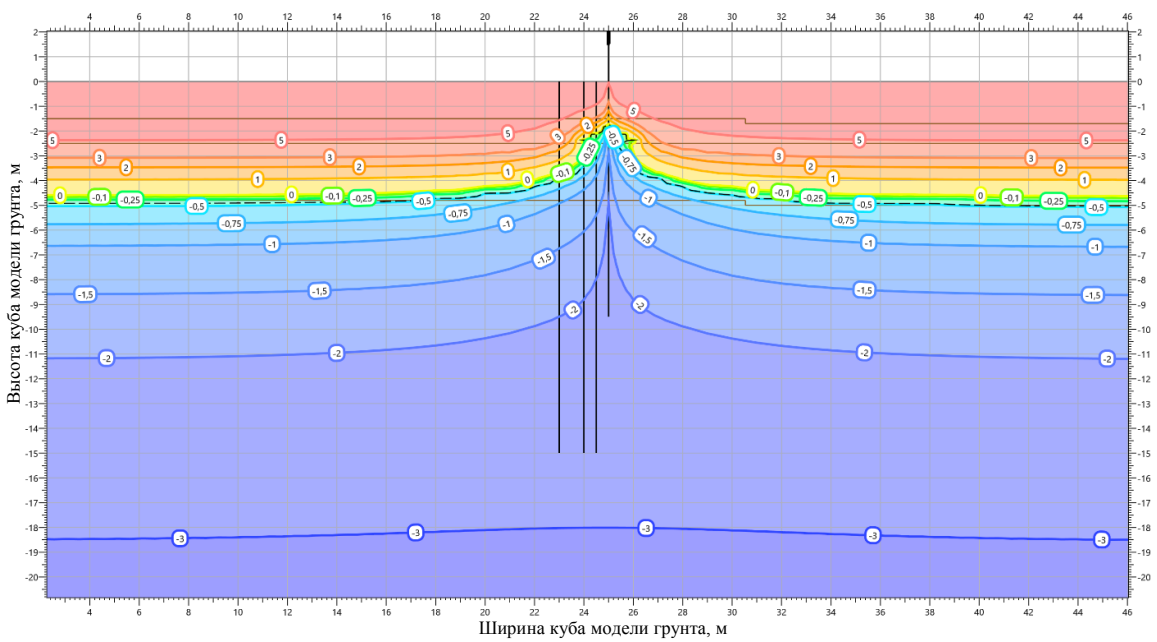


Рис.5. Температурное поле модели на 15.09.2050
По горизонтали указана ось *X*, по вертикали – ось *Z*: *а* – при отсутствии СОУ;
б – при наличии СОУ; *в* – при использовании в варианте перевода СОУ на работу в теплое время года

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 266. С. 272-282
© О.М.Ермилов, А.А.Джалябов, Г.Г.Васильев, И.А.Леонович, 2024

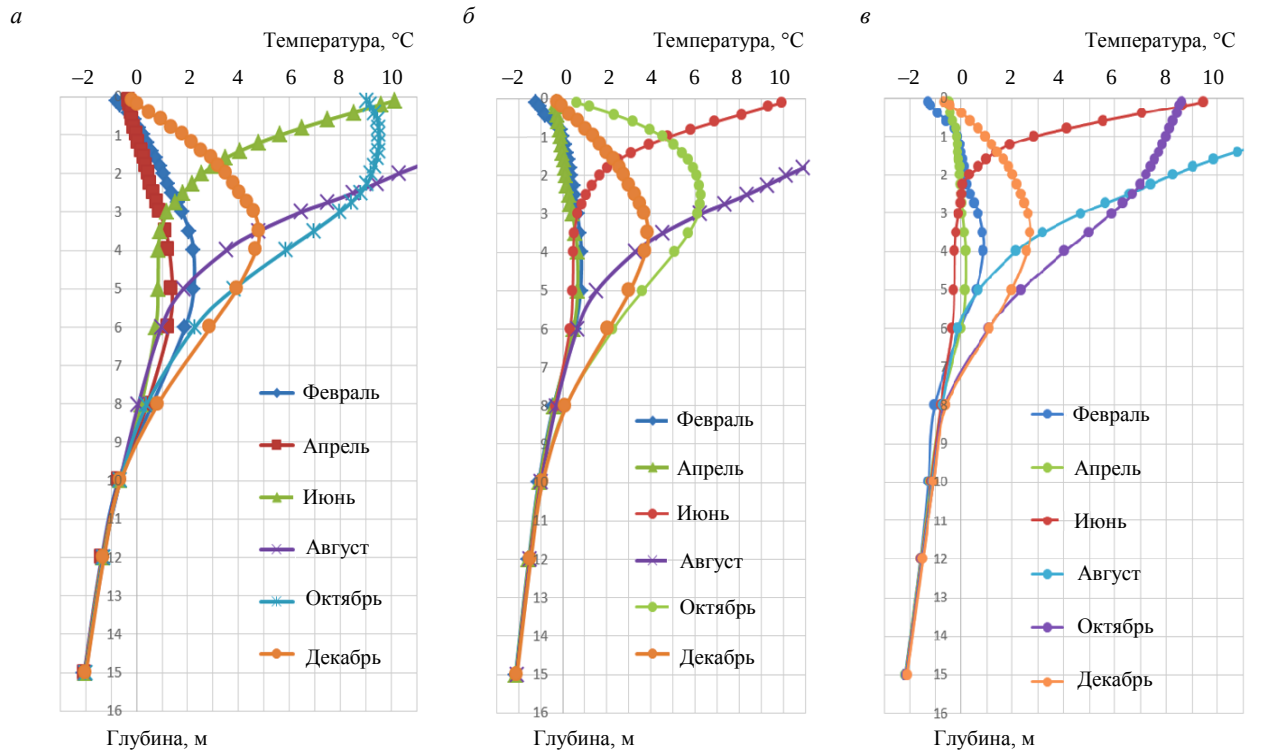


Рис.6. Состояние мерзлого грунта для модели потепления 0,25 °С на 2050 г.

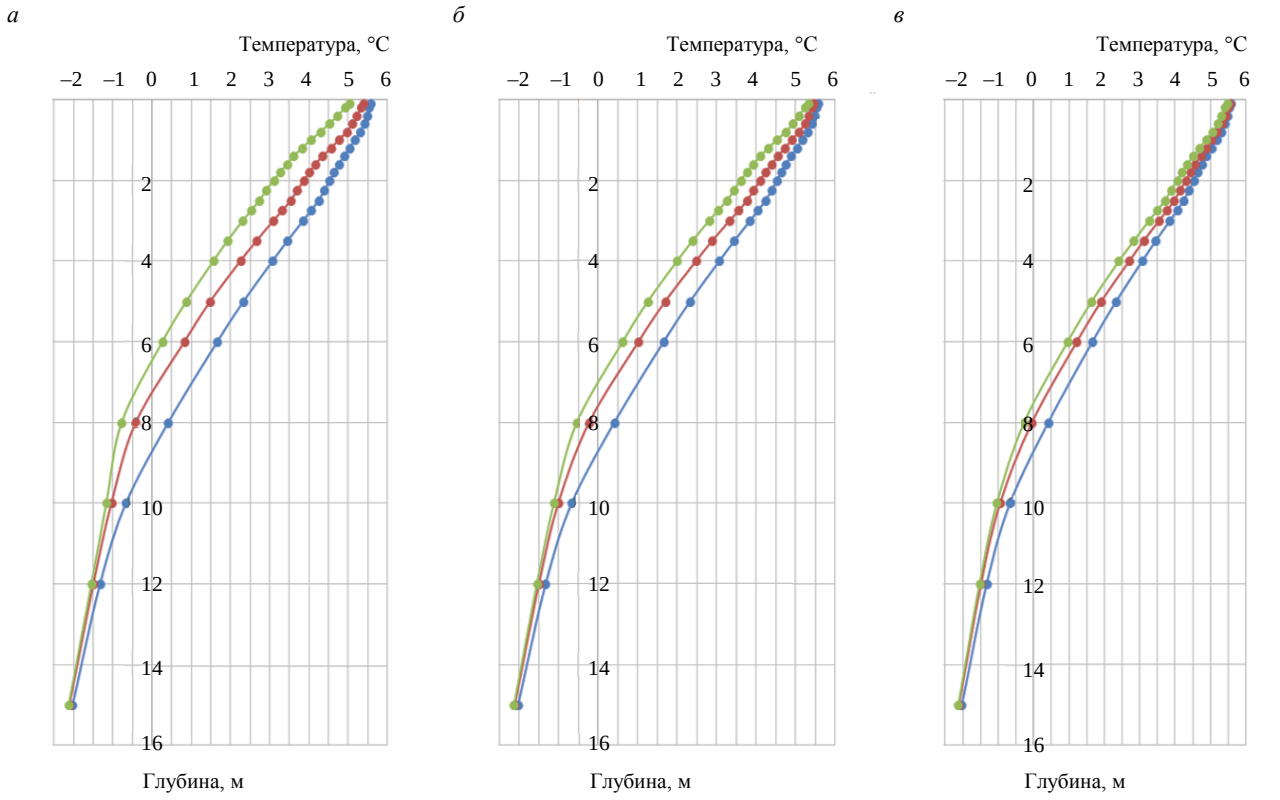


Рис.7. Прогноз среднегодовой температуры грунта на 2050 г. при потеплении 0,25 °С:
а – термоскважина 1; *б* – термоскважина 2; *в* – термоскважина 3
Условные обозначения см. на рис.2

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

и 0,23 °С на расстоянии 2 м от СОУ. При скорости потепления 0,25 °С наличие СОУ фактически не оказало значимого влияния на мерзлотное состояние грунта. В данной модели вариант перевода СОУ на работу в теплое время года почти в два раза повысил эффективность применения СОУ. Тем не менее этого недостаточно для того, чтобы предотвратить масштабное растепление грунта и сохранить мерзлотное состояние грунтов.

Для оценки скорости растепления грунта были проведены расчеты и оценка среднегодовых температур для 2020-2050 гг. Наличие СОУ снизило интенсивность растепления грунта в среднем на 0,5-1 °С, что позволяет на практике дольше эксплуатировать массив грунта в мерзлом состоянии. Скорость потепления 0,25 °С в год уже за 10 лет к 2030 г. приведет к тому, что при наличии СОУ глубина сезонного протаивания увеличится с 1,4 до 2 м, а массив грунта с постоянной температурой ниже –1 °С будет начинаться с глубины 3,5 м вместо 2,75.

Заключение. Расчетные модели, предложенные в работе, позволили провести оценку устойчивости ММГ к процессам потепления и оценить скорость деградации мерзлоты для трех вариантов климата: при наличии СОУ, отсутствии СОУ, а также применении методик повышения эффективности СОУ. Результаты моделирования показали, что эффективность СОУ снижается при любых значениях потепления климата. Модель с трендом потепления 0,1 °С в год демонстрирует масштабное растепление ММГ за 30 лет эксплуатации, что крайне негативно повлияет на несущую способность любых свайных оснований. Наличие СОУ замедляет тенденцию растепления, позволяет почти в два раза сократить масштаб растепления грунта, понизить температуру массива ММГ на 1-1,5 °С, но не останавливает этот процесс. При возможности перевода устройства на работу в летний период удастся сохранить уровень мерзлоты без значимой деградации.

Модель с трендом потепления 0,25 °С в год (для оценки наихудшего сценария) демонстрирует катастрофическое растепление ММГ к 2050 г., СОУ незначительно замедляет такое растепление, позволяя понизить температуру массива ММГ на 0,3-0,8 °С, но не останавливает этот процесс. К 2050 г. в такой катастрофической модели, несмотря на применение СОУ, глубина сезонного растепления грунта увеличится до 8 м при нормальной глубине 1,5 м. Возможность перевода устройства на работу в летний период позволит повысить эффективность СОУ, но не остановить процесс растепления грунта.

Эффективным решением для сохранения ММГ при сценарии с потеплением 0,25 °С в год станут системы принудительного круглогодичного охлаждения, построенные на различных промышленных холодильных машинах. Однако использование их для модернизации существующей инфраструктуры СОУ практически невозможно ввиду значительного количества индивидуально установленных СОУ и большой площади их установки.

В работе выполнено моделирование режима работы СОУ с учетом варианта перевода на работу в теплое время года. Результаты моделирования показали, что такое решение способно повысить эффективность СОУ на 35-40 % и не допустить растепления грунта при наиболее вероятном прогнозе потепления на 0,1 °С в год.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bondar K.M., Minaev V.A., Faddeev A.O.* Cost Estimate for Exploration of Oil and Gas Fields in the Arctic Zone // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1079. № 062069. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/6/062069

2. *Batin E.N., Dedov K.V., Kochegarova N.A.* Arctic: the main directions of exploration and development, role in the oil and gas industry, transport system // Science Time. 2015. № 12 (24). P. 47-51.

3. *Eppelbaum L.V., Kutasov I.M.* Well drilling in permafrost regions: dynamics of the thawed zone // Polar Research. 2019. Vol. 38. P. 1-9. DOI: 10.33265/polar.v38.3351

4. *Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V., Trushko V.L.* Elaboration of a conceptual solution for the development of the Artic shelf from seasonally flooded coastal areas // International Journal of Mining Science and Technology. 2021. Vol. 32. Iss. 1. P. 113-119. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.09.010

5. *Grebnev Y., Moskalev A.* Modelling the accidental oil spills at potentially hazardous facilities in the Arctic zone of Krasnoyarsk Krai // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 816. № 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/816/1/012007

6. *Гилев Н.Г., Зенков Е.В., Поверенный Ю.С. и др.* Оптимизация капитальных вложений в свайные фундаменты при строительстве объектов нефтегазодобычи на многолетнемерзлых грунтах // Нефтяное хозяйство. 2019. № 11. С. 46-49. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-11-46-49

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

7. *Рзаев Ч.Т.* Выбор типа конструкций фундаментов на многолетнемерзлых грунтах // Наука сегодня: глобальные вызовы и механизмы развития: Материалы международной научно-практической конференции: в 2 частях, 26 апреля 2017, Вологда, Россия. Вологда: ООО «Маркер», 2017. Ч. 1. С. 25-27.

8. *Shepitko T.V., Lutsky S.Y., Nak G.I., Cherkasov A.M.* Technological Features of Construction and Reconstruction of Geotechnical Structures in the Arctic Zone // Designs. 2022. Vol. 6. Iss. 2. P. 1-8. DOI: 10.3390/designs6020034

9. *Gendler S., Prokhorova E.* Risk-Based Methodology for Determining Priority Directions for Improving Occupational Safety in the Mining Industry of the Arctic Zone // Resources. 2021. Vol. 10. Iss. 3. P. 1-14. DOI: 10.3390/resources10030020

10. *Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н.* Катастрофический выброс газа в 2020 г. на полуострове Ямал в Арктике. Результаты комплексного анализа данных аэрокосмического зондирования // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 3. С. 362-374. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-362-374

11. *Yakushev V.S., Semenov A.P., Bogoyavlensky V.I. et al.* Experimental modeling of methane release from intrapermafrost relic gas hydrates when sediment temperature change // Cold Regions Science and Technology. 2018. Vol. 149. P. 46-50. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.02.007

12. *Yarmak E.* Permafrost Foundations Thermally Stabilized Using Thermosyphons // OTC Arctic Technology Conference, 23-25 March 2015, Copenhagen, Denmark. 2015. № OTC-25500-MS. DOI: 10.4043/25500-MS

13. *Колосков Г.В., Ибрагимов Э.В., Гамзаев Р.Г.* К вопросу выбора оптимальных систем термостабилизации грунтов при строительстве в криолитозоне // Геотехника. 2015. № 6. С. 4-11.

14. *Абросимов А., Залетаев С.* Охладители грунтов. Конструкции и методы расчета. London, United Kingdom: Palmarium Academic Publishing, 2012. 392 с.

15. *Khrustalev L.N., Emel'yanova L.V.* Determination of the Temperature Coefficient for Calculation of the Bearing Capacity of Permafrost Beds in a Changing Climate // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2013. Vol. 50. № 1. P. 19-23. DOI: 10.1007/s11204-013-9204-1

16. *Васильев Г.Г., Джалябов А.А., Леонович И.А.* Исследование влияния климатического фактора на динамику мерзлотного состояния оснований объектов нефтегазового комплекса // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М.Губкина. 2021. № 3 (304). С. 67-79. DOI: 10.33285/2073-9028-2021-3(304)-67-79

17. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Ed. by H.-O.Pörtner, D.C.Roberts, M.Tignor. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844

18. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / Под ред. В.М.Катцова. СПб: Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова, 2017. 106 с.

19. *Anisimov O., Kokorev V.* Cities of the Russian North in the Context of Climate Change // Sustaining Russia's Arctic Cities: Resource Politics, Migration, and Climate Change. 2016. Vol. 2. P. 141-174. DOI: 10.2307/j.ctvswx6s0.12

20. *Никифорова Н.С., Коннов А.В.* Несущая способность свай в многолетнемерзлых грунтах при изменении климата // Construction and Geotechnics. 2021. Т. 12. № 3. С. 14-24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02

21. *Nikiforova N.S., Konnov A.B.* Influence of permafrost degradation on piles bearing capacity // Journal of Physics: Conference Series. Deep Foundations and geotechnical problems of territories, 26-28 May 2021, Perm, Russian Federation. 2021. Vol. 1928. № 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012046

22. *Стрижков С.Н.* К вопросу о качестве работы сезонно-действующих охлаждающих устройств // Геоинфо: независимый электронный журнал. 2017. URL: http://www.geoinfo.ru/product/strizhkov-sergej-nikolaevich/k-voprosu-o-kachestve-raboty-sezonno-dejstvuyushchih-ohlazhdayushchih-ustrojstv-35150.shtml (дата обращения 15.08.2022).

23. *Преснов О.М., Мелихов В.П., Зайцев С.А., Сливина Д.М.* Возведение свай в условиях вечной мерзлоты // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 2 (116). Ч. 1. С. 41-43. DOI: 10.23670/IRJ.2022.116.2.006

24. *Васильев Г.Г., Джалябов А.А., Леонович И.А.* Исследование температурного режима многолетнемерзлых грунтов основания объектов нефтегазового комплекса, оборудованных сезонно действующими охлаждающими устройствами // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2021. № 4 (124). С. 75-80. DOI: 10.33285/1999-6934-2021-4(124)-75-80

25. *Чжан А.А., Ашпиз Е.С., Хрусталев Л.Н., Шестернев Д.М.* Новый способ защиты мерзлых грунтов основания насыпи от оттаивания // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 3. С. 67-71. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-3(67-71)

26. *Васильев Г.Г., Джалябов А.А., Леонович И.А.* Анализ причин возникновения деформаций инженерных сооружений объектов газового комплекса в криолитозоне // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 377-385. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.6

27. *Loli M., Tsatsis A., Kourkoulis R., Anastasopoulos I.* A simplified numerical method to simulate the thawing of frozen soil // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 173. P. 1-49. DOI: 10.1680/jgeen.18.00239

28. *Weismüller J., Wollschläger U., Boike J. et al.* Modeling the thermal dynamics of the active layer at two contrasting permafrost sites on Svalbard and on the Tibetan Plateau // The Cryosphere. 2011. Vol. 5. Iss. 3. P. 741-757. DOI: 10.5194/tc-5-741-2011

29. *Buslaev G., Tsvetkov P., Lavrik A. et al.* Ensuring the Sustainability of Arctic Industrial Facilities under Conditions of Global Climate Change // Resources. 2021. Vol. 10. № 12. P. 1-15. DOI: 10.3390/resources10120128

30. *Рязанов А.В., Усачев А.А.* Особенности расчета температурного режима многолетнемерзлых грунтов оснований буронабивных свай мостовых переходов // Фундаменты. 2021. № 4 (6). С. 49-51.

31. *Рязанов А.В.* Особенности проектирования фундаментов сооружений на многолетнемерзлых грунтах в условиях потепления климата // Фундаменты. 2021. № 1 (3). С. 10-13.

32. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России / О.Н.Булыгина, В.Н.Разуваев, Л.Т.Трофименко, Н.В.Швец. URL: http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных (дата обращения 06.09.2022).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

33. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621201. Описание массива данных характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР / О.Н.Булыгина, В.Н.Разуваев, Т.М.Александрова. URL: http://meteo.ru/data/165-snow-cover#описание-массива-данных (дата обращения 06.09.2022).

34. *Груза Г.В., Бардин М.Ю., Платова Т.В. и др.* Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. М.: Росгидромет, 2017. 70 с.

***Авторы*: О.М.Ермилов,** *д-р техн. наук, академик РАН, заместитель главного инженера по науке* (*ООО «Газпром добыча Надым», Надым, Россия*), **А.А.Джалябов,** *генеральный директор, https://orcid.org/0000-0002-4269-5555* (*ООО «Газпром добыча Ноябрьск», Ноябрьск, Россия*), **Г.Г.Васильев,** *д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, https://orcid.org/0000-0002-9503-7337* (*РГУ нефти и газа* (*НИУ*) *имени И.М.Губкина, Москва, Россия*), **И.А.Леонович,** *канд. техн. наук, доцент, ned.flander@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9054-1537* (*РГУ нефти и газа* (*НИУ*) *имени И.М.Губкина, Москва, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0