



ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СВАЙ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ПО НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЯ

Деградация вечной мерзлоты создает новые вызовы в области обеспечения надежного и безопасного функционирования зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах. В статье представлен новый подход к анализу надежности свай на вечномерзлых грунтах по критерию несущей способности грунта основания. Предложены различные расчетные алгоритмы для получения оценки индекса надежности и вероятности безотказной работы свай. Разработаны формулы для аппроксимации зависимостей расчетного сопротивления грунтов сдвигу по таблице ВЗ СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». Для комплексной оценки надежности сваю необходимо рассматривать как условную механическую последовательную систему, включающую в себя элементы в виде вероятностей безотказной работы по всем нормативным критериям предельных состояний.

Надежность, вероятность отказа, вечная мерзлота, сваи, несущая способность, вероятностное проектирование.

Надежность является одним из главных показателей качества и безопасности эксплуатации несущих элементов строительных конструкций. Надежность в совокупности с фактором экономических и неэкономических потерь являются базовыми параметрами для оценки риска, что позволяет выполнять требования Федерального Закона № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» в области обеспечения механической безопасности. Как отмечено в стандарте Eurocode 0 «Basis of Structural Design», надежность обычно выражается в вероятностных терминах.

Свайные фундаменты являются распространенным конструктивным решением для многих зданий и сооружений, эксплуатируемых в условиях вечной мерзлоты. Так как тепловой поток от зданий оказывает негативное воздействие на вечную мерзлоту, еще в начале XX века было предложено использовать вентилируемые свайные фундаменты для защиты вечной мерзлоты от оттаивания, так как цокольная часть сооружения проветривается зимой и обеспечивает затенение летом.

В исследовании [1] отмечается, что «антропогенное влияние на температуру воздуха стало практически заметным начиная с 1970 г., что приводит к повышению температуры вечномерзлых грунтов и, как следствие, к потере несущей способности оснований. Данный процесс уже наблюдается в настоящее время и сопровождается деформациями инженерных сооружений». С учетом глобальных экспериментальных исследований глубины активного слоя грунта (слоя, в котором происходит процесс промерзания-оттаивания грунта) с 1995 по 2007 годы в регионах с вечной мерзлотой [2] установлено, что в среднем за год глубина активного слоя повышается на 5 см. Как отмечено в исследованиях [3, 4], «многие сооружения построены на свайных фундаментах, используют

многолетнемерзлый грунт в качестве оснований и рассчитаны на эксплуатацию в определенных температурных условиях. За последние 30 лет в Якутске из-за просадок мерзлого грунта серьезные повреждения получили более 300 зданий. Уже в 1992 году процент поврежденных зданий составлял 10 % в Норильске, 22 % в Тикси, 35 % в Дудинке, 50 % в Певеке и Амдерме, 55 % в Магадане, 60 % в Чите и 80 % – в Воркуте. С 1990 по 1999 год число сооружений, получивших повреждения из-за неравномерных просадок фундаментов, увеличилось по сравнению с предшествующим десятилетием в Норильске на 42 %, в Якутске – на 61 %, в Амдерме на 90 %». Следовательно, вопрос оценки безопасности эксплуатации фундаментов строительных конструкций и инженерных сооружений является крайне актуальным.

В фундаментальном исследовании влияния потепления климата на деградационные процессы в вечной мерзлоте [5] отмечено, что деградация вечной мерзлоты может иметь серьезные социально-экономические последствия, поскольку большая часть существующей инфраструктуры потребует дорогостоящих инженерных решений для поддержания экономической деятельности на вечной мерзлоте. Согласно отчетам Международной организации АМАР (Программа арктического мониторинга и оценки), Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) и Росгидромета [5], каждые 10 лет происходит увеличение температуры окружающей среды в районах с вечномерзлыми грунтами до 1 °С – быстрее, чем в других регионах. Близкие цифры показывают авторские экспериментальные исследования: в западных районах РФ наблюдается ежегодное увеличение температуры вечной мерзлоты от 0,01 до 0,04 °С/год [6], в восточных до 0,08 °С/год [7]. В исследовании [8] выполнен прогноз деформаций основа-

ния и снижения несущей способности свайных фундаментов в криолитозоне.

Изменение климата в регионах с вечной мерзлотой резко повышает экономические затраты на обеспечение безопасности инфраструктуры. На обслуживание трубопроводов в районах вечной мерзлоты России ежегодно требуется более 1,5 млрд долларов [5, 9]. Важным выводом исследования [5] является то, что «несмотря на растущую сеть наблюдений и попытки восстановления имеющихся данных, вечная мерзлота по-прежнему остается областью исследований с ограниченной статистической информацией».

Согласно [10], «обязателен мониторинг существующей инфраструктуры и быстрое принятие инженерных решений, направленных на сохранение температуры многолетнемерзлых пород. В настоящее время возможны только качественные оценки климатических изменений и вызванных ими опасных геологических процессов и снижения несущей способности мерзлых грунтов. Необходимо развитие локальных климатических моделей и сценариев возможных климатических изменений».

Надежность строительных конструкций, в свою очередь, является объективной количественной оценкой безопасности эксплуатации конструкции. Методы оценки надежности строительных конструкций активно изучаются и совершенствуются [11–14].

В соответствии с п. 7.2.2 СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах», математическую модель несущей способности сваи по критерию несущей способности основания F_u можно записать в виде:

$$F_u = \gamma_t \gamma_c \left(RA + \sum_{i=1}^n R_{af,i} A_{af,i} \right), \quad (1)$$

где γ_t – температурный коэффициент, учитывающий изменения температуры грунтов, принимаемый по Приложению П СП 25; γ_c – коэффициент условий работы основания; R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи; A – площадь опирания сваи на грунт; $R_{af,i}$ – расчетное сопротивление i -го слоя мерзлого грунта сдвигу по боковой поверхности сваи; $A_{af,i}$ – площадь поверхности смерзания i -го слоя грунта с боковой поверхностью сваи.

Коэффициент γ_t в расчетах на надежность не учитывается, т.к. вариация температур грунта будет включена в прямую вероятностную модель. Коэффициент условий работы также исключается из вероятностных расчетов, т.к. его использование обусловлено использованием метода предельных состояний или метода частных коэффициентов надежности.

Математическую модель предельного состояния для расчета надежности можно сформировать в виде:

$$\tilde{F} \leq \tilde{\sigma}A + \sum_{i=1}^n \tilde{\sigma}_{af,i} A_{af,i}, \quad (2)$$

где \tilde{F} – эксплуатационная нагрузка на сваю; $\tilde{\sigma}$ и $\tilde{\sigma}_{af,i}$ – предельные напряжения грунта, которые

вводятся взамен расчетных сопротивлений, т.к. расчетные сопротивления являются детерминированным числом с заданной обеспеченностью.

Для дальнейших расчетов введем функцию резерва несущей способности сваи, которая на основе (2) будет иметь вид:

$$\tilde{g} = \tilde{\sigma}A + \sum_{i=1}^n \tilde{\sigma}_{af,i} A_{af,i} - \tilde{F} \geq 0. \quad (3)$$

Индекс надежности по математической модели (3) вычисляется по формуле:

$$\beta = \frac{m_g}{S_g}, \quad (4)$$

где m_g – математическое ожидание функции предельного состояния g ; S_g – среднеквадратическое отклонение функции предельного состояния g .

Введем обозначения $\tilde{\sigma}A = \tilde{x}_1$, $\tilde{F} = \tilde{x}_2$, $\tilde{\sigma}_{af,i} A_{af,i} = \tilde{x}_{i+2}$.

Тогда в общем виде индекс надежности можно записать в виде:

$$\beta = \frac{\sum m_{x,i}}{\sum S_{x,i}^2}, \quad (5)$$

где $m_{x,i}$ и $S_{x,i}$ – математическое ожидание и стандартное отклонение случайной величины \tilde{x}_i .

Если все случайные величины в (5) можно описать нормальным распределением вероятностей, то вероятность безотказной работы сваи по критерию несущей способности грунта основания определяется по формуле:

$$P = 0,5 + \Phi(\beta), \quad (6)$$

где Φ – табличные значения функции Лапласа.

Эксплуатационную нагрузку \tilde{F} можно также разделить на составляющие в математической модели предельного состояния (3). Например, нагрузка от собственного веса конструкций и оборудования может быть определена экспериментально-теоретически на основе патента [15], вероятностная модель снеговой нагрузки может быть принята с учетом рекомендаций [16] и т.д.

При росте количества i -ых слоев грунта ниже глубины активного слоя грунта расчет проводится аналогичным образом, лишь увеличивается число слагаемых в выражениях (3) и (5).

В соответствии с СП 25.13330.2020 для сооружений пониженного уровня ответственности, а также сооружений нормального уровня ответственности габаритными размерами не более 24 м, расположенных на изученных участках и при отсутствии опасных геокриологических процессов, допускается принимать расчетное сопротивление сдвигу грунта по таблице В3 СП 25.13330.2020.

На рисунке представлена зависимость в виде символов между расчетным сопротивлением сдвигу грунта по поверхности смерзания от темпера-

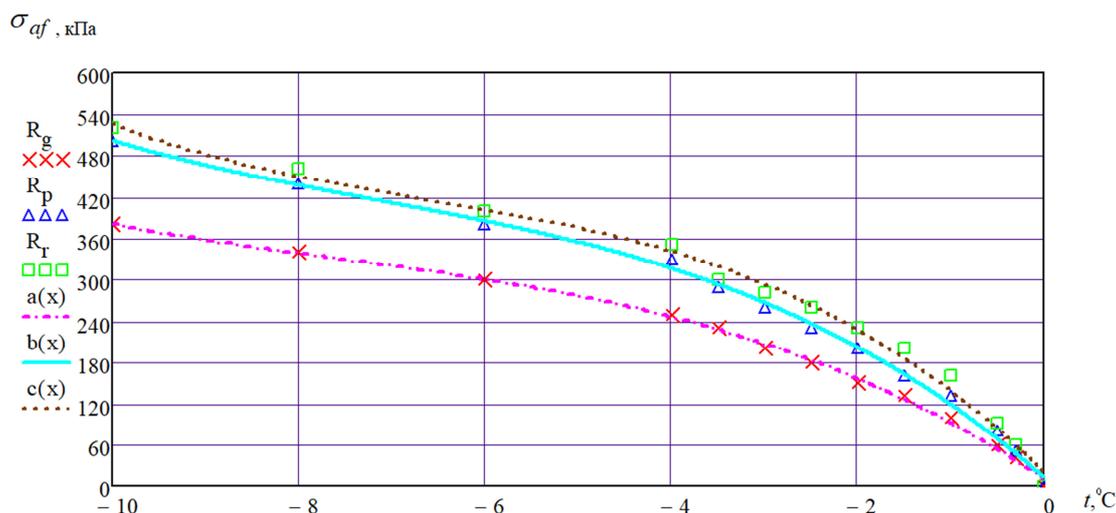


Рис. Аппроксимация зависимости расчетного сопротивления сдвигу грунта по поверхности смерзания (R_g – для глинистых грунтов; R_p – для песчаных грунтов; R_r – для известково-песчаного раствора) от температуры

Данная зависимость может быть аппроксимирована следующими функциями:

- для глинистых грунтов:

$$a(t) = -0,412t^3 - 9,418t^2 - 89,917t + 10,914$$

(в кПа);

- для песчаных грунтов:

$$b(t) = -0,605t^3 - 12,974t^2 - 118,003t + 13,261$$

(в кПа);

- для известково-песчаного раствора:

$$c(t) = -0,835t^3 - 16,627t^2 - 133,076t + 21,336$$

(в кПа);

Приняв линейное распределение температуры грунта вдоль длины сваи, что идет в запас надежности по рисунку, можно получить выражение для расчета силы смерзания F_r , удерживающей сваю:

$$F_r = u \cdot \int_0^{t_H} a(t) dt, \text{ кН}, \quad (7)$$

где t_H – температура грунта у нижнего конца сваи; u – периметр поперечного сечения сваи.

Выражение (7) можно использовать вместо сла-

гаемого $\sum_{i=1}^n \tilde{\sigma}_{af,i} A_{af,i}$ в (3).

После интегрирования, выражение (7) примет вид полинома 4 степени. Поиск его статистических параметров для выражения (5) может быть выполнен методами Монте-Карло [17].

Индекс надежности и вероятность безотказной работы сваи являются количественными показателями ее безопасности эксплуатации. На основе этих показателей может быть принято решение о дальнейшей эксплуатации сооружения и необходимости проведения капитального ремонта сооружения.

Литература

1. Хрусталеv, Л. Н. Прогноз потепления климата и его учет при оценке надежности оснований зданий на вечномерзлых грунтах / Л. Н. Хрусталеv, И. В. Давыдова // Криосфера Земли. – 2007. – № 2. – С. 68–75.

2. Wu, Q. Changes in Active Layer Thickness over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1995 to 2007 / Q. Wu, T. Zhang // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2010. – Vol. 115. – pp. 1–12.

3. Анисимов, О. А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России / О. А. Анисимов, М. А. Белолуцкая // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 6. – С. 15–22.

4. Анисимов, О. А. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК / О. А. Анисимов, С. А. Лавров // Технологии ТЭК. – 2004. – № 3. – С. 78–83.

5. Streletskiy, D. Permafrost Degradation / D. Streletskiy, O. Anisimov, A. Vasiliev // Snow and ice-related hazards, risks and disasters. Academic Press. – 2015. – pp. 303–344.

6. Malkova, G. V. Mean-annual ground Temperature Monitoring on the Steady-state-station “Bolvan-sky” / G. V. Malkova // Earth's Cryosphere. – 2010. – Vol. 14. – No. 3. – pp. 3–14.

7. Oberman, N. G. Contemporary Permafrost Degradation of the European North of Russia / N. G. Oberman // Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, June 29-July 3. – 2008. – pp. 1305–1310.

8. Nikiforova, N. Forecast of the soil deformations and Decrease of the Bearing Capacity of Pile Foundations Operating in the Cryolithozone / N. Nikiforova, A. Konnov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2022. – Vol. 18. – No. 1. – pp. 141–150.

9. Streletskiy, D. A. Infrastructure and a Changing Climate in the Russian Arctic: a Geographic Impact Assessment / D. A. Streletskiy, N. I. Shiklomanov, E. Hatleberg // Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost. – 2012. – Vol. 1. – pp. 407–412.

10. Стрелецкий, Д. А. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на Севере Западной Сибири / Д. А. Стрелецкий, Н. И. Шикломанов, В. И. Гребенец // Криосфера Земли. – 2012. – Т. 16. – № 1. – С. 22–32.

11. Соловьева, А. А. Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 5. – С. 587–607.

12. Соловьева, А. А. Разработка уточненного р-блока как модели случайной величины в задачах анализа надежности строительных конструкций / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2022. – № 1 (300). – С. 20–28.

13. Соловьев, С. А. Анализ надежности элементов стальных ферм при интервальной оценке случайных величин / С. А. Соловьев, А. Э. Иньков, А. А. Соловьева // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2022. – № 1 (15). – С. 53–57.

14. Соловьев, С. А. Методы оценки надежности стальных ферм с использованием р-блоков / С. А. Соловьев, А. А. Соловьева. – Вологда : Воло-

годский государственный университет, 2022. – 143 с. – ISBN 978-5-907606-02-9.

15. Патент № 2765358 С1 Российская Федерация, МПК E02D 33/00. Способ определения значения эксплуатационной нагрузки на железобетонную сваю в составе зданий или сооружений : № 2021106432 : заявл. 12.03.2021 : опубл. 28.01.2022 / В. С. Уткин, Л. А. Сушев, С. А. Соловьев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет».

16. Соловьева, А. А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 2. – С. 153–167.

17. Naess A., Leira B. J., Batsevych O. System reliability analysis by enhanced Monte Carlo simulation // Structural safety. – 2009. – Vol. 31. – No. 5. – pp. 349–355.

S.A. Solovyov, L.A. Sushev, R.V. Rakhmanov
Vologda State University

PROBABILISTIC ANALYSIS OF PILES RELIABILITY ON PERMAFROST SOILS BASED ON BASE BEARING CAPACITY

The degradation of permafrost creates new challenges in the field of ensuring the reliable and safe functioning of buildings and structures on permafrost soils. The article presents a new approach to the reliability analysis of piles on permafrost soils by the criterion of the soil base bearing capacity. Various design algorithms are proposed to obtain an estimate of the reliability index and the probability of no-failure operation of the pile. The equations have been developed for approximating the dependencies of the design resistance of soils to shear according to Table V3 SP 25.13330.2020 "Foundations on permafrost soils". For a comprehensive assessment of reliability, the pile must be considered as a conditional mechanical sequential system that includes elements in the form of no-failure probabilities for all standard criteria of limit states.

Reliability, failure probability, permafrost, piles, bearing capacity, probabilistic design