

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 551.583:624.139

**ПРОГНОЗ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА И ЕГО УЧЕТ ПРИ ОЦЕНКЕ
НАДЕЖНОСТИ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ**

Л.Н. Хрусталева, И.В. Давыдова

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т,
119992, Москва, Воробьевы горы, Россия, lev_kh@rambler.ru*

По данным метеорологических наблюдений установлено, что с середины 60-х гг. XX столетия на планете происходит устойчивое повышение средней годовой температуры воздуха. Повышение температуры вечномерзлых грунтов вследствие потепления климата приведет к уменьшению надежности мерзлых грунтов как оснований инженерных сооружений.

Для десяти районов выполнен прогноз среднегодовой температуры воздуха и многолетнемерзлых грунтов. С использованием вероятностно-статистического подхода вычислены надежности и коэффициенты надежности оснований с учетом и без учета изменения климата. Проанализированы зависимости надежности и коэффициента надежности от различных параметров – климатических, геологических, конструктивных и экономических. Показана необходимость применения вероятностных методов в проектных расчетах.

Вечномерзлые грунты, климат, надежность оснований, коэффициент надежности

**FORECAST OF CLIMATE WARMING AND ACCOUNT OF IT AT ESTIMATION
OF FOUNDATION RELIABILITY FOR BUILDINGS IN PERMAFROST ZONE**

L.N. Khrustal'eva, I.V. Davidova

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geology,
119992, Moscow, Vorobyovy Gory, Russia, lev_kh@rambler.ru*

According to meteorological monitoring, it has been established that from the middle of 60th years of the XX century there is a steady increase in mean annual air temperature on the planet. Permafrost temperature increase caused by climate change lowers ground reliability when used as foundation of buildings.

For ten areas, the forecast of mean annual temperature of air and of permafrost has been made. Using a statistical approach, the foundation reliability and the factor of reliability have been calculated with or without consideration of climate change. Dependences of reliability factor and reliability on various parameters – climatic, geological, constructive and economic have been analyzed. Necessity of statistical methods for design calculations has been demonstrated.

Permafrost ground, climate, reliability of foundations, coefficient of reliability

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных параметров, определяющих несущую способность вечномерзлых грунтов как оснований зданий, является их температура, зависящая от температуры воздуха. По данным метеорологических наблюдений установлено, что с середины 60-х гг. XX в. на планете происходит устойчивое повышение средней годовой температуры воздуха. Это потепление, с одной стороны, связано с естественно-исторической динамикой климата, а с другой – с хозяйственной деятельностью человека, в результате которой в атмосферу Земли ежегодно выбрасываются многие тысячи тонн уг-

лекислого газа, метана, закиси азота и других газов, создающих парниковый эффект. Считается, что антропогенное влияние на температуру воздуха стало практически заметным начиная с 1970 г., и ожидается, что к середине XXI в. оно вызовет повышение средней годовой температуры воздуха с 1,5 до 7,0 °С. Это, в свою очередь, приведет 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.

Для изучения реакции криолитозоны на повышение температуры воздуха А.В. Павловым [Павлов и др., 2002; Павлов, 2003] были собраны, систематизированы и проанализированы данные геокриологических стационаров, функционирующих в настоящее время и имеющих длительные ряды наблюдений (не менее 20 лет). Современное повышение температуры грунтов на глубине 10 м составляет около 0,3 °С на Европейском Севере и 1,2 °С на севере Западной Сибири. При этом соотношение между повышением температуры грунтов и воздуха составляет 0,33–0,75 °С.

Повышение температуры воздуха и грунтов приводит к повышению расчетной температуры оснований зданий, определяющей расчетное сопротивление мерзлого грунта. Зная величину снижения расчетного сопротивления во времени, можно наметить инженерные мероприятия, которые обеспечат необходимую несущую способность оснований зданий в условиях потепления климата. На стадии проектирования главным из них является увеличение опорной конструкции фундамента, т. е. повышение коэффициента надежности. Таким образом, рассматриваемая нами проблема распадается на три взаимосвязанные задачи:

- прогноз средней годовой температуры воздуха;
 - прогноз температуры грунта;
 - определение коэффициента надежности.
- Рассмотрим их последовательно.

ПРОГНОЗ СРЕДНЕЙ ГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Как показано в работе [Хрусталева и др., 2000], закономерности многолетних изменений среднегодовой температуры воздуха могут быть установлены методом авторетроспективного анализа метеорологических рядов наблюдений. Метод основан на гармоническом разложении временных рядов и учитывает циклические, трендовые и случайные изменения в метеорологических рядах. При этом прогнозная формула записывается в следующем виде:

$$T_{air}(\tau) = T_{air}^{cp} + \sum_{i=1}^n A_i \sin\left(\frac{2\pi}{y_i}(\tau + \gamma_i)\right) + q(\tau - \tau_0) + \delta, \quad (1)$$

где $T_{air}(\tau)$ – прогнозная температура воздуха, °С; T_{air}^{cp} – средняя многолетняя температура воздуха, °С; A_i – амплитуда i -й гармоники, °С; y_i – период i -й гармоники, лет; $(2\pi\gamma_i)/y_i$ – фаза i -й гармоники, рад; n – число гармоник, на которые раскладывается метеорологический ряд наблюдений за температурой воздуха; q – линейный тренд температуры воздуха, обусловленный антропогенным фактором, °С/год; τ – год прогноза (например, 2005); τ_0 – год начала линейного тренда температуры (рубежный год, например, 1971); δ – случайная величина, подчиняющаяся нормальному закону распределе-

Таблица 1. Параметры прогнозной формулы для района г. Мирный, Республика Саха (Якутия)

i	y_i , лет	A_i , °С	γ_i , лет
1	2,1	0,14	0,30
2	2,7	0,13	1,69
3	4,3	0,13	3,11
4	7,1	0,21	0,48
5	9,2	0,07	3,94
6	21,3	0,06	–5,15
7	31,9	0,07	6,94

Примечание. i – номер гармоники при разложении температуры воздуха в ряд Фурье; y_i – период i -й гармоники; A_i – амплитуда i -й гармоники; $(2\pi\gamma_i)/y_i$ – фаза i -й гармоники; $T_{air}(\tau)$ – прогнозная температура воздуха, °С; $T_{air}^{cp} = -7,8$ °С; q – линейный тренд температуры воздуха, обусловленный антропогенным фактором ($q = 0,031$ °С/год); τ_0 – год начала линейного тренда температуры (рубежный год, 1971); σ – среднеквадратическое отклонение случайной величины (белый шум, $\sigma = 1,28$ °С).

ния, с математическим ожиданием, равным нулю, и средним квадратическим отклонением, равным σ (белый шум), град.

Параметры уравнения (1) подбираются методом наименьших квадратов с использованием классического алгоритма Лежандра и метода покоординатного спуска минимизации средней квадратической ошибки. Все расчеты производятся на ЭВМ по специально разработанной программе. В табл. 1 приведен пример реализации этой программы.

ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРЫ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Математической моделью эволюции криолитозоны обычно является задача Стефана. Она относится к классу нелинейных задач и не имеет не только точных, но и приближенных аналитических решений, за исключением простейших случаев. Поэтому нами для прогноза температурного режима вечномерзлого грунта использовался численный метод – метод конечных разностей, который реализован компьютерной программой “Тепло”, разработанной на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ [Программа..., 1994].

Прогнозная задача ставится как одномерная. Размер расчетной области задается в 1,5 раза больше мощности многолетнемерзлых пород (ММП). Грунтовые условия принимаются осредненными для района моделирования, т. е. назначается так называемый разрез-представитель и в соответствии с ним делается разбивка расчетной области на блоки, при этом границы блоков должны совпадать с границами грунтовых слоев. Блокам присваиваются численные значения теплофизических свойств грунта, соответствующие тому слою, кото-

Таблица 2. Прогноз изменения климатических и геокриологических условий при потеплении климата в районе г. Мирный, Республика Саха (Якутия)

Годы	Температура воздуха, °С	Температура грунта, °С	Сезонное оттаивание, м	Сезонное промерзание, м	Мощность мерзлого грунта, м
До 1970	-7,8	-3,40	1,80	1,80	302,0
2000–2010	-6,3	-1,99	1,95	1,95	301,9
2010–2020	-6,1	-1,78	1,98	1,98	301,8
2020–2030	-5,9	-1,58	2,11	2,11	301,8
2030–2040	-5,1	-0,99	2,15	2,09	301,7
2040–2050	-4,6	-0,56	2,33	2,07	301,7

рый блок моделирует. На нижней границе расчетной области становится граничное условие второго рода с постоянным во времени значением теплового потока, соответствующего тепловому потоку из недр Земли в географической точке расположения метеостанции, для которой осуществляется моделирование.

На верхней границе расчетной области ставится граничное условие третьего рода с переменными во времени температурой воздуха и коэффициентом теплообмена (обратная величина термическому сопротивлению). При этом изменения во времени условно разделяют на сезонные и многолетние. Для температуры воздуха сезонные изменения задаются в виде амплитуды сезонных колебаний температуры и фазы колебаний (они во все годы принимаются постоянными), многолетние – в виде среднегодовой температуры, вычисляемой заранее по прогнозной формуле (1) без случайной составляющей. Программа складывает эти два значения.

Это предполагает равномерное повышение (понижение) среднемесячной температуры воздуха зимой и летом в результате многолетних колебаний климата. Амплитуда и фаза сезонных колебаний температуры воздуха принимается средней за ближайшие 30 лет, предшествующих рубежному году. Для коэффициента теплообмена (в нем учитывается и снежный покров) задаются только сезонные изменения в виде среднемесячных значений коэффициента теплообмена, осредненные за тот же период.

Начальные условия. За начало моделирования принимается рубежный год. Для получения распределения температуры грунта на этот момент времени ставится специальная задача, которая отличается от описанной выше верхними граничными условиями. Последние учитывают только сезонные колебания температуры воздуха и коэффициента теплообмена. Они задаются в виде своих среднемесячных значений, осредненных за ближайшие 30 лет, предшествующих рубежному году. Начальным условием для этой вспомогательной задачи служит линейное распределение температуры, определяемое положением нижней грани-

цы ММП и температурой грунтов на глубине нулевых годовых теплооборотов, снимаемых с геокриологической карты. Вспомогательная задача решается до тех пор, пока температурное поле в грунте не будет соответствовать своим граничным условиям. Этот процесс может продолжаться довольно долго и зависит от того, насколько снятая с карты информация соответствует принятым граничным условиям. Результат решения вспомогательной задачи принимается в качестве начальных условий основной задачи.

Описанная математическая модель нами была реализована для 10 районов, расположенных в Республике Саха (6 районов) и Западной Сибири (4 района). В качестве примера в табл. 2 приведены результаты моделирования для г. Мирный.

Как следует из данных табл. 2, температура воздуха начиная с рубежного года повышается со средней интенсивностью 0,04 °С/год, температура грунта – с 0,036 °С/год, мощность мерзлых толщ остается практически без изменений, а сезонное оттаивание с 2030 г. трансформируется в многолетнее (глубина его становится больше глубины сезонного промерзания). Изменение температуры на глубине годовых теплооборотов и сезонного оттаивания грунтов приведет к снижению надежности оснований зданий, возводимых на вечномерзлых грунтах, и деформациям последних. Оценим эти изменения с позиции теории надежности.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ, ВОЗВОДИМЫХ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Вначале определим оптимальную по стоимости надежность оснований без учета климатических изменений, взяв за основу данные по рубежному году (эталонную надежность).

Аналитический метод расчета оптимальной надежности оснований зданий, возводимых по принципу I (только этот случай мы рассматриваем в настоящей статье) был разработан Г.П. Пустовойтом [Хрусталева, Пустовойт, 1988]. В его основе лежит минимизация суммарных затрат, состоящих из начальной стоимости здания (C_0) и затрат,

связанных с возможным выходом его из строя до окончания срока эксплуатации (C_R):

$$C_0 + C_R \rightarrow \min. \quad (2)$$

Величина C_R называется ценой риска и представляет собой стоимостной эквивалент надежности.

Решением оптимизационной задачи является следующая цепочка формул:

$$P_o(t_e) = \exp(-t_e m_0), \quad (3)$$

где $P_o(t_e)$ – оптимальная надежность, д. ед.; t_e – время эксплуатации, лет; m_0 – матожидание числа отказов основания за год, 1/год;

$$m_0 = \frac{\exp(-0,5\gamma_0^2)}{\gamma_0 \sqrt{2\pi}}, \quad (4)$$

где γ – характеристика безопасности, безразм.;

$$\gamma_0 = \sqrt{2 \ln \frac{t_e}{5 \mathcal{E} v_{Fu}} - 2 v_{Fu}}, \quad (5)$$

где \mathcal{E} – экономический параметр, для свайного фундамента вычисляемый по формуле (6), безразм.; v_{Fu} – коэффициент вариации несущей способности основания, вычисляемый по формуле (7), безразм.;

$$\mathcal{E} = C_{\mathcal{E}} \frac{G_{pile} l}{R_{af}(T_e) \Omega_{pile} (l - \xi_T)}, \quad (6)$$

где $C_{\mathcal{E}}$ – экономический коэффициент, равный $C_{\mathcal{E}} = C_{\Phi} / C_{зд}$ (C_{Φ} – частное от деления стоимости фундамента на его массу, р./кН; $C_{зд}$ – частное от деления стоимости надфундаментной конструкции здания на ее массу, р./кН); G_{pile} – масса сваи погонной длиной 1 м, кН; l – длина сваи считая от дневной поверхности, м; $R_{af}(T_e)$ – расчетное сопротивление мерзлых грунтов и грунтовых растворов сдвигу по поверхности смерзания (кПа), функция эквивалентной температуры, определяемая по указаниям СНиП 2.02.04-88; Ω_{pile} – периметр сваи, м; ξ_T – глубина сезонного оттаивания грунта, м;

$$v_{Fu} = \frac{0,9(A_0 / A_{air})^{1/3} \sigma D}{R}, \quad (7)$$

где A_0 – амплитуда колебаний температуры грунта, °С; A_{air} – амплитуда колебаний температуры воздуха, °С; σ – то же, что и в формуле (1), °С; D – коэффициент затухания температурной дисперсии с глубиной, безразм.; R – параметр, зависящий от расчетной температуры грунта, °С;

$$A_0 = -\frac{T'_0 + T_0}{2}, \quad (8)$$

где T'_0 – расчетная температура грунта под зданием, определяемая по указаниям СНиП 2.02.04-88 как функция T_{air} и T_0 , °С; T_{air} – температура наруж-

ного воздуха, °С; T_0 – температура грунта вне здания, °С.

Коэффициент затухания температурной дисперсии с глубиной для свайного фундамента определяется по формуле

$$D = \begin{cases} (0,78 + 0,74 \ln y) / y & \text{при } y > 1, \\ 1 - 0,22y & \text{при } y \leq 1, \end{cases} \quad (9)$$

где $y = 0,019z \sqrt{\frac{C_f}{\lambda_f}}$; z – длина сваи в вечномерзлом

грунте, м; $z = l - \xi_T$; l – длина сваи считая от дневной поверхности, м; ξ_T – глубина сезонного оттаивания грунта, м; C_f – теплоемкость мерзлого грунта, Вт·ч/(м³·°С); λ_f – теплопроводность мерзлого грунта, Вт/(м·°С).

(В статье рассматривается только свайный фундамент как наиболее распространенный при строительстве на вечномерзлых грунтах. Менее распространенный столбчатый фундамент был рассмотрен ранее в статье В.Д. Кауркина [2005]).

Параметр R зависит от эквивалентной температуры грунта T_e , которая определяется по указаниям СНиП 2.02.04-88 [1990]. Если сваи погружаются буроопускным способом с использованием известково-песчаного раствора, он вычисляется по эмпирической формуле

$$R = \begin{cases} 0,225 - T_e & \text{при } T_e \geq -1,5 \text{ °С}, \\ -2T_e + 0,372\sqrt{-T_e} & \text{при } -1,5 \text{ °С} > T_e \geq -4 \text{ °С}, \\ -2T_e + 0,348\sqrt{-T_e} & \text{при } T_e < -4 \text{ °С}. \end{cases} \quad (10)$$

Кроме оптимальной надежности весьма важным параметром является оптимальный коэффициент надежности, или коэффициент запаса $K_{H,o}$, который соответствует оптимальной надежности и определяется по формуле

$$K_{H,o} = \frac{1}{1 - \gamma_0 v_{Fu}}. \quad (11)$$

Параметры T_{air} , T_0 , A_{air} , ξ_T , входящие в вышеприведенные формулы, усредняются за многолетний период, предшествующий рубежному году.

Коэффициент надежности позволяет связать воедино два подхода – детерминированный, который положен в основу нормативных документов, и разработанный нами вероятностно-статистический. Этот коэффициент зависит от многих параметров – климатических, геологических, конструктивных и экономических, поэтому он не может назначаться директивно, а должен вычисляться дифференцированно для каждого района.

В табл. 3 приведены рассчитанные с использованием формул (3)–(11) значения оптимальной надежности оснований жилых зданий и соответствующие оптимальной надежности коэффициен-

Таблица 3. Результаты вычисления оптимальной надежности и оптимального коэффициента надежности

Район	$T_{air}, ^\circ\text{C}$	$\sigma, ^\circ\text{C}$	$A_{air}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\xi_f, \text{м}$	$\frac{C_f}{\lambda_f}, \frac{\text{ч}}{\text{м}^2}$	$l = 6 \text{ м}$		$l = 8 \text{ м}$		$l = 12 \text{ м}$	
							$P_o(t_e)$	$K_{H,o}$	$P_o(t_e)$	$K_{H,o}$	$P_o(t_e)$	$K_{H,o}$
<i>Якутия</i>												
Чекурдах	-13,9	1,30	24,3	-11,1	0,74	265,0	0,993	1,204	0,996	1,153	0,998	1,100
Тикси	-13,1	1,86	19,6	-10,7	0,45	226,3	0,986	1,350	0,991	1,260	0,995	1,167
Верхоянск	-15,6	1,18	31,2	-7,3	1,42	227,8	0,990	1,242	0,994	1,184	0,997	1,121
Усть-Мая	-10,0	0,90	25,3	-4,0	1,60	243,6	0,997	1,295	0,984	1,230	0,991	1,155
Мирный	-7,8	1,28	24,2	-3,4	1,80	188,5	0,940	1,520	0,965	1,400	0,984	1,263
<i>Западная Сибирь</i>												
О. Белый	-10,2	1,65	14,6	-8,6	0,20	265,4	0,985	1,354	0,991	1,262	0,996	1,169
Салехард	-6,5	1,46	19,0	-2,0	0,78	249,8	0,921	1,723	0,952	1,538	0,976	1,350
Надым	-6,6	1,40	19,9	-1,64	0,51	249,8	0,923	1,697	0,951	1,530	0,974	1,355
Полуй	-6,2	1,11	19,3	-0,56	0,58	367,7	0,747	2,500	0,849	2,103	0,924	1,711

Примечание. T_{air} – средняя многолетняя температура наружного воздуха за период, предшествующий рубежному году; σ – среднеквадратическое отклонение случайной величины (белый шум); A_{air} – амплитуда сезонных колебаний температуры воздуха; T_0 – температура грунта вне здания; ξ_f – глубина сезонного оттаивания; C_f – теплоемкость мерзлого грунта; λ_f – теплопроводность мерзлого грунта; l – длина сваи; $P_o(t_e)$, $K_{H,o}$ – оптимальная надежность и соответствующий ей оптимальный коэффициент надежности, вычисленные без учета многолетних климатических изменений.

ты надежности для 10 районов, где производилось моделирование температурного режима грунтов. При этом ширина здания принималась равной 12 м, период эксплуатации $t_e = 50$ лет, экономический коэффициент $C_{\mathcal{E}} = 49,53$, периметр сваи $\Omega_{pile} = 1$ м, масса сваи погонной длиной 1 м $G_{pile} = 1,226$ кН.

Из анализа данных табл. 3 следует, что оптимальная надежность увеличивается, а оптимальный коэффициент надежности уменьшается с понижением температуры воздуха и увеличением глубины закладки фундаментов. Эти изменения происходят в интервалах $P_o(t_e) = 0,747-0,998$, $K_{H,o} = 1,1-2,5$. Случайные колебания среднегодовой температуры воздуха (флуктуации) оказывают на оптимальные надежность и коэффициент надежности особенно сильное влияние, с их увеличением первая величина снижается, а вторая возрастает. Так, при практически одинаковой темпе-

ратуре наружного воздуха в районах Чекурдах ($\sigma = 1,30$) и Тикси ($\sigma = 1,86$) в первом случае оптимальная надежность выше, а оптимальный коэффициент надежности ниже, чем во втором.

Интересно проследить зависимости оптимальных надежности и коэффициента надежности от экономического коэффициента $C_{\mathcal{E}}$. Эти зависимости для г. Мирный при глубине погружения свай 6 м показаны на рис. 1. Из анализа рис. 1 следует, что большей стоимости здания (меньшему значению экономического коэффициента $C_{\mathcal{E}}$) должны соответствовать большие надежность основания и оптимальный коэффициент надежности (запаса). К сожалению, этот тривиальный вывод не находит отражения в действующих нормативных документах.

После определения оптимальных значений $P_o(t_e)$ и $K_{H,o}$ составим прогноз надежности основания жилого здания на свайном фундаменте на

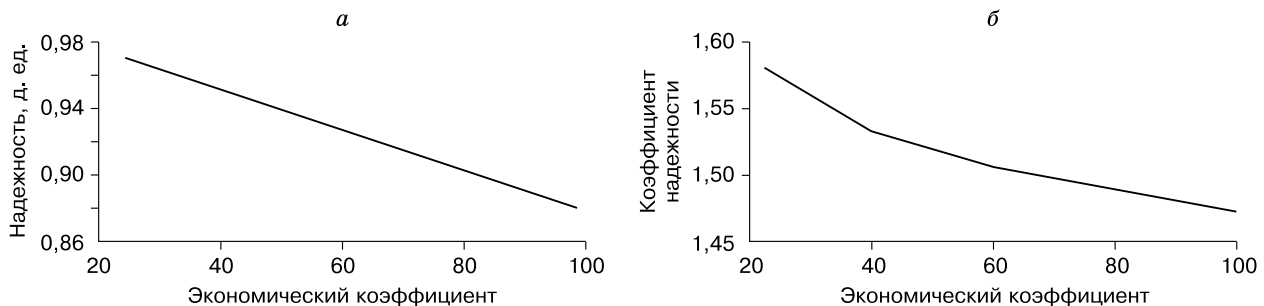


Рис. 1. Зависимости оптимальной надежности (а) и оптимального коэффициента надежности (б) от экономического коэффициента (г. Мирный).

Таблица 4. Прогноз надежности свайного основания (длина свай 6 м) для района Надым (Западная Сибирь)

Год	i , лет	$T_{air,i}$, °C	$T_{0,i}$, °C	$\xi_{T,i}$, м	m_i	K_i	$m_i \cdot K_i$	P_i	$P_{0,i}$
2001	1	-5,3	-0,47	0,61	0,00118000	0,90700	0,00106700	0,9988	0,9984
2011	11	-5,6	-0,63	0,58	0,00117587	0,33453	0,00017144	0,9878	0,9825
2021	21	-4,7	-0,24	0,75	0,00448803	0,11522	0,00051711	0,9789	0,9669
2031	31	-4,0	-0,13	1,40	0,01514312	0,03497	0,00052950	0,9260	0,9515
2041	41	-4,8	-0,08	1,40	0,01015293	0,00767	0,00007790	0,7998	0,9363
2050	50	-4,8	-0,08	1,40	0,01015293	0,0	0,0	0,7300	0,9230

Примечание. i – число лет от начала эксплуатации здания; $T_{air,i}$ – температура воздуха в i -м году; $T_{0,i}$ – температура грунта в i -м году; $\xi_{T,i}$ – глубина сезонного оттаивания грунта в i -м году; m_i – матожидание числа отказов основания в i -м году; K_i – экономический коэффициент, вычисляемый по формуле (17); P_i – надежность основания в i -м году, рассчитанная с учетом многолетних климатических изменений; $P_{0,i}$ – надежность основания в i -м году, вычисленная без учета многолетних климатических изменений.

ближайшие 50 лет, учитывая изменчивость параметров T_{air} , T_0 , ξ_T во времени. Надежность рассчитывалась по формулам [Пустовойт, 1997]:

$$P(t_e) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n m_i\right) \quad (12)$$

$$m_i = \frac{\exp(-0,5\gamma_i^2)}{\gamma_i\sqrt{2\pi}}, \quad (13)$$

$$\gamma_i = \frac{1-1/K_H}{v_{Fu,i}}, \quad (14)$$

где $P(t_e)$ – надежность основания, д. ед.; n – число лет за период эксплуатации; m_i – матожидание числа отказов основания в i -м году, 1/год; γ_i – характеристика безопасности в i -м году, безразм.; $v_{Fu,i}$ – коэффициент вариации несущей способности основания в i -м году (безразм.), вычисляемая по формулам (7)–(10), в которых параметры T_{air} , T_0 , ξ_T принимаются для каждого i -го года по данным математического моделирования (см. выше); K_H – коэффициент надежности (безразм.), определяемый подбором исходя из условия: цена риска, вычисленная с учетом климатических изменений, должна соответствовать цене риска, рассчитанной без их учета.

Цена риска определяется по формуле [Хрусталев, Пустовойт, 1988]:

– с учетом климатических изменений

$$C_R = C_0 \sum_{i=1}^n K_i m_i, \quad (15)$$

– без учета климатических изменений

$$C_R = C_0 m_0 \sum_{i=1}^n K_i, \quad (16)$$

$$K_i = \frac{1-i/n}{(1+E)^i}, \quad (17)$$

где E – коэффициент приведения разновременных затрат, равный 0,08; остальные обозначения даны выше.

Разделив (15) на (16), получим условие, из которого подбором находим K_H :

$$\sum_{i=1}^n K_i m_i / \left(m_0 \sum_{i=1}^n K_i\right) \approx 1. \quad (18)$$

Пример решения уравнения (18) приведен в табл. 4. Увеличивая значение K_H начиная с $K_{H,0} = 1,697$, добиваемся выполнения условия (18). Итерацию заканчиваем при $K_H = 2,62$, когда от-

ношение $\sum_{i=1}^n K_i m_i / \left(m_0 \sum_{i=1}^n K_i\right) = 1,00712$. Данные

табл. 4 позволяют построить функцию надежности $P(t)$ (рис. 2).

Из анализа рис. 2 следует, что при оптимальном значении коэффициента надежности $K_{H,0} = 1,697$, если многолетних изменений температуры воздуха не происходит (модельная задача), функция надежности со временем меняется мало,

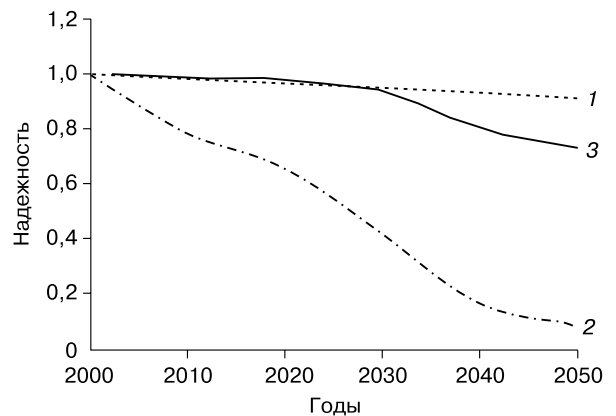


Рис. 2. Функция надежности основания здания на свайном фундаменте (длина свай 6 м) в г. Надым:

1 – функция надежности $P_0(t)$, вычисленная без учета многолетних климатических изменений; 2, 3 – функция надежности $P(t)$, рассчитанная с учетом многолетних климатических изменений (2 – для $K_{H,0}$, 3 – для K_H).

Таблица 5. Рекомендуемые значения надежности и коэффициента надежности для жилых зданий на период 2000–2050 гг.

Район	$T_0, ^\circ\text{C}$	$q, ^\circ\text{C}/\text{год}$	$l = 6 \text{ м}$		$l = 8 \text{ м}$		$l = 12 \text{ м}$	
			$P(t_e)$	K_H	$P(t_e)$	K_H	$P(t_e)$	K_H
<i>Якутия</i>								
Чекурдах	-11,1	0,010	0,992	1,214	0,996	1,160	0,998	1,104
Тикси	-10,7	0,020	0,984	1,411	0,990	1,301	0,995	1,190
Верхоянск	-7,3	0,033	0,986	1,263	0,991	1,198	0,996	1,129
Усть-Мая	-4,0	0,042	0,913	1,403	0,923	1,316	0,943	1,214
Мирный	-3,4	0,031	0,746	1,183	0,773	1,646	0,804	1,436
Туой-Хая	-2,8	0,032	0,949	1,549	0,958	1,451	0,966	1,319
<i>Западная Сибирь</i>								
О. Белый	-8,60	0,006	0,983	1,344	0,989	1,255	0,995	1,165
Салехард	-2,02	0,020	0,727	2,222	0,777	1,892	0,824	1,581
Надым	-1,64	0,017	0,730	2,620	0,790	2,210	0,849	1,823
Полуй	-0,56	0,013	0,630	3,960	0,767	2,990	0,878	2,210

Примечание. T_0 – температура грунта на глубине нулевых годовых теплооборотов, средняя за период, предшествующий рубежному году; q – линейный тренд среднегодовой температуры воздуха; l – глубина погружения свай; $P(t_e)$ – надежность основания; K_H – коэффициент надежности.

и надежность остается достаточно высокой (линия 1). В реальном же случае она интенсивно стремится к нулю (линия 2), достигая к концу эксплуатации значения 0,08. Это означает, что до окончания периода эксплуатации здание будет разрушено с вероятностью 92 %. При коэффициенте надежности $K_H = 2,62$ (линия 3) надежность на начальном этапе превосходит надежность модельной задачи, а затем снижается до 0,73. При этом материальный ущерб от снижения надежности остается таким же, как и в случае модельной задачи.

Аналогично были вычислены значения надежности и коэффициента надежности для всех 10 рассматриваемых районов (табл. 5).

Сопоставляя данные табл. 5 и 3 видим, что они подчиняются тем же закономерностям, однако численные значения надежности уменьшаются, а коэффициента надежности увеличиваются. Это объясняется многолетними изменениями температуры воздуха и, прежде всего, ее линейной составляющей g . С ростом g различия между $P(t_e)$, K_H и

$P_o(t_e)$, $K_{H,o}$ также возрастают. Большое значение имеет глубина погружения свай, особенно в районах, где температура грунта выше (4°C).

На рис. 3 показано изменение с понижением температуры грунта отношения коэффициента надежности при глубине погружения свай 8 и 12 м к коэффициенту надежности при глубине погружения свай 6 м. Видно, что с увеличением абсолютного значения температуры это отношение сначала возрастает, а затем становится неизменным для заданной глубины. Различие между этим отношением на разных глубинах с ростом абсолютного значения температуры также сокращается. Это говорит о том, что низкотемпературные вечномерзлые грунты более инерционны и менее подвержены климатическим изменениям.

ВЫВОДЫ

1. Многолетнее повышение температуры воздуха сильно сказывается на надежности оснований зданий, возводимых на вечномерзлых грунтах, и поэтому должно учитываться при проектировании.

2. Учет можно осуществить, увеличив площадь опорных конструкций фундаментов или, что то же самое, увеличив коэффициент надежности (коэффициент запаса) по отношению к его оптимальному значению, которое находится из решения оптимизационной задачи: сумма затрат на возведение здания (начальная стоимость) и потерь от возможного выхода его из строя до окончания эксплуатационного периода (цена риска) должна быть минимальной. К сожалению, в нормативной литературе эта очевидная задача не рассматрива-

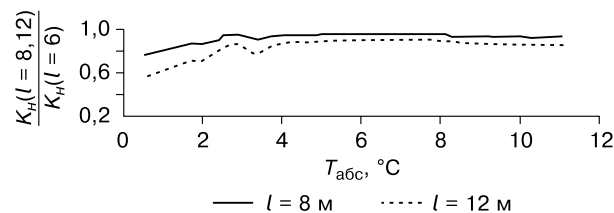


Рис. 3. Изменение с понижением температуры грунта ($T_{\text{абс}}$) отношения коэффициента надежности при глубине погружения свай $l = 8, 12 \text{ м}$ к коэффициенту надежности при $l = 6 \text{ м}$.

ется и коэффициент надежности назначается директивно, что является неправильным.

3. Разработанная нами методика определения надежности основания и коэффициента надежности позволяет избежать дополнительных потерь материальных средств в условиях многолетних климатических изменений и сделать их равными потерям при отсутствии многолетних климатических изменений, т. е. в условиях некоторой модельной задачи, которая положена в основу нормативных расчетов. При этом сам метод расчета не меняется, что чрезвычайно важно, а изменяется только коэффициент надежности. Предлагаемая методика состоит из трех последовательных задач, которые решаются с позиций теории гармонических колебаний, численного математического моделирования и теории надежности.

4. Реализация этой методики для 10 районов, расположенных в Якутии (6 районов) и Западной Сибири (4 района), показывает, что надежность оснований зданий, возводимых на вечномерзлых грунтах, и соответствующий ей коэффициент надежности зависят от многих климатических, геологических, геокриологических и техногенных параметров и в общем случае могут быть определены только для конкретного сооружения, расположенного в конкретных климатических, геологических и геокриологических условиях.

5. Результаты расчета по разработанной методике позволили для жилого здания на свайном фундаменте выявить следующие закономерности: надежность оснований обратно пропорциональна, а коэффициент надежности прямо пропорциона-

лен температуре грунта, линейному тренду и величине флуктуации среднегодовой температуры воздуха, стоимости здания; надежность прямо пропорциональна, а коэффициент надежности обратно пропорционален глубине погружения свай.

Литература

Кауркин В.Д. Изменение надежности инженерных сооружений на территории Республики Саха–Якутия в связи с глобальным потеплением климата // *Материалы Третьей конф. геокриологов России*. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, т. 4, ч. 8, с. 144–149.

Павлов А.В. Мерзлотно-климатические изменения на севере России: наблюдения, прогноз // *Изв. РАН. Сер. геогр.*, 2003, № 6, с. 39–50.

Павлов А.В., Ананьева Г.В., Дроздов Д.С. Мониторинг сезонноталого слоя и температуры мерзлого грунта на севере России // *Криосфера Земли*, 2002, т. VI, № 4, с. 30–39.

Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами: Свидетельство 940281. РосАПО / Хрусталева Л.Н., Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Яковлев С.В. 1994.

Пустовойт Г.П. Учет изменчивости климата при обеспечении надежности оснований сооружений в криолитозоне // *Криосфера Земли*, 1997, т. I, № 4, с. 50–53.

СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., Стройиздат, 1990, 53 с.

Хрусталева Л.Н., Пустовойт Г.П. Вероятностно-статистические расчеты оснований зданий в криолитозоне. Новосибирск, Наука. Сиб. отд-ние, 1988, 253 с.

Хрусталева Л.Н., Медведев А.В., Пустовойт Г.П. Многолетнее изменение температуры воздуха и устойчивость проектируемых в криолитозоне сооружений // *Криосфера Земли*, 2000, т. IV, № 3, с. 35–41.

*Поступила в редакцию
22 июня 2006 г.*