

УДК 624.139.2/.3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПРИ РАСЧЕТЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВЕЧНОМЕРЗЛОГО ОСНОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

*Излагается методика определения температурного коэффициента в условиях меняющегося климата, основанная на решении вероятностно-экономической задачи. Приведена таблица температурного коэффициента для свайных опор линий электропередач, антенно-мачтовых сооружений и трубопроводов, расположенных в районах криолитозоны, для которых известен сценарий климатических изменений. Определена температура вечномерзлого грунта на глубине нулевых годовых теплооборотов и глубина сезонного оттаивания.*



**ХРУСТАЛЕВ  
ЛЕВ НИКОЛАЕВИЧ**

Доктор технических наук, профессор кафедры геокриологии МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия).

Основные направления научной деятельности – теплофизика мерзлых грунтов, геотехника.

Автор более 130 опубликованных работ.



**ЕМЕЛЬЯНОВА  
ЛАРИСА ВАЛЕНТИНОВНА**

Кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель кафедры геокриологии МГУ им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия).

Основные направления научной деятельности – теплофизика мерзлых грунтов, геокриология.

Автор более 20 опубликованных работ.

вера, Западной, Средней и Восточной Сибири свидетельствует о том, что почти на всех этих территориях в будущем может произойти антропогенное повышение средней годовой температуры воздуха с интенсивностью, возрастающей с севера на юг и с запада на восток. На Европейском Севере линейный тренд повышения средней годовой температуры воздуха составит 0,005...0,008 °С/год, в отдельных районах он будет даже отрицательным, в Западной Сибири – 0,003...0,027, Средней и Восточной Сибири – 0,011...0,088 °С/год.

Повышение температуры воздуха приведет к увеличению температуры вечномерзлого грунта, которое в различных регионах будет протекать с разной интенсивностью [2]. По интенсивности изменения этой температуры регионы можно расположить в следующий возрастающий ряд: Европейский Север – Западная Сибирь – Средняя и Восточная Сибирь. В условиях потепления климата и повышения температуры грунтов надежность объектов инфраструктуры уменьшится, что, в свою очередь, приведет к снижению их долговечности и массовым деформациям. Наиболее уязвимыми к климатическим изменениям окажутся объекты, построенные с использованием грунтов оснований по принципу I.

В связи с этим перед инженерной геокриологией стоит проблема обеспечения надежности возводимых на вечномерзлых грунтах объектов. Решить её возможно лишь с позиций теории надежности геотехнических систем путем управления техногенными рисками при промышленном и гражданском освоении северных регионов. Поэтому вероятностно-статистические расчеты должны стать неотъемлемой частью проектирования. Первым шагом в этом направлении является совмещение нормативных детерминистических методов расчета с вероятностными. "Мостом" между ними служит температурный коэффициент  $\gamma$ , который вхо-

### Введение

По данным метеорологических наблюдений с середины 1960-х годов на планете повышается средняя годовая температура воздуха. Выполненный по [1] прогноз среднегодовой температуры воздуха для территорий Европейского Се-

дит в расчет несущей способности вечномерзлого основания и нашел отражение в СНиП [3].

### Постановка задачи

Температурный коэффициент  $\gamma_t$  находится из условия, когда

$$C = C_0 + C_R = \min, \quad (1)$$

где  $C$  – суммарная приведенная стоимость системы "сооружение-основание", руб.;  $C_0$  – начальная (сметная) стоимость системы, руб.;  $C_R$  – цена риска, под которой понимается стоимостной эквивалент надежности системы, руб.

Отсутствию глобального изменения температуры соответствует температурный коэффициент  $\gamma_t^0$  и цена риска  $C_R^0$ . Эти параметры связаны между собой следующими зависимостями [2, 4]:

$$C_R^0 = C_0 m_0(\gamma) \sum_{k=1}^n K_0(k); \quad (2)$$

$$K_0 = \frac{1-k/n}{(1+E)^k}; \quad (3)$$

$$m_0(\gamma) = \frac{\exp(-\gamma^2)}{\gamma\sqrt{2\pi}}; \quad (4)$$

$$\gamma = (1-\gamma_t^0)/v, \quad (5)$$

где  $m_0(\gamma)$  – математическое ожидание числа ежегодных отказов системы;  $K_0(k)$  – коэффициент, учитывающий остаточную стоимость системы на момент ее отказа;  $k$  – число лет с начала эксплуатации системы к моменту ее отказа;  $n$  – число лет в период эксплуатации системы;  $E$  – нормативный коэффициент приведения разновременных затрат, равный 0,08;  $\gamma$  – коэффициент безопасности;  $v$  – коэффициент вариации несущей способности основания.

При наличии глобального изменения климата примем в качестве оптимального решение, при котором цена риска не изменится. Для этого следует определить коэффициент  $\gamma_t$ , при котором выполняется условие  $C_R \approx C_R^0$  ( $C_R$  – цена риска при глобальном изменении климата). При изменении климата математическое ожидание числа отказов системы будет меняться каждый год в зависимости от климатических условий. Цена риска в этом случае

$$C_R = C_0 \sum_{k=1}^n m(\gamma, k) K_0(k). \quad (6)$$

$$\text{Тогда } \frac{C_R}{C_R^0} = \frac{\sum_{k=1}^n m(\gamma, k) K_0(k)}{m_0(\gamma) \sum_{k=1}^n K_0(k)} \approx 1. \quad (7)$$

Уравнение (7) решается методом итераций.

### Метод решения

Продемонстрируем последовательность расчетов линейных сооружений на свайных опорах, которые лишены охлаждающего устройства, и поэтому при потеплении подвергаются наибольшей опасности.

Согласно [3]:

$$\gamma_t = 1,15(1+v) - 1,61v\sqrt{\ln(n/v)}; \quad (8)$$

$$v = 0,45 \frac{[(T_{bf} - T_0)/A]^{1/3} \sigma D_e}{[T_{bf} - T_e - 0,24\sqrt{(T_{bf} - T_e)}]}; \quad (9)$$

$$T_e = (T_0 - T_{bf})\alpha_e k_{ts} + T_{bf}, \quad (10)$$

где  $T_{bf}$  – температура начала замерзания грунта, определяемая согласно приложению Б [3];  $T_0$ , °С – среднегодовая температура вечномерзлого грунта, вычисляемая согласно приложению Г [3];  $A$  – амплитуда сезонных колебаний температуры наружного воздуха, равная полуразности среднемесячной температуры самого теплого и самого холодного месяцев [5];  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение средней годовой температуры наружного воздуха, определяемое по таблице Н2 [3];  $D_e$  – коэффициент затухания случайных колебаний температуры с глубиной;  $\alpha_e$  – коэффициент затухания температурных колебаний с глубиной;  $k_{ts}$  – коэффициент теплового влияния изменения поверхностных условий при глубине погружения свай ниже подошвы слоя сезонного оттаивания более 6 м, принимаемый равным 1;

$$D_e = \begin{cases} [0,78 + 0,74\ln(y)]/y & \text{при } y > 1; \\ 1 - 0,22y & \text{при } y \leq 1; \end{cases} \quad (11)$$

$$\alpha_e = 0,44\sqrt{y}; \quad (12)$$

$$y = 0,019(L - \xi)\sqrt{C_f/\lambda_f}; \quad (13)$$

$L$  – глубина погружения свай, м;  $\xi$  – глубина сезонного оттаивания грунта, м;  $C_f$  – теплоемкость мерзлого грунта, Вт·ч/(м<sup>3</sup>·°С);  $\lambda_f$  – теплопроводность мерзлого грунта, Вт/(м·°С).

После вычисления  $\gamma_t^0$  по (5) находят  $\gamma$  для случая отсутствия глобального изменения климата и по (4) –  $m_0(\gamma)$ . Далее задаются значением  $\gamma_t$  и расчеты ведут для каждого прогнозного года  $k = 1, 2, 3...n$ , последовательно вычисляя  $\gamma$  по (5) при наличии глобального изменения климата, по (4) –  $m(\gamma, k)$  и по (3) –  $K_0(k)$ . Затем определяют отношение (7). Если оно не равно единице, то задаются новым значением  $\gamma_t$  и расчет повторяют до тех пор, пока это отношение не будет равно единице.

Метеостанции	Местоположение		Длина свай 9 м		Длина свай 12 м	
	широта, град.	долгота, град.	$\gamma_t$	$\gamma_t^0$	$\gamma_t$	$\gamma_t^0$
<b>Европейский Север</b>						
Новая Земля	72,4	52,7	0,623	0,675	0,7676	0,799
Амдерма	69,8	61,7	0,843	0,832	0,9186	0,913
Нарьян-Мар	67,6	53,0	0,368	0,333	0,557	0,530
Воркута	67,5	64,0	0,574	0,593	0,7106	0,723
<b>Западная Сибирь</b>						
о. Белый	73,3	70,7	0,600	0,932	0,905	0,986
Марре-Сале	69,7	66,8	0,440	0,846	0,731	0,934
Салехард	66,6	66,6	0,110	0,560	0,463	0,712
Полуй	66,0	68,7	*	0,148	*	0,347
Надым	65,6	72,5	*	0,652	*	0,768
Тарко-Сале	64,9	77,8	*	0,187	*	0,384
<b>Средняя и Восточная Сибирь</b>						
Мирный	62,5	114,0	0,488	0,722	0,707	0,836
Туой-Хая	62,5	111,2	0,139	0,609	0,470	0,752
Якутск	62,1	129,5	*	0,781	0,245	0,887
Усть-Мая	60,4	134,5	0,871	0,914	0,964	0,976
Витим	59,5	112,6	*	0,556	*	0,719
Чульман	56,8	124,9	*	0,828	*	0,915

\* - строительство по принципу I требует установки охлаждающих устройств.

Особенность расчетов заключается в том, что на каждом шаге в таблицы вводятся прогнозные значения  $T_0$  и  $\xi$  для районов Европейского Севера, Западной, Средней и Восточной Сибири, которые приведены в [2].

### Результаты расчетов

В таблице приведены результаты расчетов температурного коэффициента  $\gamma_t$  с учетом и  $\gamma_t^0$ , без учета глобального изменения климата для свайных опор линий электропередач, антенно-мачтовых сооружений и трубопроводов, расположенных в тех районах криолитозоны, для которых проводились прогнозные расчеты климатических изменений [2]. Период эксплуатации сооружений принимался равным 30 годам (2012...2042).

Из таблицы видно, что  $\gamma_t$  при учете глобального изменения климата уменьшается в большинстве районов, а, следовательно, снижается и расчетная несущая способность вечномерзлых оснований. В некоторых случаях (отмечены в таблице звездочками) коэффициенты приближаются к нулю, что означает, что строительство сооружений с сохранением грунтов оснований в мерзлом состоянии только за счет увеличения опорной части фундаментов здесь невозможно и требуются специальные охлаждающие устройства, например, термосифоны.

Отношение  $\gamma_t^0/\gamma_t$  показывает во сколько раз должна быть увеличена опорная часть фундамента при учете изменения климата, т.е. насколько следует увеличить число свай. На Европейском Севере число свай должно быть увели-

чено в 1,02...1,08 раза, в Западной Сибири – 1,09...1,92, в Средней и Восточной Сибири – 1,18...4,38.

Если в некоторых районах криолитозоны прогнозируется понижение температуры грунтов, например, в районе метеостанций Амдерма и Нарьян-Мар, то отношение  $\gamma_t^0/\gamma_t$  становится меньше единицы, что позволяет снизить расчетное число свай. Однако данное обстоятельство учесть в проектировании невозможно и оно идет в запас устойчивости сооружения.

Температурный коэффициент возрастает с увеличением глубины погружения свай в вечномерзлый грунт (см. таблицу), а отношение  $\gamma_t^0/\gamma_t$  уменьшается. Это объясняется тем, что случайные колебания температуры с глубиной затухают. Отсюда можно сделать вывод, что длинные сваи всегда предпочтительнее коротких.

### Выводы

1. Температурный коэффициент позволяет учесть глобальное изменение климата при строительстве сооружений с сохранением грунтов оснований в мерзлом состоянии, если известен климатический сценарий. Климатические изменения при потеплении учитываются путем увеличения опорной части фундаментов, расположенных в многолетнемерзлых грунтах. При похолодании её размер не меняется.

2. Коэффициент  $\gamma_t$  определяется из решения вероятностно-экономической задачи, которая в условиях климатических изменений приобретает особое значение. Оно заключается в том, что вероятностные методы учитывают случайную изменчивость всей расчетной информации и на этой основе позволяют оценивать опасности (риски) возможных аварий сооружений до окончания срока их эксплуатации, что невозможно сделать, используя только детерминистические расчеты.

3. Учет глобального потепления путем снижения температурного коэффициента вызывает увеличение сметной стоимости сооружения, что можно считать оправданным.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Хрусталева Л.Н., Медведев А.В., Пустовойт Г.П. Многолетние изменения температуры воздуха и устойчивость проектируемых в криолитозоне сооружений // Криосфера Земли. - 2000. - Т. IV. - № 3. - С. 35-41.
- Хрусталева Л.Н., Пармузин С.Ю., Емельянова Л.В. Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата. - М.: Университетская книга, 2011. - 260 с.
- СП 25.13330.2011. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88.
- Хрусталева Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне. - М.: Изд-во Московского университета, 2005. - 544 с.
- СП 131.13330.2012. Строительная климатология.