

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 6. С. 152–168.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (6): 152–168.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.644.2:620.193.4

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-152-168

EDN: WIGSTF

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СВАЙНОГО ОСНОВАНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

Петр Владимирович Бурков^{1,2}, Александр Эдуардович Волков²

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия,

²Национальный исследовательский
Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Аннотация. Актуальность. Одной из основных проблем, связанных с эксплуатацией строительных сооружений на поверхности в пределах криолитозоны, является деформация опорных систем вследствие изменения геометрических параметров грунта. Применяемые сегодня методы оценки технического состояния зданий, сооружений и опорных систем не универсальны. Одним из важных показателей при эксплуатации зданий и сооружений, позволяющих определить техническое состояние системы «многолетнемерзлый грунт – свайное основание – сооружение», является амплитуда колебаний опорной конструкции.

Цель исследования: проведение всесторонней оценки надежности свайного основания в Арктической зоне Российской Федерации.

Для сбора данных об условиях в реальном времени использовались современные методы мониторинга и дистанционного зондирования.

Результаты. Произведено численное моделирование, позволяющее оценить долгосрочные тенденции в изменении метеорологических параметров и их влияние на свайные основания. Разработаны новые методы и технологии для повышения устойчивости свайных конструкций в условиях морозного климата и перманентного мерзлотного грунта.

Основные результаты данного исследования могут быть применены при эксплуатации и проектировании зданий и сооружений в условиях постоянной мерзлоты. Более того, эти результаты могут быть использованы для разработки новых технологий и техни-

ки, способных увеличить эффективность работы в нефтегазовой отрасли и других областях, связанных с использованием инженерных сооружений в Арктической зоне России.

Ключевые слова: надежность, свайный фундамент, оценка температурного поля, численный эксперимент, многолетний мерзлый грунт

Для цитирования: Бурков П.В., Волков А.Э. Оценка надежности свайного основания в Арктической зоне РФ // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 152–168. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-152-168. EDN: WIGSTF

ORIGINAL ARTICLE

RELIABILITY OF PILE FOUNDATIONS IN THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION

Petr V. Burkov^{1,2}, Aleksandr E. Volkov²

¹Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract. One of the main problems associated with the operation of building structures in permafrost conditions, is the deformation of support systems due to changes in soil geometric parameters. The methods used today for assessing the health of buildings and support systems are not universal. One of the important indicators during the buildings operation, which allows us to determine the health of the permafrost soil–pile foundation–structure system, is the vibrational amplitude of the supporting structure.

Purpose: The aim of this work is to conduct a comprehensive analysis of the pile foundation reliability in the Arctic zone of the Russian Federation.

Methodology/approach: Modern monitoring and remote sensing technologies are used to collect the real-time data. Numerical modeling was carried out to assess long-term trends in changes in meteorological parameters and their impact on pile foundations. New methods and technologies are developed to improve the stability of pile structures in permafrost conditions and permanently frozen soil.

Practical implications: The obtained results can be used in design and operation of buildings in permafrost conditions. Moreover, these results can be used to develop new technologies and equipment for improving the performance in the oil and gas and other industries relating to engineering structures in the Arctic zone of Russia.

Keywords: reliability, pile foundation; temperature field assessment; numerical experiment; permafrost conditions

For citation: Burkov P.V., Volkov A.E. Reliability of pile foundations in the Arctic zone of the Russian Federation. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (6): 152–168. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-6-152-168. EDN: WIGSTF

Введение

Один из самых значимых аспектов процесса теплопередачи заключается в расчете потерь тепла зданиями. Моделирование температурных показателей в зданиях и окружающих его слоях почвы позволяет определить количество тепла, утраченного через стены, крышу и пол на протяжении года. Свободное движение тепла при этом описывается системой уравнений конвекции. Решению аналитических и числовых уравнений посвящено множество исследова-

ний [1, 4, 7, 10, 11, 12]. Для моделирования сложных процессов конвекции тепла многие исследователи используют упрощенные допущения, которые облегчают математическое описание этих процессов и их решение [2, 3, 7, 8]. Решение краевых задач в трех измерениях и сложной геометрии – прикладная проблема, требующая использования неоднородных расчетных сеток с малыми интервалами для учета геометрических факторов. В настоящее время существует множество вычислительных программ различного уровня абстракции, предназначенных для моделирования физических процессов, описываемых частными производными. Одной из них является FEniCS – вычислительная платформа, основанная на методе конечных элементов, которая специализируется на решении краевых задач на основе дифференциальных уравнений. Однако стоит отметить, что данные методы имеют ограничения и применимы не во всех ситуациях [13].

Возможности этой платформы включают использование различных библиотек, таких как PETSc, Trilinos/Epetra, uBLAS и MTL4, для решения линейных алгебраических задач. Кроме того, платформа автоматизирует процесс решения и нелинейных задач. Она также поддерживает параллельные вычисления и предлагает использование различных типов конечных элементов, включая прерывистые методы Галеркина и векторные элементы. Платформа доступна для операционных систем Linux, Windows и Mac OS [14].

Аппроксимация во времени включает использование стандартной неявной схемы. Эта схема позволяет решить проблему свободной конвекции и аппроксимировать атмосферный поток во времени.

Основой алгоритма расчета является метод конечных элементов, который учитывает геометрию и усложнение моделируемого объекта. Таким образом, математические модели, основанные на уравнениях теплопроводности, используются для описания сложных процессов теплообмена. Эти модели учитывают фазовый переход поровой воды (вода-лед) и позволяют моделировать климатический режим грунта [14, 15].

Математические модели, основанные на уравнениях теплопроводности, применяются для количественного анализа теплообмена не только фазового перехода в породе (вода-лед), но и для моделирования глобального режима грунта. Для решения задач свободной конвекции используется приближение Буссинеска – алгоритм расчета, основанный на методе конечных элементов, полностью учитывающий геометрию и комплексирование моделируемого объекта. В данных числах также применяется стандартная неявная схема для временной аппроксимации [5, 6, 9].

Постановка задачи, методы исследования и эксперимент

В пределах исследуемого участка находятся многолетнемерзлые породы с предполагаемой мощностью от 30 до 50 м и среднегодовой температурой грунта $-1,7$ °С. Для выполнения теплотехнического расчета теплофизические характеристики грунта вокруг опоры газопровода были определены согласно табл. 1 и 2.

Тепловые свойства и теплопроводность почвы можно описать как функцию ее температуры. Для этого был использован надземный трубопровод, который находился на высоте не менее 1,6 м над землей. Также были использова-

ны подпорки для трубопроводов, изготовленные из двух стоек с траверсами из прокатного профиля. Сам трубопровод представлял собой трубу диаметром 325 и 377 мм соответственно. Основания свайных опор были выполнены из металлических труб соответствующего размера. Жесткие неподвижные опоры имели форму неизменяемых двухстоечных конструкций на свайном фундаменте, способных воспринимать горизонтальные нагрузки. Компенсаторы также имели двухстоечную конструкцию с траверсами из прокатного профиля, а расстояние между опорами и их количество определялись диаметром исследуемого газопровода или нефтепровода и длиной компенсатора (рис. 1).

Таблица 1

Особенности климата в регионе добычи

Table 1

Climatic conditions in the oil field

Название показателя материала	Наименование материала			
	Суглинок	Супесь	Песок	Торф
Температура, °C	–1,6	–1,6	–1,3	–1,1
Мощность грунтов, м	14,2	5,9	1,91	0,19
Суммарная весовая влажность грунта, д. е.	0,32	0,21	0,19	3,51
Взаимосвязь между количеством воды, остающейся в жидком состоянии, и температурой окружающей среды	Аналогичная суглинку ($0,07 < l_p < 0,13$)	Аналогичная супеси ($0,19 < l_p < 0,07$)	Аналогичная песку ($l_p < 0,19$)	Аналогичная торфу
Плотность сухого грунта, кг/м ³	1523	1803	1702	1201
Температура фазового перехода, °C	–0,29	–0,38	–0,29	0
Теплопроводность мерзлого грунта, Вт/(м ³ ·°C)	1,87	1,8	2,4	1,29
Теплопроводность талого грунта, Вт/(м ³ ·°C)	1,6	1,59	1,94	0,09
Коэффициент фильтрации, м/с	49	9	107	49
Объемная теплоемкость мерзлого грунта, МДж/(м ³ ·°C)	2,36	2,21	2,14	2,28
Объемная теплоемкость талого грунта, МДж/(м ³ ·°C)	3,28	2,29	2,41	3,9

Таблица 2

Физические характеристики грунтов месторождения

Table 2

Physical characteristics of deposit soils

Параметр	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура воздуха, °С	-26,4	-26,4	-19,2	-10,3	-2,6	8,4	15,4	11,3	5,2	-6,3	-18,2	-24
Скорость ветра, м/с	2,3	2,1	2,1	2,4	2,4	2,1	1,8	1,3	1,9	2,3	2,3	2,4
Высота снежного покрова, м	0,47	0,49	0,51	0,47	0,16	0	0	0	0	0,18	0,25	0,38
Тепловой поток на бетонную плиту, Вт/м ²	1,54	16,98	67,28	126,23	198,15	248,46	237,04	164,51	97,53	31,48	7,41	1,54
Тепловой поток на поверхность грунта, Вт/м ²	0,48	5,3	21,03	39,45	61,92	77,64	74,07	51,41	30,48	9,84	2,31	0,48

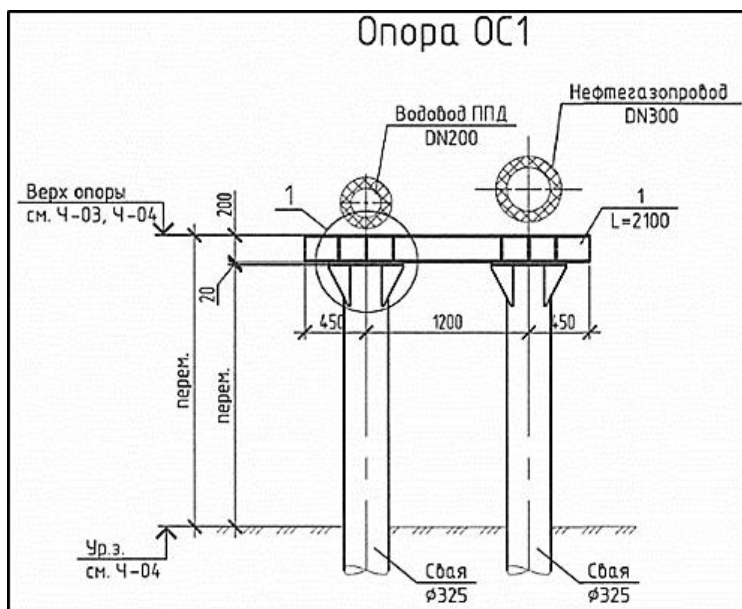


Рис. 1. Схемы двухстоечной опоры ОС1

Fig. 1. Schematic of two-rack support OS1

На данный момент проводится исследование изменения теплового поля почвы в условиях вечной мерзлоты методом конечных элементов. Для создания модели основания была использована трехмерная модель, которая располагалась в верхней части вечномерзлых грунтов.

Для определения прочности грунта требуется решить задачу о тепловом взаимодействии опоры и мерзлой почвы и, исходя из нее, рассмотреть прогноз

температурного режима. При моделировании температурного режима вечной мерзлоты в расчетной области начальные условия вводятся следующим образом. На нижних границах расчетной области устанавливаются начальные условия первого типа, где температура остается постоянной и равной $-1,7^{\circ}\text{C}$. На всех боковых границах расчетной области задается условие, при котором тепловой поток равен нулю. Чтобы учесть теплообмен между поверхностью грунта и атмосферой, на верхней границе расчетной модели применяется граничное условие третьего типа. Это условие определяется коэффициентом теплообмена $\alpha_{\text{прв}}$ и средней температурой $T_{\text{ср}}$. Для определения степени черноты поверхности почвы и коэффициента излучения учитываются чернота поверхности почвы и температура теплового излучения. Для расчета влияния снежного покрова на теплообменный процесс поверхности почвы используются данные о толщине снежного покрова и температуре воздуха. Затем, используя численное решение уравнения теплопроводности в моделируемой области, для разных временных моментов получают трехмерное температурное распределение. Это тепловое поле в последующем используется для изменения физических свойств почвы и анализа температурных режимов. В результате анализа принимаются решения по повышению прочности почвы. Были рассмотрены два варианта: моделирование стоек с полным погружением фундамента и моделирование стоек с фундаментом, расположенным на расстоянии 0,8 м от них.

На рис. 2–4 линиями температурной изоляции в поперечном сечении моделируемого участка показано расчетное температурное поле в смоделированном сечении газопровода. Результаты моделирования представлены на рис. 5–7 в виде изолированных линий температурного поля вокруг опоры газопровода, основание которой находится на высоте 0,8 м.

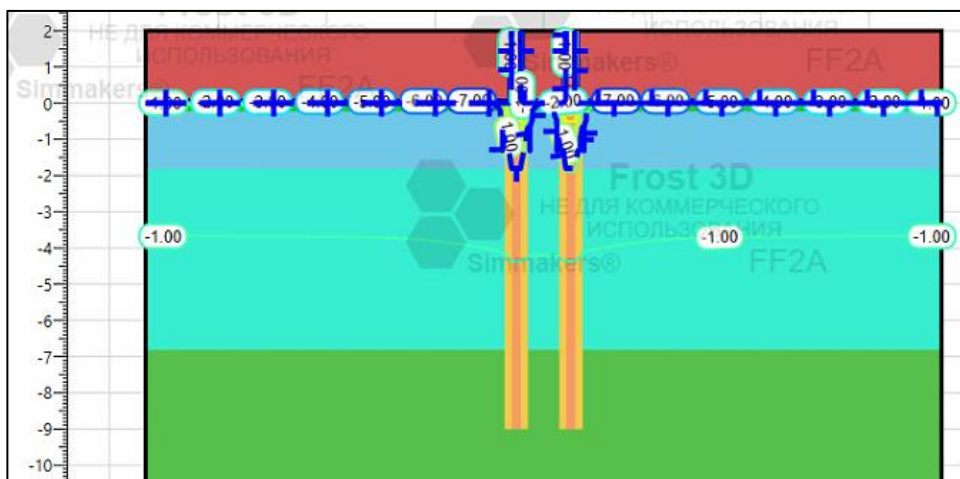


Рис. 2. Результаты моделирования теплового поля при заложении фундаментов на всю глубину на май 2023 г.

Fig. 2. Thermal field simulation for foundations at full depth on May 2023

На основе анализа данных рис. 2–4 видно, что наличие опоры трубопровода в многолетнемерзлом грунте существенно влияет на динамику темпера-

турного поля с течением времени. Это свидетельствует о том, что опора оказывает значительное воздействие на состояние почвы, а следовательно, на ее прочность и надежность газопровода.

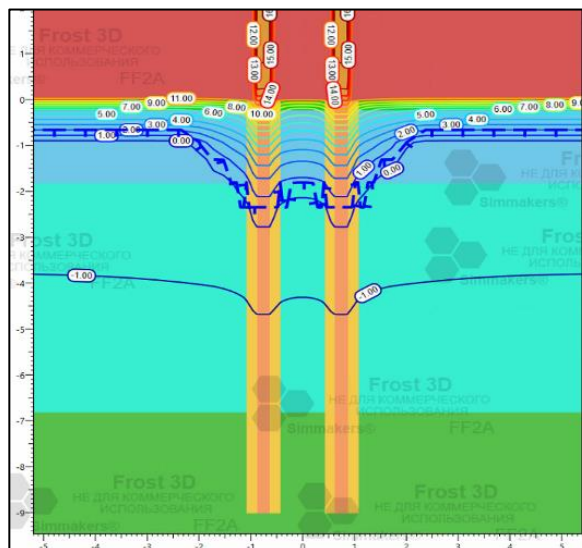


Рис. 3. Результаты моделирования теплового поля при заложении фундаментов на всю глубину на июль 2023 г.

Fig. 3. Thermal field simulation for foundations at full depth on July 2023

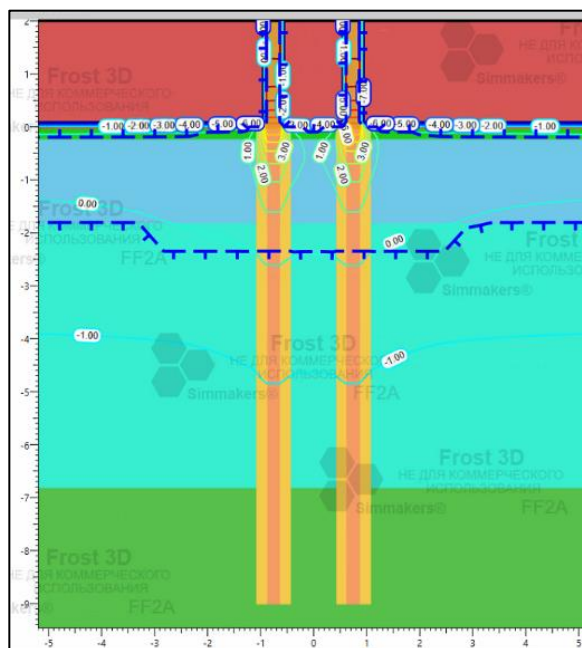


Рис. 4. Результаты моделирования теплового поля при заложении фундаментов на всю глубину на сентябрь 2023 г.

Fig. 4. Thermal field simulation for foundations at full depth on September 2023

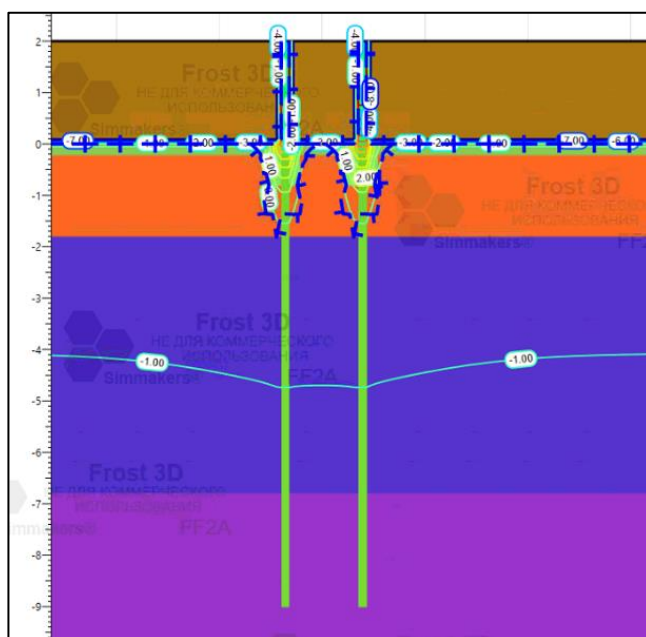


Рис. 5. Результаты моделирования теплового поля на май 2023 г.

Fig. 5. Thermal field simulation on May 2023

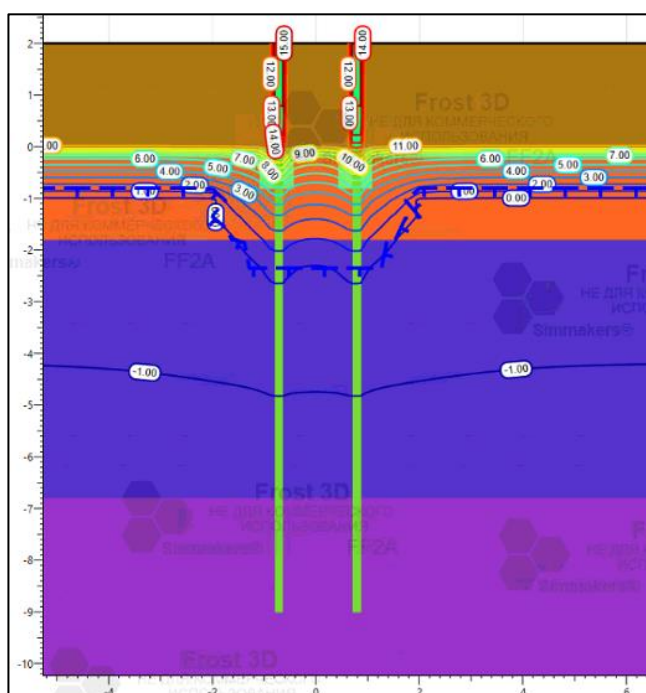


Рис. 6. Результаты моделирования теплового поля на июль 2023 г.

Fig. 6. Thermal field simulation on July 2023

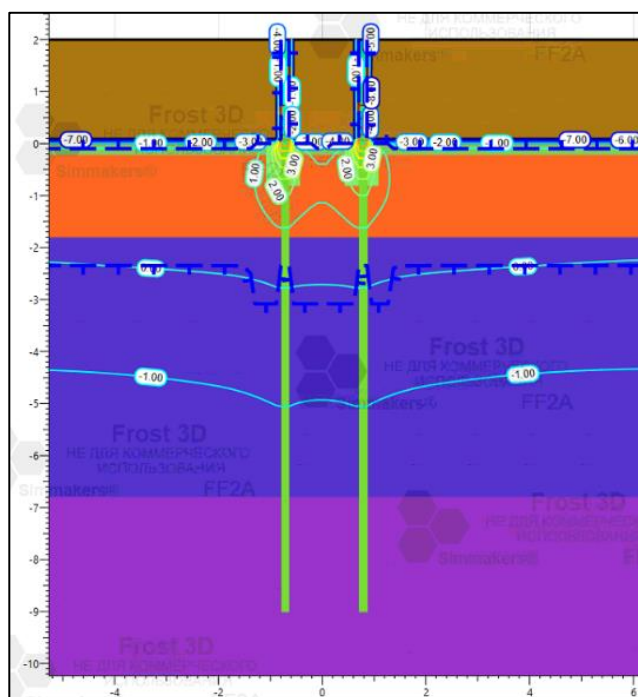


Рис. 7. Результаты моделирования теплового поля на сентябрь 2023 г.

Fig. 7. Thermal field simulation on September 2023

С 2009 г. отдел геомониторинга компании, разрабатывающей месторождение, осуществляет контроль за состоянием многолетнемерзлых почв. Оценка изменений в тепловом состоянии почв в процессе строительства и эксплуатации основания свай проводится по результатам мониторинга. Для осуществления инженерно-геокриологического контроля при проектировании месторождения создаются инженерные системы мониторинга. В систему обустройства месторождения входят термоскважины с термодатчиками для мониторинга температурного режима почвы. Бурение скважин и установка в них оборудования для постоянного контроля температур под фундаментами осуществляется после расчистки трассы и до завершения ее отсыпки. Объектами исследований являются сооружения нефтегазодобывающей компании, расположенные на свайном фундаменте с залеганием фундамента на 0,8 и 11 м на всю глубину свай.

Полученные расчетные значения в Frost 3D в период с ноября 2021 по декабрь 2022 г. соотнесем с натуральными значениями моделируемого свайного фундамента на месторождении. Сопоставление расчетных и натуральных данных отражает разницу в значениях более чем в 42,57 %. Если рассмотреть значения ниже 4 м заглубления, сходимость составит в среднем 17,85 %. Эта неточность в данных на глубине от 0 до 4 м связана с особенностями расчетной модели, которая использует метод переменных направлений согласно схеме Дугласа – Рекфорда. Шаги пространственной сетки соответствуют расстояниям между узлами с определёнными индексами, что выдает другую картину тепло-

вого распределения. При тренировке данной расчетной модели с помощью коэффициента слоистости получилось довести сходимость до 9,86 %.

Актуальной задачей является решение проблемы теплового взаимодействия опоры трубопровода с вечной мерзлотой, которая может оказывать существенное влияние на состояние грунта. Это, в свою очередь, влияет на прочность и надежность трубопровода и может привести к авариям со значительными экономическими, материальными и экологическими последствиями. Один из способов ее решения – устройство теплоизоляции опор для уменьшения теплового воздействия на вечную мерзлоту. Сравнение результатов расчетов с аналогичными данными других исследователей [5, 6] подтверждает достоверность полученных прогнозов развития области оттаивания.

Для снижения теплового влияния на многолетнюю мерзлоту следует использовать теплоизоляцию для опор трубопровода. На основании результатов моделирования SolidWorks не учитывался тепловой поток перекачиваемой жидкости и трубопровода с изоляцией на многолетней мерзлоте, следовательно, нужно рассматривать только изоляцию опор. Влияние на глубину оттаивания вечной мерзлоты можно контролировать путем применения различных теплоизоляционных слоев на поверхности.

После проведения анализа экономической выгоды различных материалов для изоляции было выявлено, что наиболее перспективным вариантом является использование сверхтонкой жидкой изоляции. Она способна защитить опору трубопровода от солнечной радиации и таким образом оказывать тепловое воздействие на вечную мерзлоту. Неравномерное напряженно-деформированное состояние, вызванное различными климатическими факторами, особенно ярко выраженной сезонностью, приводит к необходимости прогнозирования температурного поля мерзлого грунта с учетом летних и зимних условий.

На текущем этапе выполнено моделирование опоры в условиях многолетней мерзлоты с использованием высокоэффективной жидкой теплоизоляции для уменьшения теплового воздействия на грунт. Более наглядными примерами являются показатели, собранные в мае, июне и сентябре, когда происходят процессы заморозания и оттаивания грунта и, как следствие, возникают геокриологические процессы, угрожающие инженерным конструкциям. Задача оценки надежности свайных фундаментов сформулирована следующим образом: предполагается, что конструкции устанавливаются на свайные фундаменты в условиях вечной мерзлоты и исключается влияние сил замораживания, т. к. оно незначительно:

$$P(t) = P \left| \begin{array}{l} F_u(\tau) \geq F_v(\tau) \\ Y_0(\tau) \leq Y_u \\ 0 \leq \tau \leq t \end{array} \right|.$$

Значение надежности свайного фундамента, обозначенное как $P(t)$, является безразмерной функцией. Несущая способность свайного фундамента F_u измеряется в Н, как и вертикальная нагрузка F_v , передаваемая на свайный фундамент. Горизонтальное смещение верха сваи под воздействием горизонтальных нагрузок обозначается как Y_0 и измеряется в метрах. Максимально допустимое горизонтальное смещение верха сваи, определенное прочностью

материала, обозначается как i и измеряется в метрах. Текущее время обозначается как t и измеряется в часах. В данном случае значение надежности P понимается как значение функции надежности [16] за период времени, равный сроку службы t_e . То есть $P = P(t_e)$.

Вероятностная теория – это раздел науки, изучающей случайные события и их вероятности. Она основана на математических моделях и статистических методах. Вероятностные теории широко применяются в различных областях, таких как физика, экономика, социология и др. Они дают возможность предсказывать и анализировать вероятности различных исходов. Изучение вероятностей позволяет более точно понять и объяснить случайные явления в мире. Вероятностная теория имеет свои основные понятия и принципы, такие как вероятностное пространство, события и случайные величины. Эти концепции помогают разработать стратегии и методы для решения проблем, связанных с вероятностными событиями. Вероятностная теория также связана с теорией статистики, которая используется для анализа данных и получения выводов:

$$F_u^* + \varphi(t) \geq F_v^* + \eta(t).$$

Математические ожидаемые значения несущей способности основания (F_u^*) и вертикальной нагрузки на основание (F_v^*) являются главными показателями в данном контексте. Стационарные случайные процессы $\varphi(t)$ и $\eta(t)$ также играют важную роль, имея нулевое математическое ожидаемое значение.

$$\gamma_u = \frac{F_u^* - F_v^*}{\sigma_\varphi} \frac{F_v^*}{F_u^*} = \frac{1 - \frac{F_v^*}{F_u^*}}{v_{Fu}}.$$

Рассчитывая характеристику безопасности по вертикальной нагрузке γ_v , можно использовать безразмерный коэффициент надежности фундамента F_u^* . Для расчета несущей способности подвесной сваи можно пренебречь несущей способностью конца и использовать следующее уравнение:

$$F_u^* = M \cdot R_{af}.$$

Определение значения M , которое представляет собой площадь боковой поверхности сваи в многолетнем мерзлом грунте, осуществляется с использованием формулы, аппроксимирующей данные из табл. 3 прил. 2 СНиП 2.02.04-88. Для определения расчетного сопротивления мерзлого грунта и грунтового раствора сдвигу по границе промерзания R_{af} используется формула, которая определена для известково-песчаного раствора:

$$R_{af} = k(0,27 + 1,5\sqrt{-T})10^5.$$

Для металлических свай коэффициент k , учитывающий неровность боковой поверхности, равен 0,7, а для железобетонных свай – 1,0. Эквивалентная температура грунта T в устоявшемся эксплуатационном состоянии определяет максимальную среднегодовую температуру на глубине заложения фундамента.

Затем, используя распределение Пуассона, определим количество выбросов из области допустимых состояний, вызванных вертикальной нагрузкой. Это обоснованно, поскольку нас интересуют только очень надежные си-

стемы, в которых выбросы являются редкими событиями, и их математическое ожидание в течение года определяется [16]:

$$v_{Fu} = \frac{0,9 \left(-\frac{T_0}{A} \right)^{1/3} \sigma \cdot D}{-2T - 0,47\sqrt{-T}}.$$

Для определения параметров грунта и его температурных колебаний в естественных условиях используются следующие переменные: T_0 – температура грунта на уровне годовых колебаний в естественных условиях, °С; A – амплитуда годовых колебаний наружной температуры, которая рассчитывается как разница между средними температурами самого теплого и самого холодного месяцев года, деленная на два. Обычно значение A составляет от 14 до 31 °С. Для определения степени разброса годовых температур используется стандартное отклонение σ , которое обычно находится в диапазоне от 0,4 до 1,7 °С. Также учитывается показатель затухания дисперсии температур с глубиной D , который зависит от типа фундамента и коэффициента

$$y = 0,019z\sqrt{C_f / \lambda_f}.$$

Для расчета значений T и D можно использовать формулы, представленные в работах Хрусталева, Голочваста и Пустовойта [16]. Значение z представляет собой глубину заложения фундамента от верхней границы многолетнего мерзлого грунта и измеряется в метрах. C_f обозначает теплоемкость многолетнего мерзлого грунта, Вт·ч/(м³·°С). Параметр λ_f отражает теплопроводность многолетнего мерзлого грунта, Вт/(м·°С).

$$\begin{aligned} T &= \alpha \cdot T_0, \\ \alpha &= 0,44\sqrt{y}, \\ D &= \begin{cases} \frac{[0,78 + 0,74 \ln(y)]}{y} & \text{при } y > 1; \\ 1 - 0,22y & \text{при } y \leq 1. \end{cases} \end{aligned}$$

Для стальных свай, где F_h представляет собой горизонтальную нагрузку на верхнюю часть сваи на уровне ростверка, H , I обозначает изгибаемый участок сваи, m ; EJ представляет собой жесткость сечения сваи, $H \cdot m^2$; Δ является параметром, учитывающим воздействие вертикальной нагрузки, m^{-1} ,

$EJ = E \frac{\pi}{64} (d_{out}^4 - d_{in}^4)$, где E – модуль упругости стали, Па; d_{out} , d_{in} – внешний и внутренний диаметры трубы, м,

$$\begin{aligned} \Delta &= \sqrt{\frac{F_u}{EJ}}, \\ l &= L_0 + D_{th} + 1,5b. \end{aligned}$$

Вычисление прочности металлических трубчатых свай осуществляется путем определения левой части уравнения, где L_0 представляет собой высоту ростверка над поверхностью грунта, b – наибольшую сторону сечения призматической сваи или наружный диаметр сваи круглого сечения, а D_{ex} – глубина

ну сезонного промерзания грунта. Правая часть уравнения может быть выражена как Y_0 :

$$Y_0 = \frac{l^2}{6EJ} \frac{1 - \cos(\Delta l)}{\Delta \sin(\Delta l)} F_h(t).$$

Для свай из труб момент сопротивления сечения сваи, м^3 , обозначается как W , а предел текучести стали, Па, обозначается как σ_{fl} :

$$W = \frac{\pi}{32} \frac{d_{out}^4 - d_{in}^4}{d_{out}}.$$

Второе условие в уравнении представляется в виде отношения между горизонтальными силами аналогично выражению для вертикальных сил, т. к. результат деления деформации на коэффициент G приводит к образованию силы, вызывающей эту деформацию. Затем с использованием аналогичных рассуждений для вертикальных сил мы получаем коэффициент безопасности для случая горизонтальной нагрузки:

$$\gamma_h = \frac{\frac{Y_u}{Y_0} - 1}{2v_{w \max}}.$$

Записываем аналогично для интенсивности отказов от действия горизонтальной нагрузки, где Y_0 – математическое ожидание горизонтального перемещения головы сваи в метрах:

$$m(\gamma_h) = \frac{\exp(-0,5\gamma_h^2)}{\gamma_h \sqrt{2\pi}}.$$

Из теории выбросов известно, что количество выбросов n является дискретной случайной величиной с интегральной функцией распределения $F(t, n)$.

Отсюда следует, что $P(t) = F_{Y(t, 0)}$. Для распределения Пуассона $F_{Y(t, 0)} = \exp[-\mu(t)]$, где $\mu(t)$ – математическое ожидание количества выбросов за период t . Предполагая, что выбросы из-за действия вертикальной и горизонтальной нагрузок являются независимыми случайными событиями, их количество можно считать аддитивной величиной. То есть количество выбросов за период t равно сумме выбросов из-за вертикальной и горизонтальной нагрузок за каждый год в промежутке времени от 0 до t :

$$\mu(t) = t[m(\gamma_h) + m(\gamma_u)],$$

где t – число лет. Учитывая вышесказанное, окончательно получим

$$P(t) = \exp[-\mu(t)].$$

Результаты расчета функции надежности свайного фундамента с учетом различной глубины заложения и наличия теплоизоляции приведены в табл. 3 и на рис. 8.

Как показало исследование, трехмерное компьютерное моделирование – мощный инструмент для количественной оценки криогенной опасности в районах вечной мерзлоты. Оно демонстрирует, что программа FROST 3D может быть использована для оценки степени оттаивания и промерзания грунта во-

круг сооружений при различных вариантах расположения фундаментов и теплового воздействия опор.

Таблица 3

Результаты расчета

Table 3

Calculation results

Вид	z – глубина заложения фундамента, м	P(t) – функция надежности свайного основания, безразмерная (б.р.)				D _{th} – глубина сезонного оттаивания грунта, м			
		Время, лет							
		1	2	3	4	1	2	3	4
Теплоизолированная опора с фундаментом на 0,8 м	0,8	0,994	0,988	0,984	0,978	1,39	1,52	1,62	1,69
Теплоизолированная опора с фундаментом на всю глубину	9	0,996	0,989	0,985	0,983	1,23	1,31	1,39	1,49
Опора с фундаментом на 0,8 м	0,8	0,993	0,986	0,98	0,971	2,21	2,38	2,49	2,59
Опора с фундаментом на всю глубину	9	0,993	0,988	0,981	0,978	2,029	2,13	2,19	2,29

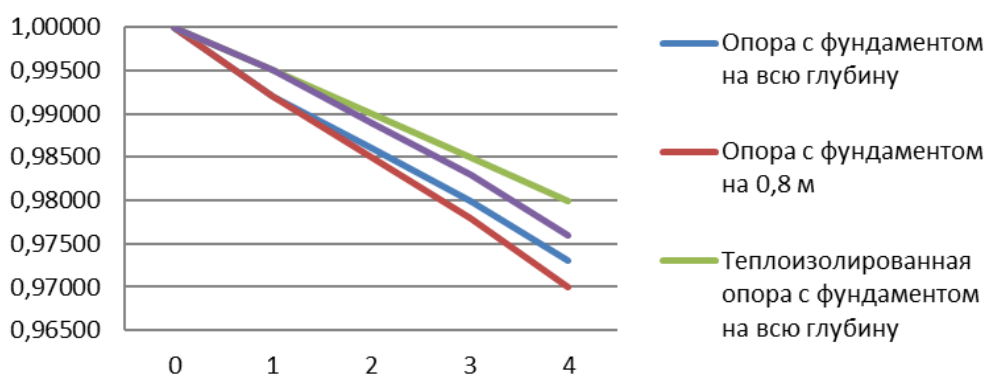


Рис. 8. Вероятности безотказной работы промышленного нефтепровода во времени

Fig. 8. Probabilities of accident-free pipeline operation over time

Выполненные вычисления позволили сделать следующие выводы:

1. Собственная частота и амплитуда колебаний фундамента при действии динамической нагрузки существенно зависят от массы грунта для свайных фундаментов небольшого размера.

2. В Арктической зоне Российской Федерации при строительстве фундаментов на мягких или бугристых грунтах необходимо учитывать вероятность оседания фундаментов и установленных на них конструкций под действием их собственного веса.

3. Для оценки надежности свайного фундамента на месторождении N было проведено опытно-промышленное испытание двухстоечной опоры после пяти лет эксплуатации с применением теплоизоляции. Результаты данного исследования показали, что надежность функции увеличилась на 4 %. Это свидетельствует об эффективности применения данного метода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Andersland O.B., Ladanyi B.* An introduction to frozen ground engineering. Springer Science & Business Media. 2013. 352 p. ISBN 978-1-4757-2292-5.
2. *Ern A., Guermond J.* Theory and practice of finite elements. Springer Science & Business Media. 2013. V. 159. 530 p.
3. *Gornov V.F., Stepanov S.P., Vasilyeva M.V., Vasilyev V.I.* Mathematical modeling of heat transfer problems in the permafrost // AIP Conference Proceedings, 2014. V. 1629. I. 1. P. 424–431. DOI: 10.1063/1.4902304
4. *Hughes T.Jr.* The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis. Courier Corporation, 2012. 704 p.
5. *Logg A., Mardal K.-A., Wells G.* Automated solution of differential equations by the finite element method: The FEniCS book. Springer Science & Business Media, 2012. 732 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23099-8>
6. *Meyer W.J.* Concepts of mathematical modeling. Courier Corporation, 2012. 448 p.
7. *Balay S., Brown J., Buschelman K. et al.* PETSc Web page. 2011. URL: <http://www.mcs.anl.gov/petsc> (дата обращения: 16.12. 2022).
8. *Pavlova N.V., Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V.* Mathematical modeling of thermal stabilization of vertical wells on high performance computing systems // International Conference on Large-Scale Scientific Computing. Springer. 2013. P. 636–643.
9. *Vabishchevich P.N.* Time step for numerically solving parabolic problems // International Conference on Finite Difference Methods. Springer. 2014. P. 96–103.
10. *Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V., Pavlova N.V.* Numerical simulation of thermal stabilization of filter soils // Mathematical Models and Computer Simulations. 2015. V. 7. № 2. P. 154–164.
11. *Вабищевич П.Н., Варламов С.П., Васильев В.И., Степанов С.П.* Математическое моделирование теплового режима железнодорожного полотна в условиях криолитозоны // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2013. Т. 10. № 5. С. 5–11.
12. *Вабищевич П.Н., Варламов С.П., Васильев В.И., Степанов С.П.* Численное моделирование температурного поля многолетнемерзлого грунтового основания железной дороги // Математическое моделирование. 2016. Т. 28. № 10. С. 110–124.
13. *Крылов Д.А., Сидняев Н.И., Федотов А.А.* Математическое моделирование распределения температурных полей // Математическое моделирование. 2013. Т. 25. № 7. С. 3–27.
14. *Мещерин И.В., Калмыков А.М., Сидняев Н.И., Федотов А.А., Храпов П.В.* Задача определения температурного поля в мерзлых грунтах // Альманах современной науки и образования. 2012. № 7. С. 900–939.
15. *Stepanov S.P., Sirditov I.K., Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V.* Numerical simulation of heat transfer of the pile foundations with permafrost // International Conference on Numerical Analysis and Its Applications. Springer. 2016. P. 625–632.
16. *Голофаст С.Л., Влодова А.Ю.* Влияние температурного поля трассы магистрального нефтепровода на прочностную надежность линейных участков // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 11. С. 24–33. DOI:10.24000/0409-2961-2019-11-24-33

REFERENCES

1. Andersland O.B., Ladanyi B. An introduction to frozen ground engineering. Springer Science+Business Media, 2013. 352 p. ISBN 978-1-4757-2292-5.
2. Ern A., Guermond J. Theory and practice of finite elements. Vol. 159. Springer Science+Business Media, 2013. 530 p.
3. Gornov V.F., Stepanov S.P., Vasilyeva M.V., Vasilyev V.I. Mathematical modeling of heat transfer problems in the permafrost. *AIP Conference Proceedings*. 2014; 1629 (1): 424–431. DOI: 10.1063/1.4902304
4. Hughes T.J.R. The finite element method: Linear static and dynamic finite element analysis. Courier Corporation, 2012. 704 p.
5. Logg A., Mardal K.-A., Wells G. Automated solution of differential equations by the finite element method: The FEniCS book. Springer Science+Business Media, 2012. 732 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23099-8>
6. Meyer W.J. Concepts of mathematical modeling. Courier Corporation, 2012. 448 p.
7. Balay S., Brown J., Buschelman K., et al. PETSc Web page. Available: www.mcs.anl.gov/petsc (accessed December 16, 2022)
8. Pavlova N.V., Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V. Mathematical modeling of thermal stabilization of vertical wells on high performance computing systems. In: *Proc. Int. Conf. 'Large-Scale Scientific Computing'*. Springer. 2013. Pp. 636–643.
9. Vabishchevich P.N. Time step for numerically solving parabolic problems. In: *Proc. Int. Conf. 'Finite Difference Methods'*. Springer. 2014. Pp. 96–103.
10. Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V., Pavlova N.V. Numerical simulation of thermal stabilization of filter soils. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2015; 7 (2): 154–164.
11. Vabishchevich P.N., Varlamov S.P., Vasiliev V.I., Stepanov S.P. Mathematical modeling of thermal regime of railway track in permafrost conditions. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. Ammosova*. 2013; 10 (5): 5–11. (In Russian)
12. Vabishchevich P.N., Varlamov S.P., Vasiliev V.I., Stepanov S.P. Numerical modeling of temperature field of permafrost soil foundation of railway. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2016; 28 (10): 110–124. (In Russian)
13. Krylov D.A., Sidnyaev N.I., Fedotov A.A. Mathematical modeling of the distribution of temperature fields. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2013; 25 (7): 3–27. (In Russian)
14. Meshcherin I.V., Kalmykov A.M., Sidnyaev N.I., Fedotov A.A., Khrapov P.V. The problem of determining the temperature field in frozen soils. *Almanakh sovremennoi nauki i obrazovaniia*. 2012; (7): 900–939. (In Russian)
15. Stepanov S.P., Sirditov I.K., Vabishchevich P.N., Vasilyeva M.V. Numerical simulation of heat transfer of the pile foundations with permafrost. In: *Proc. Int. Conf. 'Numerical Analysis and its Applications'*. Springer. 2016. Pp. 625–632. (In Russian)
16. Golofast S.L., Vladova A.Yu. Influence of temperature field of the main oil pipeline route on strength reliability of linear sections. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2019; (11): 24–33. DOI:10.24000/0409-2961-2019-11-24-33. (In Russian)

Сведения об авторах

Бурков Петр Владимирович, докт. техн. наук, ст. научный сотрудник, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, burkovpv@mail.ru

Волков Александр Эдуардович, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, A_E_Volkov@inbox.ru

Authors Details

Petr V. Burkov, DSc, Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634003, Tomsk, Russia; Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634050, Tomsk, Russia; burkovpv@mail.ru

Aleksandr E. Volkov, Research Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia; A_E_Volkov@inbox.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.10.2023
Одобрена после рецензирования 05.11.2023
Принята к публикации 09.11.2023

Submitted for publication 11.10.2023
Approved after review 05.11.2023
Accepted for publication 09.11.2023