

С.А. СОЛОВЬЕВ¹, Л.А. СУШЕВ¹, А.А. КОЧКИН¹, А.А. СОЛОВЬЕВА¹

¹ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», г. Вологда, Россия

ПРОБЛЕМА АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ СВАЙ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ПО КРИТЕРИЮ УСТОЙЧИВОСТИ

Аннотация. Рост темпов глобального потепления напрямую влияет на безопасность зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах. В исследовании рассматривается проблема анализа надежности свай на вечномерзлых грунтах по критерию устойчивости при действии касательных сил морозного пучения. Разработано две группы методов оценки надежности свай: при полной и ограниченной статистической информации о случайных величинах в математических моделях предельных состояний. Предложены аппроксимации зависимостей расчетных сопротивлений многолетнемерзлых грунтов сдвигу по поверхности смерзания от температуры, которые могут быть использованы при оценке силы смерзания, удерживающей сваю от выпучивания. Разработана методика контроля надежности и прогноза долговечности свай на вечномерзлых грунтах, позволяющая обоснованно сократить затраты на мероприятия по оценке надежности в начальные периоды эксплуатации, что может позволить увеличить количество обследуемых зданий и сооружений при аналогичных затратах на обследование технического состояния.

Ключевые слова: надежность, свая, вечная мерзлота, устойчивость, деформация, вероятность отказа, глобальное потепление.

S.A. SOLOVEV¹, L.A. SUSHEV¹, A.A. KOCHKIN¹, A.A. SOLOVEVA¹

¹Vologda State University, Vologda, Russia

A PROBLEM OF PILES STRUCTURAL RELIABILITY ANALYSIS ON THE STABILITY CRITERION IN PERMAFROST REGIONS

Abstract. The increase in the rate of global warming directly affects the safety of buildings and structures on permafrost. The research presents the problem of reliability analysis for piles on permafrost soils by the stability criterion under the action of tangential forces of frost heaving. The two groups of piles reliability analysis methods are developed: for complete and limited statistical data about random variables in the models of limit states. Approximations of the dependences of the design resistances of permafrost soils to the shear along the freezing surface on the temperature are proposed. It can be used to estimate the freezing force that keeps the pile from buckling. The method for reliability monitoring and durability forecasting has been developed for piles on permafrost soils. The proposed method makes it possible to reasonably reduce the cost of reliability analysis in the initial periods, which can increase the number of buildings and structures being inspected by the similar costs.

Keywords: reliability, pile, permafrost, stability, deformation, failure probability, global warming.

Введение

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].

Изменение климата в регионах с вечной мерзлотой резко повышает экономические затраты на обеспечение безопасности инфраструктуры. Так, согласно исследованию [8], на территории Аляски для поддержания инфраструктуры в период с 2010 по 2030 год потребуется дополнительно 3,6-6,1 миллиарда долларов, а в период с 2010 по 2080 год – до 7,6 миллиарда долларов. 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».

Исследование технических состояний зданий и сооружений в Чукотском Автономном Округе (рисунок 1) отражает необходимость дальнейшего развития методов оценки, контроля и прогноза безопасности зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах.

Федеральным Законом №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», статья 7 установлено требование обеспечения механической безопасности зданий и сооружений – т.е. такому состоянию, когда «отсутствует недопустимый риск» превышения предельных состояний. Одним из основных показателей отсутствия недопустимого риска может служить надежность здания, сооружения или его элемента, выраженная в виде вероятности отказа или вероятности безотказной работы.



*Рисунок 1 – Повреждения здания вследствие деградации вечномёрзлых грунтов на Чукотке
(фото: Сушев Л.А.)*

В связи с этим в данной работе предлагается рассмотреть подход к оценке надежности свай на вечномёрзлых грунтах с учетом влияния фактора глобального потепления. В качестве критерия предельного состояния в данном исследовании принята устойчивость свай в свайных фундаментах при действии касательных сил морозного пучения активного слоя грунта.

Материалы и методы

В соответствии со сводом правил 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах», критерий устойчивости свай в свайных фундаментах с учетом действия касательных сил морозного пучения можно сформулировать в следующем виде:

$$\tau_{fh} A_{fh} - F \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} F_r, \quad (1)$$

где τ_{fh} – расчетная удельная касательная сила морозного пучения грунта; A_{fh} – площадь боковой поверхности сваи по глубине сезонного промерзания-оттаивания грунта; F – сосредоточенная сила – расчетная нагрузка на сваю; F_r – расчетное значение силы, удерживающей сваю от выпучивания; γ_c и γ_n – коэффициенты условий работы и надежности.

Расчетная нагрузка на сваю F с течением времени при сохранении функционального назначения сооружения остается неизменной (возможным снижением веса снегового покрова в связи с глобальным потеплением будем пренебрегать в запас надежности сооружения). В то же время, с учетом увеличения температуры и соответствующего

увеличения глубины промерзания-оттаивания, сила морозного пучения грунта τ_{fh} распределяется по всё большей площади боковой поверхности сваи A_{fh} , а удерживающая сваю сила F_r в свою очередь уменьшается за счет уменьшения площади боковой поверхности смерзания сваи и повышения температур вечномерзлых грунтов.

На рисунке 2 представлены графики распределения температур грунта основания на территории вечномерзлых грунтов.

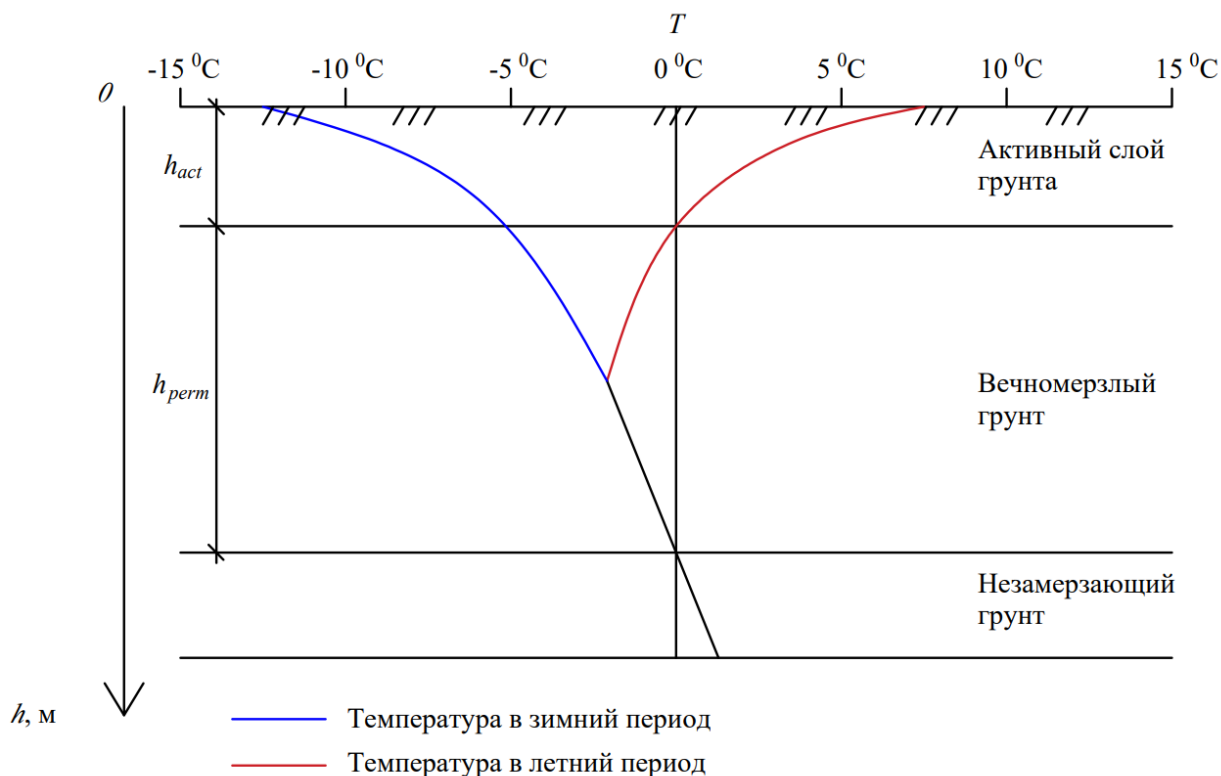


Рисунок 2 – Распределение температуры грунта по глубине основания в вечной мерзлоте

Расчетное значение силы, удерживающей сваю от выпучивания, следует определять по формуле (при использовании многолетнемерзлых грунтов по принципу I):

$$F_r = u \sum_{i=1}^n R_{af,i} h_i, \quad (2)$$

где u – периметр поперечного сечения сваи; $R_{af,i}$ – расчетное сопротивление i -го слоя многолетнемерзлого грунта сдвигу по поверхности смерзания, принимаемое по прил. В СП 25.13330.2020 в зависимости от температуры и вида вечномерзлого грунта; h_i – толщина i -го слоя мерзлого или талого грунта, расположенного ниже подошвы слоя сезонного промерзания-оттаивания.

Т.к. расчетное сопротивление $R_{af,i}$ подразумевает конкретное значение случайной величины, полученной с определенной обеспеченностью, в дальнейшем в работе будем использовать понятие предельного напряжения сдвигу по поверхности смерзания $\sigma_{af,i}$, получаемое в результате лабораторных испытаний по ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости».

Глубина сезонного промерзания-оттаивания грунта (активного слоя грунта) ежегодно растет [11]. Глубина активного слоя изменяется от <15 см на севере Арктики до 1,5-2,0 м в южных районах зоны вечной мерзлоты. Толщина вечной мерзлоты обычно уменьшается с севера на юг, в то время как ее температура увеличивается с аналогичным градиентом.

В исследовании [12] по результатам геомониторинга в субарктической зоне Швеции за последние 30 лет установлено, что глубина активного слоя грунта увеличивается в среднем порядка 1 см/год, причем активный рост наблюдается именно за последние годы.

В соответствии с п. 7.4.3. СП 25.13330.2020, расчетную удельную касательную силу морозного пучения τ_{fh} следует определять опытным путем (в полевых или лабораторных условиях). Касательные силы морозного пучения определяются следующим образом:

1) В конце зимнего периода строятся графики изменения температуры грунта до границы фазовых переходов (глубины промерзания грунта d_f);

2) График температуры (рисунок 3) разбивается на три участка: первый участок – от глубины промерзания грунта до глубины с температурой грунта -1°C ; второй участок – от глубины с температурой грунта -1°C до глубины с температурой грунта -2°C ; третий участок – от глубины грунта с температурой -2°C до поверхности грунта;

3) В итоге, касательная сила морозного пучения F_f равна сумме произведений удельной касательной силы морозного пучения для разных температур и площадей боковых поверхностей свай: $F_f = \sum_{i=1}^{n=3} \tau_{fh,i} A_i = \tau_{fh,1} A_1 + \tau_{fh,2} A_2 + \tau_{fh,3} A_3$.

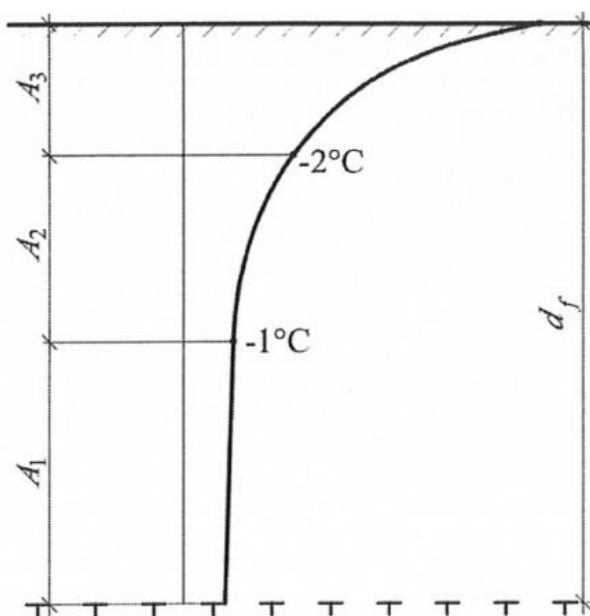


Рисунок 3 – Схематический график распределения температуры грунта для расчета касательной силы морозного пучения в конце зимнего периода

Испытания по определению касательной силы морозного пучения проводят по ГОСТ Р 56726-2015 «Грунты. Метод лабораторного определения удельной касательной силы морозного пучения».

Результаты исследования

Рассмотрим первый вариант расчета надежности, когда высоту активного слоя грунта можно опередить многократно и достаточно точно, чтобы считать ее детерминированной величиной. Тогда математическая модель предельного состояния (1) с учетом (2) может быть преобразована к виду (при обозначении функции предельного состояния как $\tilde{g}$):

$$\tilde{g} = \tilde{F}_f - \tilde{F} - u \sum_{i=1}^n \tilde{\sigma}_{af,i} h_i \leq 0. \quad (3)$$

Далее в исследовании будем рассматривать два подхода к расчету надежности: первый – рекомендованный ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и

оснований», который допускается использовать при полной статистической информации, и второй – на основе теории возможностей и теории нечетких множеств, который позволяет получить оперативную оценку надежности при неполной (ограниченной) статистической информации, при котором можно сократить затраты на испытания.

При вероятностно-статистическом подходе к расчету надежности по математической модели (3) используется известный подход к композиции распределений вероятностей при линейной зависимости для сложения нескольких случайных величин. Введем обозначения

$$\tilde{F}_f = X, \tilde{F} = Y, u \sum_{i=1}^n \tilde{\sigma}_{af,i} h_i = Z_i.$$

Для вероятностных моделей характеристик грунта X и Z_i может быть использовано нормальное распределение, в соответствии с Межгосударственным стандартом ГОСТ 20522-2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний». Если нагрузка также может быть описана нормальным распределением, то вероятность безотказной работы P можно вычислить как:

$$P = \Phi(\beta) = \Phi\left(\frac{m_g}{S_g}\right) = \Phi\left(\frac{m_X - m_Y - \sum_{i=1}^n m_{Z,i}}{\sqrt{S_X^2 + S_Y^2 + \sum_{i=1}^n S_{Z,i}^2}}\right), \quad (4)$$

где β – индекс надежности; $m_g, m_X, m_Y, m_{Z,i}$ – математические ожидания случайных величин $\tilde{g}, X, Y$ и Z_i , соответственно; $S_g, S_X, S_Y, S_{Z,i}$ – среднеквадратические отклонения случайных величин $\tilde{g}, X, Y$ и Z_i ; $\Phi(\beta)$ – значение функции, которое определяется по табличным значениям функции Лапласа.

Статистические характеристики для случайной величины X вычисляются через случайные параметры $\tilde{F}_f$ в виде: $m_X = m_{\tau_{fh,1}} A_1 + m_{\tau_{fh,2}} A_2 + m_{\tau_{fh,3}} A_3$,

$S_X = \sqrt{S_{\tau_{fh,1}}^2 A_1^2 + S_{\tau_{fh,2}}^2 A_2^2 + S_{\tau_{fh,3}}^2 A_3^2}$, где $m_{\tau_{fh,i}}$ и $S_{\tau_{fh,i}}$ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение, полученное для касательной силы пучения на i -ом участке.

Данный подход получил название FOSM (First Order Second Moment) в связи с тем, что для оценки надежности используются вторые моменты случайной величины (дисперсия), а функция предельного состояния $\tilde{g}$ раскладывается в первый ряд Тейлора.

Известно, что снеговая нагрузка может более объективно быть описана распределением Гумбеля (или обобщенным распределением экстремальных значений, тип I) [13, 14]. В этом случае математическую модель предельного состояния (3) можно преобразовать к виду:

$$\tilde{g} = \tilde{F}_f - \tilde{F}_{str} - u \sum_{i=1}^n \tilde{\sigma}_{af,i} h_i \leq \tilde{F}_{snow}, \quad (5)$$

где $\tilde{F}_{str}$ – нагрузка на сваю, которая характеризуется нормальным распределением; $\tilde{F}_{snow}$ – снеговая нагрузка на сваю, в качестве вероятностной модели которой используется закон распределения Гумбеля.

В этом случае на основе известной формулы [14] $P = \int_0^{+\infty} f_y(x) \cdot F_x(x) dx$, вероятность безотказной работы можно вычислить как:

$$P = 1 - \int_0^{+\infty} \exp \left[-\exp \left(\frac{\alpha - x}{\beta} \right) \right] \cdot \frac{1}{S_g \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - m_g)^2}{2S_g^2} \right] dx, \quad (6)$$

где α и β – параметры распределения Гумбеля для снеговой нагрузки [13]; m_g и S_g – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение функции предельного состояния $\tilde{g}$ по (5).

При наличии в математической модели типа (3) большого количества случайных величин с различными функциями распределения вероятностей, аналитические методы становятся трудоемкими для инженерных методик расчета надежности, и более рациональным подходом к расчету надежности сваи является подход на основе генерации псевдослучайных чисел методами Монте-Карло [15].

Рассмотрим второй подход, когда требуется дать оперативную оценку надежности сваи по критерию устойчивости. В данном случае будем рассматривать случайные величины $\tilde{g}$, X , Y и Z_i как нечеткие переменные в терминах теории нечетких множеств. Для их описания будем использовать наиболее распространенные [16, 17 и др.] в практике расчетов надежности строительных конструкций граничные функции распределения возможностей с аналитическим видом:

$$\underline{F}_g(g) = \begin{cases} \exp \left[-\left(\frac{a_g - g}{b_g} \right)^2 \right], & \text{если } g < a_g, \\ 1, & \text{если } g \geq a_g \end{cases}, \quad (7)$$

$$\overline{F}_g(g) = \begin{cases} 0, & \text{если } g < a_g \\ 1 - \exp \left[-\left(\frac{a_g - g}{b_g} \right)^2 \right], & \text{если } g \geq a_g \end{cases}. \quad (8)$$

где a_g – условное «среднее» нечеткой переменной $\tilde{g}$; b_g – мера «рассеяния» нечеткой переменной $\tilde{g}$.

Т.к. в математической модели предельного состояния (3) имеем сумму нечетких переменных, то можно для нечеткой переменной $\tilde{g}$ параметры функции распределения возможностей можно определить следующим образом: $a_g = a_X - a_Y - \sum_{i=1}^n a_{Z,i}$,

$b_g = b_X + b_Y + \sum_{i=1}^n b_{Z,i}$, где $a_X = 0,5 \cdot (X_{\max} + X_{\min})$ – условное «среднее» нечеткой переменной X ; $b_X = 0,5(X_{\max} - X_{\min})/\sqrt{-\ln \alpha}$ – мера «рассеяния» нечеткой переменной X , где $X_{\max}$ и $X_{\min}$ – наибольшее и наименьшее значение во множестве значений $\{x\}$ нечеткой переменной X , полученных из результатов измерений (испытаний); для нечетких переменных Y и Z_i параметры определяются аналогично; $\alpha \in [0; 1]$ – уровень среза (риска), значением которого задаются. Например, в исследовании [16] для фундаментов гидротехнических сооружений рекомендуется $\alpha = 0,20$.

Если выполняется условие $a_g \leq 0$, то в соответствии с [17], возможность безотказной работы принимается $R=1$. Возможность отказа Q по [17] можно вычислить как

$Q = \exp \left[- \left(\frac{a_g}{b_g} \right)^2 \right]$. Необходимость безотказной работы определяется как $N=1-Q$.

Надежность характеризуется интервалом $[N; R]$ или в вероятностной формулировке $P \in [\underline{P}; \overline{P}]$, где $\underline{P}$ и $\overline{P}$ – нижняя и верхняя граница интервала вероятности безотказной работы.

Однако не всегда удастся с высокой точностью или достоверностью определить глубину активного слоя грунта h_{act} . Рассмотрим вариант расчета надежности сваи, когда высоты слоев грунта также являются случайными величинами. В этом случае математическую модель предельного состояния (3) можно записать в виде:

$$\tilde{g} = \sum_{j=1}^k \tilde{\tau}_{fh,j} \tilde{A}_j - \tilde{F} - u \sum_{i=1}^n \tilde{\sigma}_{af,i} \tilde{h}_i \leq 0. \quad (9)$$

Т.к. зависимость случайных величин в (9) становится нелинейной, то при больших коэффициентах вариаций случайных величин расчет надежности методом FOSM может привести к неверным результатам. Это связано с тем, что в FOSM-подходе функция предельного состояния аппроксимируется рядом Тейлора первого порядка. При использовании аппроксимаций более высокого порядка появляются дополнительные слагаемые, которые можно игнорировать лишь при невысокой вариации и относительной линейности функций предельного состояния.

Для расчета надежности сваи по математической модели (9) следует использовать методы FORM (First Order Reliability Method), SORM (Second Order Reliability Method) [18] или методы Монте-Карло [15]. Т.к. данные алгоритмы хорошо известны, подробные выкладки по алгоритму расчета не приводятся для сокращения объема статьи. Более подробная информация по данным вероятностным подходам может быть найдена в работах [15, 17, 18, 19 и др.].

Усложнение математической модели предельного состояния путем ввода новых случайных величин также усложняет расчета надежности при неполной статистической информации. Для расчета надежности по математической модели предельного состояния (9) воспользуемся принципом обобщения Л. Заде [20].

Левую и правую ветви [17, 20] функции предельного состояния g можно записать как:

$$g_{лев} = u \sum_{j=1}^k \left[(a_{X_{1,j}} - b_{X_{1,j}} \beta) (a_{X_{2,j}} - b_{X_{2,j}} \beta) \right] - (a_Y + b_Y \beta) - u \sum_{i=1}^n \left[(a_{Z_{1,i}} + b_{Z_{1,i}} \beta) (a_{Z_{2,i}} + b_{Z_{2,i}} \beta) \right] \leq 0, \quad (10)$$

$$g_{np} = u \sum_{j=1}^k \left[(a_{X_{1,j}} + b_{X_{1,j}} \beta) (a_{X_{2,j}} + b_{X_{2,j}} \beta) \right] - (a_Y - b_Y \beta) - u \sum_{i=1}^n \left[(a_{Z_{1,i}} - b_{Z_{1,i}} \beta) (a_{Z_{2,i}} - b_{Z_{2,i}} \beta) \right] \leq 0, \quad (11)$$

где введены обозначения $\tilde{\tau}_{fh,j} = X_{1,j}$, $\tilde{A}_j = X_{2,j}$, $\tilde{F} = Y$, $\tilde{\sigma}_{af,i} = Z_{1,i}$, $\tilde{h}_i = Z_{2,i}$.

Если выполняется условие $a_g = u \sum_{j=1}^k \left[(a_{X_{1,j}}) (a_{X_{2,j}}) \right] - (a_Y) - u \sum_{i=1}^n \left[(a_{Z_{1,i}}) (a_{Z_{2,i}}) \right] \leq 0$, то возможность безотказной работы R принимается равной $R=1$.

Далее по правой ветви функции g при условии $g_{np} = 0$ определяется параметр β (из полученных значений принимается минимальный по модулю). Возможность отказа Q

вычисляется по следующей формуле: $Q = \exp(-\beta_{\min}^2)$. Необходимость безотказной работы определяется как $N=1-Q$. Тогда надежность сваи по критерию устойчивости запишется как $[N; R=1]$ или в вероятностном виде $P \in [P; \bar{P}]$.

При росте количества i -ых слоев грунта ниже глубины активного слоя грунта расчет проводится аналогичным образом, лишь увеличивается число слагаемых в выражениях (10) и (11).

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 4 представлена зависимость в виде символов между расчетным сопротивлением сдвигу грунта по поверхности смерзания от температуры.

σ_{af} , кПа

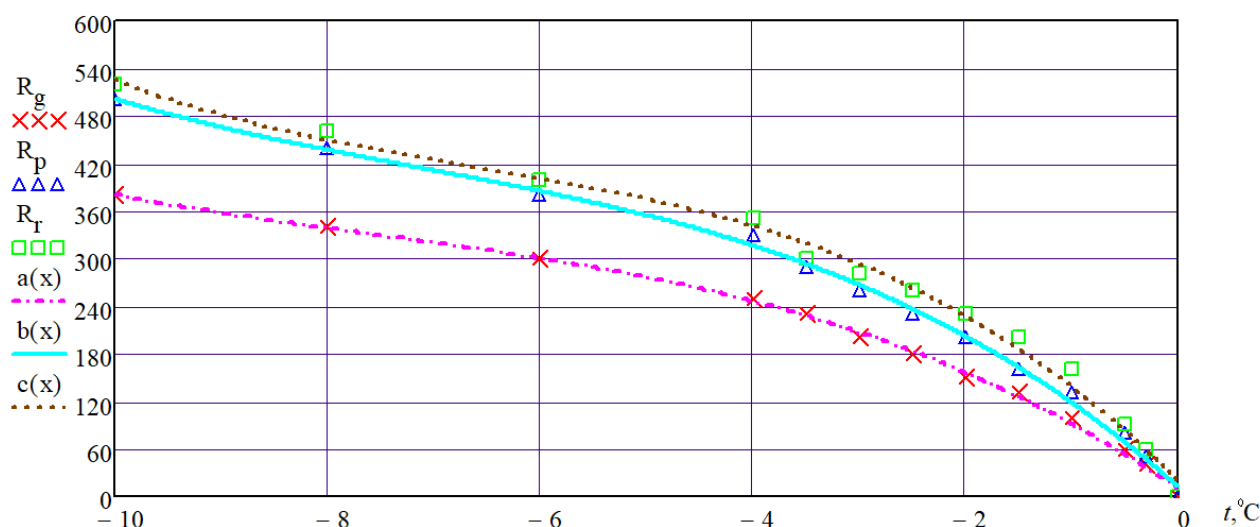


Рисунок 4 – Аппроксимация зависимости расчетного сопротивления сдвигу грунта по поверхности смерзания (R_g – для глинистых грунтов; R_p – для песчаных грунтов; R_r – для известково-песчаного раствора) от температуры

Данная зависимость может быть аппроксимирована следующими функциями:

- для глинистых грунтов: $a(t) = -0,412t^3 - 9,418t^2 - 89,917t + 10,914$ (кПа);
- для песчаных грунтов: $b(t) = -0,605t^3 - 12,974t^2 - 118,003t + 13,261$ (кПа);
- для известково-песчаного раствора: $a(t) = -0,835t^3 - 16,627t^2 - 133,076t + 21,336$ (кПа);

Приняв линейное распределение температуры грунта вдоль длины сваи, что идет в запас надежности по рисунку 2, можно получить выражение для расчета силы смерзания, удерживающей сваю от морозного пучения:

$$F_r = u \cdot \int_{t_H}^0 a(t) dt, \text{ кН},$$

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

Функция предельного состояния для расчета надежности в данном случае может быть преобразована к виду:

$$\tilde{g} = \tilde{F} - \tilde{F}_{str} - F_r \leq 0. \quad (12)$$

Расчет надежности проводится на основе вышеописанного FOSM-алгоритма при полной статистической информации или на основе положений теории возможностей, в случае ограниченной статистической информации.

Метод расчета надежности на основе теории возможностей и теории нечетких множеств также удобен тем, что существует возможность дать оперативную оценку надежности при малом числе контрольных образцов, что позволит сократить финансовые и временные затраты. В условиях стремительной деградации вечномёрзлых грунтов и необходимости контроля надежности многих сооружений одновременно, данный метод расчета надежности (или аналогичные: на основе неравенства П.Л. Чебышёва; на основе теории случайных множеств и т.д. [21]) может быть крайне полезен.

Например, возможен вариант оценки долговечности свайных фундаментов по критерию надежности или определения сроков до капитального ремонта или усиления фундаментов. На рисунке 5 представлен график функции действительной надежности сваи P_{real} по критерию устойчивости, которая снижается со временем вследствие увеличения активного слоя грунта и касательных сил морозного пучения.

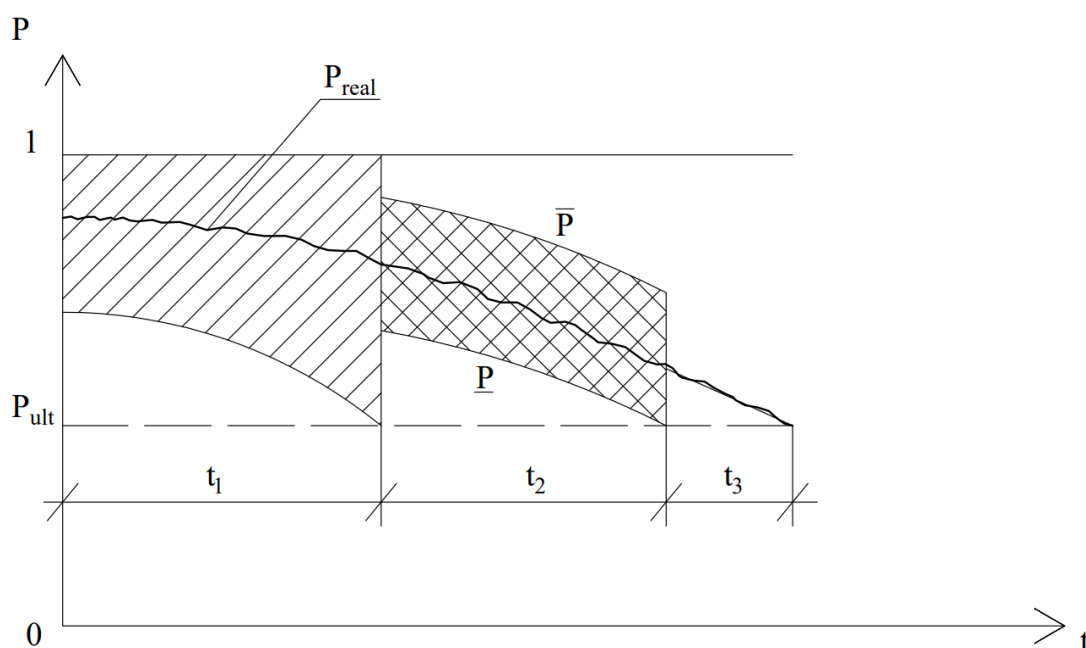


Рисунок 5 – Диаграмма контроля надежности сваи в течение времени эксплуатации

В период времени, когда нижняя граница оценки надежности сваи $\underline{P}$ не превышает предельного допустимого уровня надежности P_{ult} , контроль и оценка надежности выполняется подходами на основе теории возможностей и теории нечетких множеств (или аналогичными при неполной статистической информации). После того, как нижняя граница оценки надежности $\underline{P}$ превысит предельное значение надежности P_{ult} , потребуется повысить количество и качество статистической информации для более точной оценки надежности. В рамках данного периода времени можно использовать подходы к анализу надежности на основе р-блоков вероятностных распределений [14], что позволит получить более узкие границы оценки надежности.

После достижения нижней границей оценки надежности $\underline{P}$ предельного значения P_{ult} в новом периоде времени t_2 , использование интервальной оценки надежности может быть небезопасно. Тогда в следующем периоде возникает необходимость в получении точной дискретной оценки надежности путем применения вероятностно-статистических методов анализа надежности.

В третьем периоде путем использования регрессионных моделей по результатам оценки надежности в некоторых промежутках времени можно получить оценку времени до достижения сваей предельного уровня надежности P_{ult} . В течение этого периода необходимо принять решение о необходимости усиления конструкции фундаментов, снижения допустимой нагрузки или других мероприятий, повышающих уровень надежности свай и продлевающих срок их эксплуатации.

Выводы

1. Анализ исследований показывает нарастающую деградацию вечной мерзлоты с увеличением глубины активного слоя (слоя промерзания-оттаивания) грунта, что снижает надежность свай по критерию устойчивости при действии касательных сил морозного пучения;

2. В исследовании предложены подходы к расчету надежности свай на вечномерзлых грунтах по критерию устойчивости при полной и ограниченной статистической информации о случайных величинах в математических моделях предельных состояний. Использование предложенных подходов к расчету надежности при ограниченной статистической информации позволяет получить оценку надежности при меньшем числе испытаний/измерений, однако сама оценка будет менее информативной – в интервальном виде;

3. Предложены варианты аппроксимации нормативных зависимостей расчетного сопротивления сдвигу грунта по поверхности смерзания от температуры, которые могут быть использованы при оценке силы смерзания, удерживающей сваю от выпучивания;

4. Разработана методика контроля надежности и прогноза долговечности свай на вечномерзлых грунтах, позволяющая обоснованно сократить затраты на мероприятия по оценке надежности в начальные периоды, что может позволить увеличить количество обследуемых зданий и сооружений при аналогичных затратах на обследование технического состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хрусталева Л.Н., Давыдова И.В. Прогноз потепления климата и его учет при оценке надежности оснований зданий на вечномерзлых грунтах // Криосфера Земли. 2007. № 2. С. 68–75.
2. Wu Q., Zhang T. Changes in active layer thickness over the Qinghai- Tibetan Plateau from 1995 to 2007 // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2010. Vol. 115. Pp. 1-12.
3. Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России // Метеорология и гидрология. 2002. № 6. С. 15–22.
4. Анисимов О.А., Лавров С.А. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК // Технологии ТЭК. 2004. №3. С. 78–83.
5. Streletskiy D., Anisimov O., Vasiliev A. Permafrost degradation // 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 “Bolvensky” // Earth's Cryosphere. 2010. Vol. 14. No. 3. Pp. 3-14.
7. Oberman N.G. Contemporary permafrost degradation of the European north of Russia // Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, June 29-July 3. 2008. Pp. 1305-1310.
8. Larsen P.H., Goldsmith S., Smith O., Wilson M.L., Strzepek K., Chinowsky P., Saylor B. Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change // Global Environmental Change. 2008. Vol. 18(3). Pp. 442-457.
9. Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Hatleberg E. Infrastructure and a changing climate in the Russian Arctic: a geographic impact assessment // Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost. 2012. Vol. 1. Pp. 407-412.
10. Стрелецкий Д.А., Шикломанов Н.И., Гребенец В.И. Изменение несущей способности мерзлых грунтов в связи с потеплением климата на Севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2012. Т. 16. № 1. С. 22-32.
11. Connon R., Devoie E., Hayashi M., Veness T., Quinton W. The influence of shallow taliks on permafrost thaw and active layer dynamics in subarctic Canada // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2018. Vol. 123(2). Pp. 281-297.

12. Akerman H.J., Johansson M. Thawing permafrost and thicker active layers in sub- arctic Sweden // *Permafrost and periglacial processes*. 2008. Vol. 19. No. 3. Pp. 279-292.
13. Золина Т.В., Садчиков П.Н. Моделирование снеговой нагрузки на покрытие промышленного здания // *Вестник МГСУ*. 2016. № 8. С. 25–33.
14. Соловьева А. А., Соловьев С.А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 2. С. 153–167.
15. Jahani E., Shayanfar M.A., Barkhordari M.A. A new adaptive importance sampling Monte Carlo method for structural reliability // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2013. Vol. 17. No. 1. Pp. 210-215.
16. Юделевиц А.М. Системный подход к оценке надежности бетонных плотин // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*. 2017. Т. 284. С. 82–88.
17. Уткин В.С., Уткин Л.В. Определение надежности строительных конструкций. Вологда: Вологодский государственный технический университет, 2000. 166 с.
18. Zhang J., Du X. A second-order reliability method with first-order efficiency // *Journal of Mechanical Design*. 2010. Vol. 132. No. 10. Pp. 101006.
19. Melchers R.E., Beck A.T. *Structural reliability analysis and prediction*. John Wiley & Sons, 2018. 528 p.
20. Zadeh L.A. Fuzzy sets // *Information and control*. 1965. Vol. 8. Pp. 338–353.
21. Соловьев С.А. Вероятностная оценка промышленной безопасности при неполной статистической информации // *Безопасность труда в промышленности*. 2020. № 9. С. 88–93.

REFERENCES

1. Hrustalev L.N., Davydova I.V. Prognoz potepleniya klimata i ego uchet pri ocenke nadezhnosti osnovanij zdaniy na vechnomerzlyh gruntah [Forecast of climate warming and account of it at estimation of foundation reliability for buildings in permafrost zone]. *Kriosfera Zemli*. 2007. No. 2. Pp. 68–75. (rus)
2. Wu Q., Zhang T. Changes in active layer thickness over the Qinghai- Tibetan Plateau from 1995 to 2007. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2010. Vol. 115. Pp. 1-12.
3. Anisimov O.A., Beloluckaya M.A. Ocenka vliyaniya izmeneniya klimata i degradacii vechnoj merzloty na infrastrukturu v severnyh regionah Rossii [Evaluation of the effect of climate change and permafrost degradation on infrastructure in the northern regions of Russia]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2002. No. 6. Pp. 15–22. (rus)
4. Anisimov O.A., Lavrov S.A. Global'noe poteplenie i tayanie vechnoj merzloty: ocenka riskov dlya proizvodstvennykh ob"ektov TEK [Global warming and thawing of permafrost: risk assessment for production facilities of the fuel and energy complex]. *Tekhnologii TEK*. 2004. No. 3. Pp. 78–83. (rus)
5. Streletskiy D., Anisimov O., Vasiliev A. Permafrost degradation. *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 “Bolvensky”. *Earth's Cryosphere*. 2010. Vol. 14. No. 3. Pp. 3-14.
7. Oberman N.G. Contemporary permafrost degradation of the European north of Russia. *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, June 29-July 3*. 2008. Pp. 1305-1310.
8. Larsen P.H., Goldsmith S., Smith O., Wilson M.L., Strzepek K., Chinowsky P., Saylor B. Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change. *Global Environmental Change*. 2008. Vol. 18(3). Pp. 442-457.
9. Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Hatleberg E. Infrastructure and a changing climate in the Russian Arctic: a geographic impact assessment. *Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost*. 2012. Vol. 1. Pp. 407-412.
10. Streleckij D.A., SHiklomanov N.I., Grebenec V.I. Izmenenie nesushchej sposobnosti merzlyh gruntov v svyazi s potepleniem klimata na Severe Zapadnoj Sibiri [Changes of foundation bearing capacity due to climate warming in northwest siberia]. *Kriosfera Zemli*. 2012. Vol. 16. No. 1. Pp. 22-32. (rus)
11. Connon R., Devoie E., Hayashi M., Veness T., Quinton W. The influence of shallow taliks on permafrost thaw and active layer dynamics in subarctic Canada. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2018. Vol. 123(2). Pp. 281-297. (rus)
12. Akerman H.J., Johansson M. Thawing permafrost and thicker active layers in sub- arctic Sweden. *Permafrost and periglacial processes*. 2008. Vol. 19. No. 3. Pp. 279-292.
13. Zolina T.V., Sadchikov P.N. Modelirovanie snegovoj nagruzki na pokrytie promyshlennogo zdaniya [Modeling of the snow load on the roofs of industrial buildings]. *Vestnik MGSU*. 2016. No. 8. Pp. 25–33. (rus)
14. Solov'eva A.A., Solov'ev S.A. Metod ocenki nadezhnosti elementov ploskih ferm na osnove p-blokov [Reliability analysis of steel planar trusses based on p-box models]. *Vestnik MGSU*. 2021. Vol. 16. No. 2. Pp. 153–167. (rus)
15. Jahani E., Shayanfar M.A., Barkhordari M.A. A new adaptive importance sampling Monte Carlo method for structural reliability. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2013. Vol. 17. No. 1. Pp. 210-215.

16. YUdelevich A.M. Sistemnyj podhod k ocenke nadezhnosti betonnyh plotin [System approach to assessment of concrete dams reliability]. *Izvestiya Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedeneeva*. 2017. Vol. 284. Pp. 82–88. (rus)
17. Utkin V.S., Utkin L.V. *Opredelenie nadezhnosti stroitel'nyh konstrukcij* [Calculation of structural reliability]. Vologda: Vologodskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2000. 166 p. (rus)
18. Zhang J., Du X. A second-order reliability method with first-order efficiency. *Journal of Mechanical Design*. 2010. Vol. 132. No. 10. Pp. 101006
19. Melchers R.E., Beck A.T. *Structural reliability analysis and prediction*. John Wiley & Sons, 2018. 528 p.
20. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and control*. 1965. Vol. 8. Pp. 338–353.
21. Solovyev S.A. Veroyatnostnaya ocenka promyshlennoj bezopasnosti pri nepolnoj statisticheskoj informacii [Probabilistic estimation of industrial safety with incomplete statistic data]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2020. No. 9. Pp. 88–93. (rus)

Информация об авторах:

Соловьев Сергей Александрович

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства.
E-mail: solovevsa@vogu35.ru

Сушев Леонид Андреевич

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, Россия,
аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства.
E-mail: sushevla@vogu35.ru

Кочкин Александр Александрович

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, Россия,
доктор технических наук, зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства.
E-mail: kochkinaa@vogu35.ru

Соловьева Анастасия Андреевна

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, Россия,
аспирант, ассистент кафедры промышленного и гражданского строительства.
E-mail: solovevaaa@vogu35.ru

Information about the authors:

Solovyev Sergey Al.

Vologda State University, Vologda, Russia,
candidate of tech, sciences, associate professor of the industrial and civil construction department.
E-mail: solovevsa@vogu35.ru

Sushev Leonid An.

Vologda State University, Vologda, Russia,
post-graduate student of the industrial and civil construction department.
E-mail: sushevla@vogu35.ru

Kochkin Alexander Al.

Vologda State University, Vologda, Russia,
doctor of tech, sciences, head of the industrial and civil construction department.
E-mail: kochkinaa@vogu35.ru

Soloveva Anastasia An.

Vologda State University, Vologda, Russia,
post-graduate student, assistant of the industrial and civil construction department.
E-mail: solovevaaa@vogu35.ru