

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ИВПП АЭРОПОРТА НЮРБА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

NUMERICAL MODELING CHANGES OF PERMAFROST CONDITIONS IN THE RECONSTRUCTION OF THE AIRPORT RUNWAY NYURBA IN YAKUTIA

A. Zhirkov,
candidate of engineering sciences,
researcher;
A. Kirillin,
candidate of geological-mineralogical sciences,
researcher;
M. Shatz,
candidate of geophysics sciences,
leading researcher;
M. Sivtsev,
post-graduate student,
engineer;
N. Maksimov,
engineer;
the Melnikov Permafrost Institute,
Siberian branch RAS,
Yakutsk.

The natural and climatic conditions of the area of the airport «Nyurba» in Yakutia are described, the unfortunate combination of which in the runway area led to the development of negative cryogenic phenomena. For maximum cooling of the embankment and the underlying soils, it is recommended that in the next construction season, preliminary, before arranging the foundation of the embankment and soil interface, removal of the snow cover throughout the winter. It is also recommended to create a control (monitoring) system for the state of soils and the development of cryogenic processes to ensure the stability of the runway and airfield facilities. At the moment, one of the preventive measures for a possible reduction in the rate of degradation of frozen strata on the territory of the runway is the removal of snow cover in winter from the surface of the runway and the embankment.

Keywords: numerical modeling, geocryological conditions, thawing depth, negative cryogenic processes, runway, Yakutia.

A. Ф. Жирков,
научный сотрудник;
А. Р. Кириллин,
кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник;
М. М. Шац,
кандидат географических наук,
ведущий научный сотрудник;
М. А. Сивцев,
аспирант,
инженер;
Н. А. Максимов,
инженер;
Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова
СО РАН,
Якутск.

Ключевые слова: численное моделирование, геокриологические условия, глубина протаивания, негативные криогенные процессы, взлётно-посадочная полоса, Якутия.

ропортов следующих населенных пунктов: Олекминск, Нюрба, Мирный, Черский, Жиганск, Хандыга, Белая Гора, Верхневилуйск, Вилюйск, Депутатский, Сангар, Полярный, Усть-Нера, Маган, Якутск и Нерюнгри. Общая сумма выделяемых средств из федерального бюджета региону составляет свыше 38 млрд рублей.

Аэропорт Нюрба находится в Республике Саха в километре от одноименного города. В годы СССР здесь находился один из центров освоения алмазных месторождений. Здесь располагался самый большой вертолетный авиаотряд не только на Дальнем Востоке, но и в Сибири. 80-е годы прошлого века стали периодом максимального развития и процветания Нюрбинского авиапредприятия и его аэропортового комплекса (рис. 1).

Вертолетчики Нюрбы принимали участие в разведке месторождений полезных ископаемых, в строительстве горнодобывающих комбинатов алмазной промышленности, газопроводах Матах-Якутск, Вилюйской ГЭС, высоковольтных линий электропередачи на юге и западе Якутии, в обеспечении зимовщиков полярных станций горюче-смазочными материалами, продовольственными и техническими грузами, в обслуживании сельского хозяйства, работ подразделений МЧС.

Сегодня алмазы уже не добывают, зато здесь производят строительные материалы, а также работают пищевые предприятия. На территории в 19 квадратных километров на 2017 год проживало 9,8 тысяч жителей. Добраться до других населенных пунктов они могут с помощью автомобильной дороги, речной пристани и аэропорта.

Освещаемый объект расположен в г. Нюрба, Нюрбинского района Республики Саха (Якутия). Аэропорт «Нюрба» — один из региональных аэропортов в Якутии, реконструкция которых вошла в «Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры РФ». Всего до 2024 года планируется реконструкция аэ-



Рис. 1. Реконструкция аэропорта «Нюрба». Фото ЯСИА.

Аэропорт связывает Нюрбу с Якутском и Иркутском, он был построен в 1956 году. У взлетно-посадочной полосы грунтовое покрытие. Аэропорт принимает все виды вертолетов, а также самолеты Ан-2, Ан-3, Ан-12, Ан-24, Ан-26, Ан-30, Ан-32, Ан-72, Ан-74, Як-40, Л-410, принадлежащие авиакомпаниям «Полярные авиалинии» и «Якутск». Значение показателя пассажиропотока на 2017 год составило 20,4 тысяч человек.

Грунтовое покрытие ИВПП в значительной степени затрудняет постоянное использование аэропорта, в связи с чем начата его реконструкция. В т.ч. ремонт взлетно-посадочной полосы, обновление здания аэровокзала и служебной территории предприятия. Долгие годы население Нюрбинского района, особенно в летний, весенне-осенний периоды, страдало из-за отсутствия современной взлетно-посадочной полосы. Реконструкция аэропорта должна была начаться в 2016 году, однако в связи с экономической ситуацией в программу развития транспортной системы реконструкция аэропорта была отложена.

И лишь с реализацией «Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года» утвержденного правительством Российской Федерации в 2018 году модернизация аэропорта стала реальностью. Срок завершения работ намечен на конец сентября 2023 года.

Началом реконструкции полосы явилась ее отсыпка, для продолжения функционирования аэропорта и возможности обслуживания воздушных судов. Было произведено укорочение полосы на 550 м и перенос свето-сигнальных огней и дневной маркировки на оставшиеся 1300 м.

15 декабря 2020 г., благодаря слаженной работе всех служб филиала «Аэропорта Нюрба» ФКП «Аэропорты Севера» и в тесном взаимодействии с Нюрбинскими филиалами Авиакомпаний «Полярные авиалинии», «Аэронавигации Северо-Восточной Сибири» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», был успешно произведен взлет-посадка первого регулярного рейса ЯП237/238 по маршруту Якутск-Нюрба-Якутск на укороченную взлетно-посадочную полосу (1300 м).

В период проведения первого этапа работ, аэропорт будет продолжать обслуживание воздушных судов, пассажиров, груза, почты. Детальная характеристика технологических деталей реконструкции аэропорта в задачи данной публикации не входит.

Главные задачи научно-исследовательских работ, проведенных силами сотрудников Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН:

1. Заключение по прогнозу оценки возможности отсыпки переувлажненного грунта в теплый период года и сильнольдистого, переувлажненного мерзлого грунта в зимний период для строительства ИВПП аэропорта Нюрба;

2. Составление рекомендаций по уточнению сроков укладки теплоизолятора под плиты ПАГ ИВПП аэропорта.

Краткая характеристика геокриологических условий района исследований

Обследованный участок расположен на левом берегу реки Вилюй (рис. 2).



Рис. 2. Местоположение участка исследований.

В географическом отношении район целиком относится к юго-восточной окраине Вилюйского плато, представляет наклонную денудационную равнину, которая характеризуется увалистым рельефом с преобладанием обширных пологих склонов, осложненных системой малых и средних рек, неглубокими термокарстовыми западинами.

Район работ характеризуется резко континентальным климатом, продолжительной холодной зимой и коротким жарким летом, с быстрыми переходами от холодного времени к теплу и наоборот. Среднее годовое количество осадков 270 мм, а толщина снежного покрова равна 27 см. Амплитуда между минимальной и максимальной температуры воздуха составляет 97,5°.

Согласно мерзлотно-ландшафтной карте Республики Саха (Якутия) масштаба 1:1500 000 [3] территория исследований расположена в зоне распространения вечномерзлых пород сплошного распространения с тальными породами по тектоническим зонам и под крупными водоемами. Мощность ММП, на территориях их развития, в большинстве случаев варьирует от 100 до 300 м, а среднегодовая температура пород (на глубине нулевых годовых амплитуд) от -1°С до -3°С. Мощность деятельного слоя на различных

участках изменяется от 0,6 до 3,0 м. Тип местности межаласный (рис. 3).



Рис. 3. Фрагмент мерзлотно-ландшафтной карты [3]. Серым прямоугольником выделен участок работ.

По материалам инженерно-геокриологических исследований Института мерзлотоведения СО АН СССР 1988 г. на центральной части ВПП аэропорта Нюрба на глубинах 5-8 м преобладали температуры пород от $-6,2^{\circ}\text{C}$ до $-7,1^{\circ}\text{C}$ (июль 1987 г.). За пределами ВПП на этих же глубинах были зафиксированы температуры от $-1,9^{\circ}\text{C}$ до $-2,8^{\circ}\text{C}$, ниже на глубине 12 м, были обнаружены слои высокотемпературной мерзлоты, с значениями температур от $-0,4^{\circ}\text{C}$ до $-0,5^{\circ}\text{C}$.

Методика исследований

В зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП), одной из основных задач при проектировании зданий и сооружений является обоснованное определение принципа использования многолетнемерзлых грунтов (I или II принцип) [8]. Также необходимо обосновать момент начала строительства. Выбор принципа и начала строительства осуществляется по результатам геокриологического прогноза - теплотехнического прогноза, учитывающего множество факторов, таких как: строение, состав и свойства грунта, метеорологические условия, температура каждого инженерно-геологического элемента до начала строительства, тепловое воздействие от зданий и сооружений в период эксплуатации. При проведении таких прогнозных расчётов в условиях криолитозоны одной из важных задач является определение трёхмерного теплового состояния грунтов в процессе эксплуатации сооружения, т.к. от глубины протаивания грунтов, зависит устойчивость и надёжность сооружения.

Frost 3D Universal [9] (Приложение Б) — программный комплекс для моделирования процессов теплопереноса в многолетнемерзлых грунтах с учётом влияния внешних тепловых воздействий. Этот комплекс позволяет получать научно-обоснованные прогнозы тепловых режимов ММП в условиях теплового влияния трубопроводов, добывающих скважин, зданий, гидротехнических и других сооружений с учетом термостабилизации грунта.

Математическая модель

Расчет нестационарной задачи распространения тепла в трехмерном пространстве [5] в программе Frost 3D Universal основан на широко апробированном уравнении теплопроводности (1.1), в котором учтены фазовые превращения и перенос тепла за счет конвекции:

$$(C(T) + \rho_b L \frac{\partial w_w(T)}{\partial T}) \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-\lambda(T)\nabla T) + C_w u \nabla T = 0, \quad (1.1)$$

где T — температура, $^{\circ}$; $C(T)$ — зависимость объемной теплоемкости грунта от температуры, $\text{Дж}/(\text{м}^3\cdot^{\circ})$; $w_w(T)$ — зависимость количества незамерзшей воды в грунте от температуры, д. е.; ρ — плотность грунта, $\text{кг}/\text{м}^3$; L — удельная теплота фазового перехода, $\text{Дж}/\text{кг}$; t — время, с; $\lambda(T)$ — зависимость теплопроводности грунта от температуры, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ})$; C_w — объемная теплоемкость воды, $\text{Дж}/(\text{м}^3\cdot^{\circ})$; u — вектор скорости фильтрации грунтовых вод, м/с.

В рассматриваемой модели теплопереноса при промерзании-протаивании фазовый переход локализован на поверхности раздела фаз (при определенной температуре). Это принято из-за того, что в конкретном рассматриваемом случае, грунты имеют фоновое (нормальное) содержание количества незамерзшей воды, поэтому проводить расчеты процесса промерзания-протаивания в спектре температур не целесообразно.

Для всех имеющихся в моделируемой области типов грунтов и горных пород, а также материалов заданы соответствующие физические и теплофизические свойства. Также для всех используемых в модели условий теплообмена определены параметры граничных условий. За верхнее граничное условие бралось граничное условие третьего рода (теплообмен по Ньютону) (1.2), где необходимо задать зависимость температуры, коэффициента теплообмена, а также, при необходимости, дополнительного теплового потока от времени:

$$n \times (\lambda \nabla T) = \alpha(t) \times (T_{ext}(t) - T) + q_0(t); \quad (1.2)$$

где α — коэффициент теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ})$; T_{ext} — температура внешней среды, $^{\circ}$; T — температура грунта, $^{\circ}$; q_0 — тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$; t — время, с.

Расчет коэффициента теплопередачи (α) между поверхностью грунта и атмосферой, в зависимости от скорости ветра, осуществляется на основании уравнения Д.А. Куртнера и А.Ф. Чудновского [1].

Моделирование фильтрации грунтовых вод в программе Frost 3D Universal основано на широко апробированном уравнении фильтрации грунтовых вод (1.3), выведенном из закона Дарси [2]:

$$\nabla(-K \nabla H) = 0, \quad (1.3)$$

откуда вектор скорости фильтрации воды в грунте вычисляется по формуле (1.4):

$$u = -K \nabla H, \quad (1.4)$$

где H — гидравлический напор, м; K — коэффициент фильтрации, м/с; u — вектор скорости фильтрации воды.

В качестве гидрологического граничного условия доступно следующее:

✦ величина гидравлического напора, которая вычисляется по формуле (1.5):

$$H = H_{ext}(t), \quad (1.5)$$

где H_{ext} — скорость втекающего потока, м/с.

Решение уравнения теплопроводности в трёхмерной постановке осуществляется численно с помощью явного метода конечных разностей [4]. Конечно-разностный метод является сеточным методом, т.е. расчётная область дискретизируется гексаэдрической сеткой (рис. 4), а решение происходит непосредственно в узлах сетки, для каждой из которых составляется разностное уравнение в соответствии с используемым шаблоном разностной схемы. Получается система линейных уравнений, решение которой позволяет получить необходимый результат в рассматриваемой расчётной области.

Особенности моделирования

Программный комплекс Frost 3D Universal предназначен для оценки теплового влияния различных тепловых источников на ММП: скважин, трубопроводов, зданий и других технических сооружений; т.е. рассматривается конкретно массив грунта, в котором и решается численно уравнение теплопроводности. Влияние всех этих объектов на ММП моделируется через граничные условия, т.е. нет необходимости, моделировать всё сооружение или скважину со всеми её слоями, достаточно лишь задать их тепловое влияние на границе «грунт-объект». Это значит, что задача решается в одном направлении, т.е. определяется, как различные источники тепла влияют на тепловое состояние ММП, но не как ММП влияет на тепловое состояние строительных объектов, сооружений.

Исходные данные

Для расчета температурного режима грунтов рассматривались два профиля A1-A2-A3 и Б1-Б2-Б3 (рис. 4). По материалам инженерно-геологических изысканий грунтовые условия в рассматриваемых профилях практически симметричны и идентичны под ИВПП, поэтому в расчетах позволено использование профиля A1-A2.

По материалам, предоставленным заказчиком, построена расчётная область, которая начинается на поверхности ИВПП и заканчивается на глубине 28 м в ММП (рис. 5).

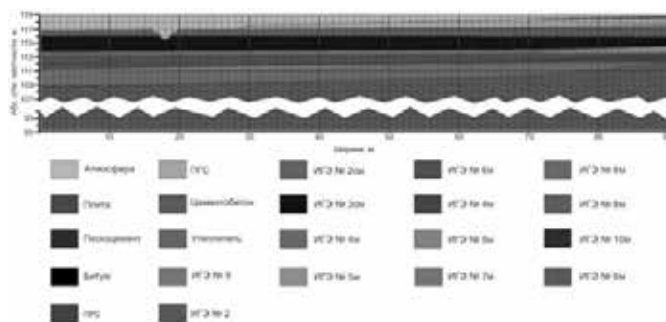


Рис. 5. Расчётная область по профилю A1-A2.

За параметры внешней среды были взяты среднемесячные значения температуры воздуха в районе г. Нюрба за последние 10 лет (табл. 1) [12]. Настоящий выбор обосновывается тем, что данные среднемесячных температур, по данным Якутского УГМС (рассчитанные по норме с 1966 г.) [10], являются заниженными и не описывают настоящие условия изменения климата за последние 40 лет.

Распределение температуры грунтов на участке расчетного профиля представлено в таблице 2 (по фоновым материалам).

В расчетах предполагалось, что тепловой поток из недр не будет оказывать влияния на распределение температур пород, поэтому на нижней границе расчетной области бралось постоянное значение температуры грунта $-1,5^{\circ}\text{C}$ (по материалам заказчика).

В открытой местности использовались граничные условия третьего рода:

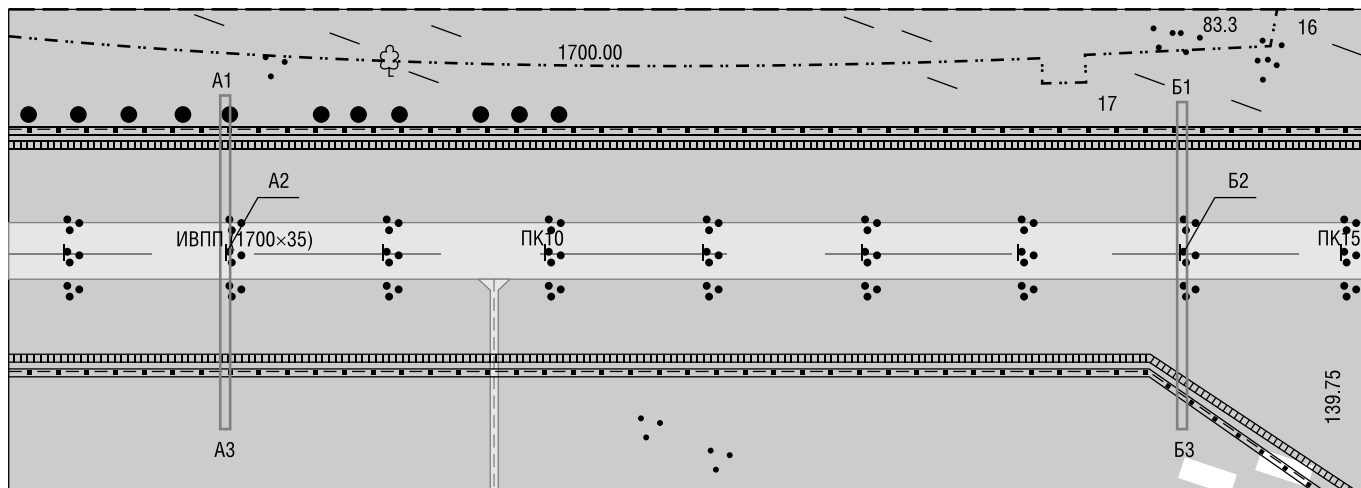


Рис. 4. Профиля для расчета температурного режима грунтов: A1-A2, Б1-Б2.

Таблица 1

Среднемесячные значения температуры воздуха.

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура, °	-32,6	-30,1	-17,1	-3,1	7,2	16,3	17,9	14,1	5,5	-6	-19,6	-34,1

Таблица 2

Распределение температуры грунтов.

№ скв.	Дата замеров	Фактическая глубина, м									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Температура грунта, °С									
Профиль А1-А2											
100	17.11.2014	0,2	0,9	-0,8	-1,4	-1,5	-1,7	-1,7	-		
101	07.07.1987	0,0	-5,0	-6,8	-7,4	-7,1	-6,6	-5,8	-5,0	-4,0	-3,0
102	17.11.2014	-0,1	-0,2	-1,4	-1,5	-1,8	-1,7	-	-		
Профиль Б1-Б2											
118	17.11.2014	-0,4	1.5	1.1	0.4	-0.3	-0.7	-	-		
119	07.07.1987	0,0	-5,0	-6,8	-7,4	-7,1	-6,6	-5,8	-5,0	-4,0	-3,0
120	17.11.2014	-0.6	0.2	-0.7	-1	-1	-1.5	-	-		

Таблица 3

Высота снежного покрова (за последние 10 лет).

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Высота, м	0.29	0.36	0.38	0.25	0.05	-	-	-	0.02	0.05	0.14	0.22

✧ температура воздуха (табл. 1);

✧ снежный покров (табл. 3).

Высота снежного покрова в расчетах учитывалась для условий г. Нюрба за последние 12 лет по метеоданным [12]. Теплопроводность снега рассчитывалось по формуле Б.В. Проскурякова [9].

Физические и теплофизические свойства материалов (грунтов) представлены по данным инженерно-геологических изысканий и проектной документации: объёмная теплоёмкость (C°) которых варьирует в талом состоянии от 890 до 2660 КДж/(м³·°), в мерзлом 870-2180 КДж/(м³·°); теплопроводность (λ) варьирует в талом состоянии от 0,74 до 2,16 Вт/(м·°), в мерзлом от 0,88 до 2,39 Вт/(м·°); плотность (ρ) скелета грунта — от 790 до 1640 кг/м³; суммарная влажность (W_{tot}) — от 0,06 до 0,64 д.е.

Результаты исследований

Используя вышеупомянутые исходные данные была сконструирована расчетная область (физическая модель) с параметрами: длиной — 90 м; высотой — 28 м. С целью получения более кондиционных данных расчетов бралась наклонная плоскость (на основе абсолютных отметок) с высотой насыпи от 0,9 м до 1,0 м. Расчетная область представляет собой часть ИВПП (половина от осевой части профиля), включающая: плиту ПАГ-14 (по представленной конструкции); грунтовое сопряжение; водоотводную канаву и грунтовую часть за пределами ИВПП.

При геокриологическом прогнозе рассматривалась одна разновидность конструкции ИВПП — насыпь с теплоизолятором только под плитой ПАГ-14. Эта конструкция была смоделирована по профилю А1-А2 (см. рис. 4.1). Профиль А1-А2 представлен низкотемпературными, относительно территории данного объекта, мерзлотными условиями где на глубинах от 3,2 до 5,5 метров залегают маломощные (от 0,5 до 1,5 м) сильнольдистые отложения.

С целью прогноза изменения геокриологических условий, с учётом сроков строительства были взяты следующие варианты и сценарии соответственно:

Вариант	Сценарий
1.1.	Строительство грунтового сопряжения проводится в зимний период и заканчивается в апреле без тренда изменения температуры воздуха
1.2.	Строительство грунтового сопряжения проводится в зимний период и заканчивается в апреле с трендом изменения температуры воздуха
1.3.	Строительство грунтового сопряжения проводится в зимний период и заканчивается в апреле с экстремальным трендом изменения температуры воздуха
2.1.	Строительство грунтового сопряжения проводится в летний период и заканчивается в сентябре без тренда изменения температуры воздуха
2.2.	Строительство грунтового сопряжения проводится в летний период и заканчивается в сентябре с трендом изменения температуры воздуха
2.3.	Строительство грунтового сопряжения проводится в летний период и заканчивается в сентябре с экстремальным трендом изменения температуры воздуха
3.1.	Строительство грунтового сопряжения с использованием сильнольдистого мерзлого грунта проводится в зимний период и заканчивается в апреле без тренда изменения температуры воздуха
3.2.	Строительство грунтового сопряжения проводится в зимний период и заканчивается в апреле без тренда изменения температуры воздуха и без снежного покрова на всей поверхности ИВПП и насыпи
3.3.	Строительство грунтового сопряжения проводится в летний период и заканчивается в сентябре без тренда изменения температуры воздуха и без снежного покрова на всей поверхности ИВПП и насыпи
4.1.	Укладка теплоизолятора в феврале без тренда изменения температуры воздуха
4.2.	Укладка теплоизолятора в феврале с трендом изменения температуры воздуха
4.3.	Укладка теплоизолятора в феврале с экстремальным трендом изменения температуры воздуха
5.1.	Укладка теплоизолятора в марте без тренда изменения температуры воздуха
5.2.	Укладка теплоизолятора в марте с трендом изменения температуры воздуха
5.3.	Укладка теплоизолятора в марте с экстремальным трендом изменения температуры воздуха

Сценарии «без тренда изменения температуры воздуха» означают с настоящими климатическими данными без каких-либо изменений. А в случаях где указано «с трендом изменения температуры воздуха» следует понимать сценарий с наблюдаемым трендом в настоящее время. Существующий тренд взят из анализа изменения среднегодовой температуры грунтов (для идентичных ландшафтных условий) с 1966 г. и составляет $0,05^{\circ}\text{C}/\text{год}$ ($0,5^{\circ}\text{C}/10$ лет) [6, 7].

Учет изменения солнечной инсоляции, как показали исследования значителен [11] и может приводить к разности температуры поверхности земли (в среднем за теплый период года) на 7°C . Поэтому варианты 1.3, 2.3, 4.3 и 5.3 были взяты за экстремально возможные условия (плюс 6°C , 8°C , 8°C , 6°C к среднемесячным значениям температуры воздуха май-сентябрь).

В расчете учитывался снежный покров (табл. 4), за исключением поверхности ИВПП, где предположительно снег счищается. Сроки строительства выше названных профилей меняются в зависимости от возведения грунтового сопряжения.

Во всех сценариях температурное распределение грунтов и возводимых насыпей одинаково (см. таблицу 2). Снежный покров отсутствует только над плитой ПАГ-14 кроме вариантов 3.2. и 3.3. Прогноз выполнен на 15 лет с 2021 по 2036 год.

Результаты расчетов глубины протаивания приведены по 3 выбранным участкам: 1 — юго-восточная часть от ИВВП на грунте; 2 — юго-восточная часть от плиты на насыпи; 3 — под плитой (рис. 6).

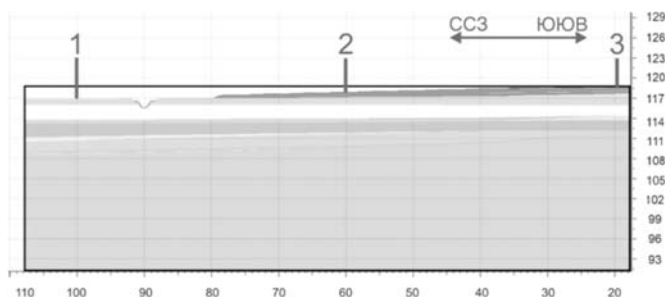


Рис. 6. Схема расположения участков замера глубины протаивания по профилю А1-А2.

По результатам численного моделирования были построены графики изменения фронта протаивания за 15 лет по участкам 2 и 3 и вариантам (1.1., 2.1.; 1.2., 2.2.; 1.3., 2.3.; 1.1., 3.1, 3.2.) (рис. 7).

В результате, вне ИВПП в грунтах наблюдается практически идентичная динамика глубины протаивания, не более 1,74 м.

Под плитой глубины протаивания идентичны и варьируют в пределах 1,00-1,15 м. Это объясняется наличием теплоизолирующего слоя под плитой на этой глубине. И только в случаях с наихудшим трендом доходят до значений 1,64 м.

Наибольшее протаивание грунтов и его различие по всем сценариям, наблюдается под насыпью (грунтовое сопряжение). Здесь максимальное протаивание наблюдается в вариантах 2.1., 2.2. и 2.3. (строительство грунтового сопряжения в летний период). Минимальные протаивания наблюдаются, как и предполагалось, при I принципе строительства (вариант 1.1).

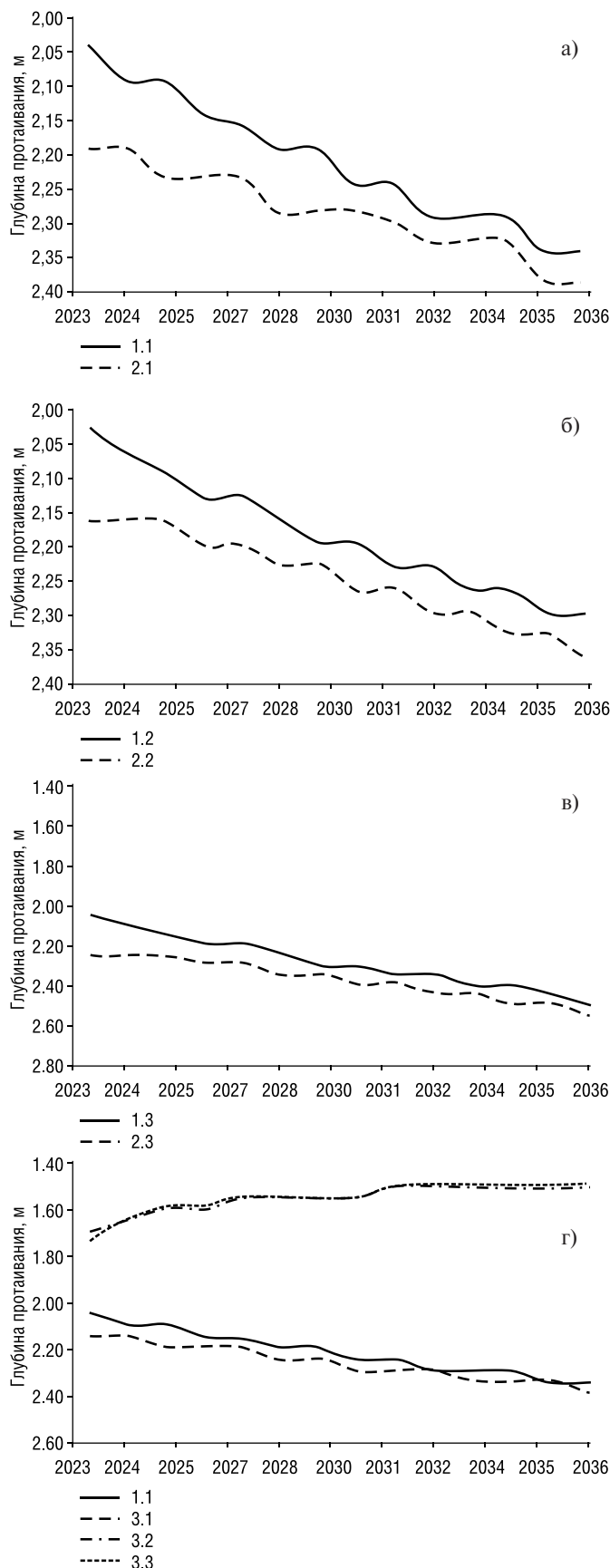


Рис. 7. Изменение фронта промерзания на 2 участке профиля А1-А2 за 15 лет.

Во всех трех вариантах изменения температуры воздуха разница глубины протаивания между разными вариантами

строительства грунтового сопряжения в зимний и летний период по двум профилям изменяется от 4 до 14 см, что в общем-то невелико. На пятый год эта разница сокращается и составляет 5-11 см. На основании этого, считаем, что возведение грунтового сопряжения в летний период возможно.

Также были рассмотрены варианты расчистки снежного покрова на всей поверхности насыпи в случаях строительства грунтового сопряжения в летний и зимний период (варианты 3.2. и 3.3.). Снег чистился постоянно, с начала строи-

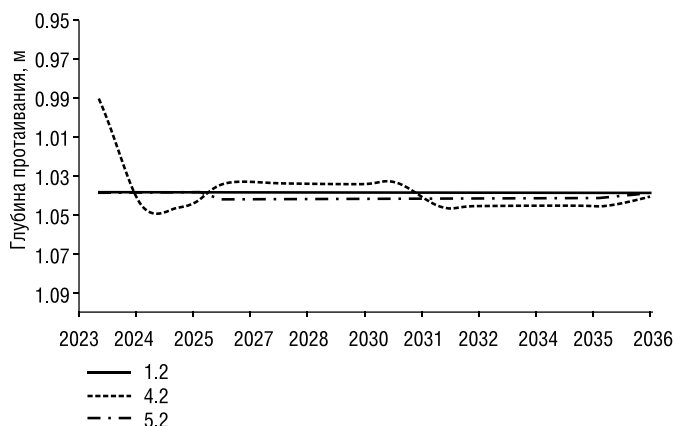


Рис. 8. Изменение фронта промерзания на 3 участке (под плитой) за 15 лет, при разных сроках укладки теплоизолятора (февраль - 4.2; март - 5.2; апрель).

Вариант 2.2

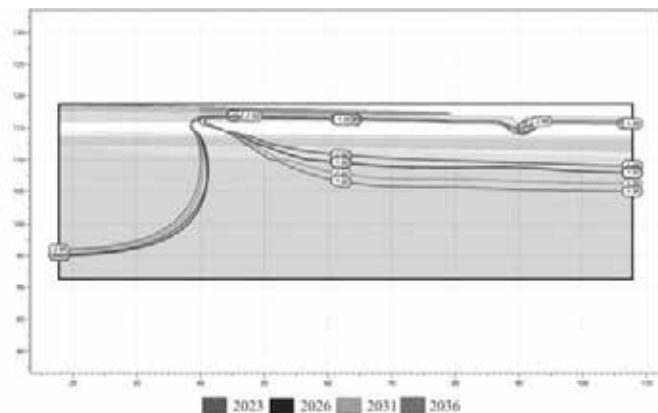


Рис. 9. Температурное распределение на март 2023-2036 гг.

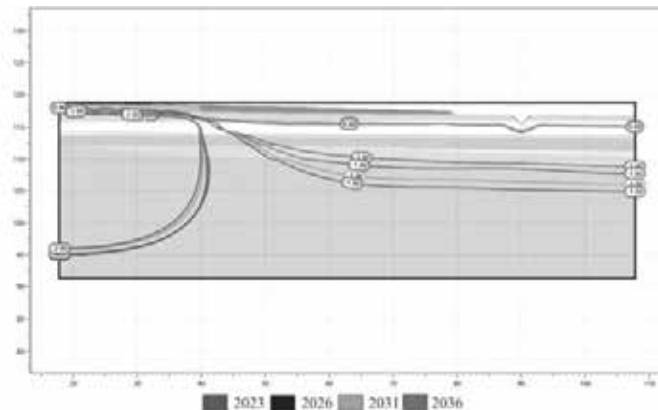


Рис. 10. Температурное распределение на сентябрь 2023-2036 гг.

тельства до конца расчётного периода. В этом случае расчеты показывают уменьшение глубины протаивания с 1,7 м (начало расчетного периода) до 1,5 м (конец расчетного периода) (см. рис. 7з). Из этого следует, что мероприятия по расчистке снега на всей поверхности ИВПП и грунтового сопряжения вполне эффективны и могут помочь сохранить устойчивость сооружения и охладить грунты основания.

С целью оценки срока укладки теплоизолятора были произведены расчеты по трем сценариям. Первый сценарий предполагает укладку теплоизолятора в феврале (варианты 4.1-4.3), второй — укладку теплоизолятора в марте (5.1-5.3) и третий сценарий укладка теплоизолятора в апреле (варианты 1.1-1.3, 2.1-2.3, 3.1-3.3). Выбор таких сценариев обосновывается тем, что укладка теплоизолятора должна производиться в момент максимального охлаждения грунтов (рис. 8).

Из этих результатов видно, что укладку теплоизолятора целесообразно проводить с начала марта до середины апреля.

Изменения температурного режима грунтов по всем сценариям представлены на рисунках 9-12.

Заключение

В процессе прогноза были выполнены 15 расчетов, которые производились с учетом фактического геологического строения, физических свойств грунтов с учетом фазовых переходов воды в грунтовом основании. Расчетный период составлял 15 лет.

Вариант 3.3

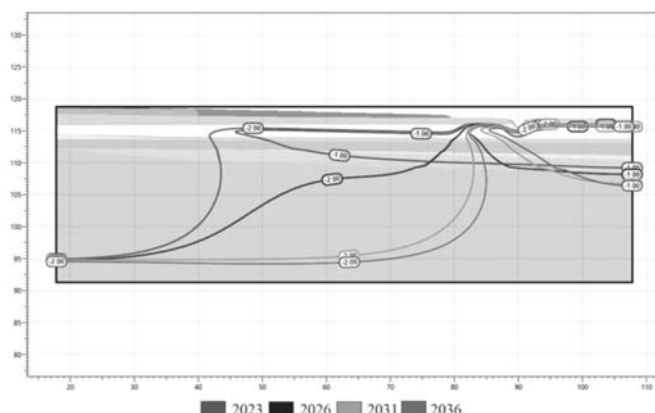


Рис. 11. Температурное распределение на март 2023-2036 гг.

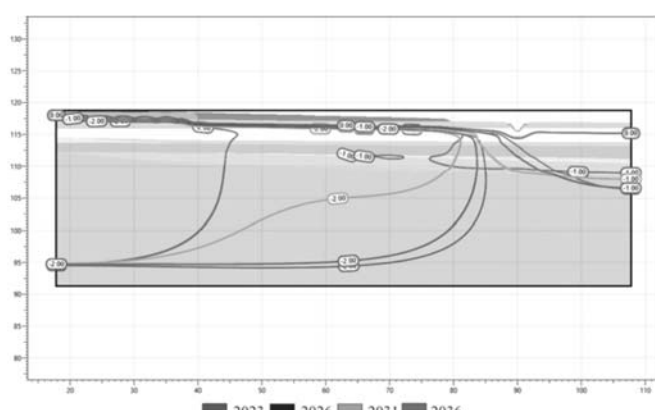


Рис. 12. Температурное распределение на сентябрь 2023-2036 гг.

По результатам численного моделирования изменения геокриологических условий на период 15 лет, возведение грунтового сопряжения в летний период возможно. Такое решение обосновывается относительно малой разницей глубины протаивания при вариантах строительстве грунтового сопряжения в летний и зимний период.

Оценки срока укладки теплоизолятора под плитами ПАГ-14 показали, что целесообразно проводить укладку теплоизолятора в период с начала марта до середины апреля. Это основывается достижением в этот период максимального запаса холода в грунтах.

Территория аэропорта Нюрба имеет сложные геокриологические условия и орографическое положение. Изменение динамики и периодов выпадения аномальных атмосферных осадков, а также аномально теплые зимние периоды, которые не учитываются в модели, могут привести к серьезным последствиям и нежелательному развитию криогенных процессов.

Для максимального охлаждения насыпи и подстилающих грунтов рекомендуется, в следующем сезоне строительства

предварительное, перед обустройством основания насыпи и грунтового сопряжения, удаление в течение всей зимы снежного покрова.

Учитывая происходящие в мире климатические изменения нами рекомендуется создание системы контроля (мониторинга) за состоянием грунтов и развитием криогенных процессов, для обеспечения устойчивости ВПП и аэродромного хозяйства. Это может быть достигнуто оборудованием для специальных наблюдений 3-5 скважин и осуществлением контроля (геофизическими методами) за состоянием ключевых участков.

В настоящий момент, одним из превентивных мероприятий возможного сокращения темпов деградации мерзлых толщ на территории ВПП является удаление снежного покрова в зимний период с поверхности ВПП и насыпи.

Реконструкция ИВПП аэропорта начата и успешно продолжается. Несомненно, что после ее завершения эффективность работы объекта, а значит и вклад в народное хозяйство республики существенно возрастут. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Куртнер Д.А. Чудновский А.Ф. Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте - л: Гидрометеоздат, 1969
2. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. Москва: Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2009. 88 с.
3. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1:1 500 000 / Ред. М.Н. Железняк. - Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. - 4 у.и.л.
4. Самарский А.А. Теория разностных схем. 3-е-е изд. Москва: Наука, 1989. 616 с.
5. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. Москва: Научный мир, 2003. 316 с.
6. Скачков Ю.Б. Обзор современных изменений климата и природной среды в Республике Саха (Якутия) / Обзор современных изменений климата и природной среды в Республике Саха (Якутия). Якутск, 2010 г. С. 1-6.
7. Скачков Ю.Б. Тенденции изменения климата Центральной Якутии на рубеже XX-XXI вв. / Материалы Международной научной конференции «Региональный отклик окружающей среды на глобальные изменения в Северо-Восточной и Центральной Азии». Иркутск. 2012. С. 236-238.
8. СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с Изменением N1). Москва. 2013.
9. Специализированный программный комплекс Frost 3D. Сертификат соответствия № РОСС RU.НА36.Н04808, выданный центром сертификации программной продукции в строительстве.
10. Справочник по климату СССР, вып. 24, ч. 1, Температура воздуха. - Якутск, 1989 г, с. 545.
11. Petr P. Permyakov, Aleksandr F. Zhirkov, Stepan P. Varlamov, Pavel N. Skryabin, Georgy G. Popov Numerical Modeling of Railway Embankment Deformations in Permafrost Regions, Central Yakutia. Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2, 2020. pp 93-103. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_11.
12. <https://rp5.ru/>.



ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

ОТ ПРОИЗВОДИТЕЛЯ



ООО "Геомар Недра", 127521, Москва, 17-й проезд Марьиной рощи, д.9. Тел./факс (495) 618-7001, 618-0510, e-mail: geomarnedra@mail.ru