

ПРИЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ К ЗАДАЧАМ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОКРИОЛОГИИ

Л.Н. Хрусталеv

Московский государственный университет, геологический ф-т, 119899, Москва, Воробьевы горы, Россия

В статье излагаются основные положения теории надежности применительно к решению задач инженерной геокриологии. С их помощью прогнозируется качество принимаемых проектных решений; оценивается территория по стоимости ее освоения и степени техногенного риска; учитывается ущерб от глобального потепления климата в криолитозоне, а также производится планирование инженерных изысканий.

Надежность, качество, ущерб, риск, стоимость, прогноз

USE OF THE RELIABILITY THEORY IN SOLVING ENGINEERING GEOLOGICAL PROBLEMS

L.N. Khroustalev

Moscow State University, Department Geology, 119899, Moscow, Vorobjovy Gory, Russia

This article discusses the basic concepts of reliability theory from the standpoint of their applicability for solving problems of geocryological engineering: estimating the quality of geotechnical projects, scheduling steps on management of quality, evaluating individual areas in terms of the cost of their economic development and the technogenic risk involved, predicting potential damage from probable Global Climate Warming, and planning geological engineering surveys in the permafrost zone.

Reliability, quality, damage, risk, cost, forecast

ВВЕДЕНИЕ

Современный высокий уровень развития отечественной геокриологии достигнут благодаря работам нескольких поколений мерзлотоведов. Их трудами были созданы способы обеспечения устойчивости инженерных сооружений на вечномёрзлых грунтах, которые хорошо зарекомендовали себя на практике. Однако сегодня практика ставит новую задачу — не только обеспечить устойчивость сооружений, но обеспечить её с минимальными трудовыми и материальными затратами. Эта задача перерастает в сложную научную проблему, которая не может быть решена с позиций существующего детерминистического подхода, в силу присущих ему двух существенных недостатков: во-первых, этот подход не учитывает вероятностный характер перерабатываемой информации и получаемых результатов, что приводит к занижению или завышению требований, предъявляемых к сооружениям и, как следствие, к материальным потерям; во-вторых, метод количественно не оценивает надежность работы сооружения, поэтому экономическое сравнение вариантов проектных решений теряет смысл, ибо варианты, отличающиеся по продолжительности безотказной

(надёжной) работы не могут быть сопоставимы по стоимости. Решение названной задачи может быть получено только с позиций вероятностного подхода, а именно с позиций теории надёжности. Теория надёжности конструкций в России начала интенсивно разрабатываться с середины 50-х годов, что было стимулировано развитием авиации, затем она стала применяться в судостроении и в высотном строительстве, а в последние 15-20 лет и в фундаментостроении. Однако в последнем случае предпринимаются пока только робкие попытки заменить устоявшиеся детерминистические подходы, нашедшие отражение в многочисленной нормативной литературе, вероятностными подходами. На наш взгляд, такая замена неизбежна, ибо она стимулируется потребностями сегодняшнего дня. Что же такое вероятностный подход ?

НАДЕЖНОСТЬ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Вероятностный подход к расчёту геотехнических систем, под которыми понимается геологическая среда и взаимодействующее с ней сооружение, состоит в следующем. Тепловое и

механическое взаимодействие сооружения с геологической средой трактуется как развивающийся во времени многомерный случайный процесс. Число измерений процесса определяется числом его выходных параметров, например, в простейшем случае ими являются несущая способность основания и совместная деформация основания и сооружения. Если выходные параметры процесса не пересекают своих предельных значений, например, значения нагрузки, передаваемой на основание, и предельно допустимой деформации, то считается, что качество системы сохраняется, в противном случае оно утрачивается, происходит отказ системы. Вероятность сохранения качества в течение периода эксплуатации называется надёжностью системы, а вся последовательность этой вероятности во времени — функцией надёжности.

Ниже приведены аналитические выражения функций надёжности трёх наиболее распространённых геотехнических систем: здание—основание (1), трубопровод—грунт (2), дорога—основание (3).

$$P(t) = P \begin{bmatrix} F_u(\tau) > F(\tau) \\ R(\tau) > F_f(\tau) \\ S(\tau) < S_u \\ 0 < \tau < t \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где F_u, F — несущая способность основания и нагрузка на основание; R, F_f — обобщенная сила предельного равновесия и обобщенная сдвигающая сила; S, S_{lim} — совместная деформация основания и здания и их предельное значение.

$$P(t) = P \begin{bmatrix} \sigma_n(\tau) < \sigma_{lim} \\ F_{gr}(\tau) < F_{lim} \\ 0 < \tau < t \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где σ_n, σ_{lim} — продольное напряжение в трубопроводе и предельное сопротивление металла; F_{gr}, F_{lim} — продольное усилие сжатия трубопровода и предельное сопротивление трубопровода в продольном направлении.

$$P(t) = P \begin{bmatrix} F_{ur}(\tau) > F_r(\tau) \\ S_r(\tau) < S_{ur} \\ 0 < \tau < t \end{bmatrix},$$

где F_{ur}, F_r — несущая способность основания дорожного покрытия и нагрузка, передаваемая на дорожное покрытие; S_r, S_{ur} — совместная деформация основания и дорожного покрытия и их предельное значение.

Вычисление функции надёжности далеко не тривиальная задача. Возможны два пути её решения — аналитический и численный. Аналитический предпочтительнее, однако его возможности ограничены в связи со сложностью оператора преобразования входных параметров в выходные и наличием многочисленных взаимосвя-

занных случайных величин и случайных функций. Сегодня, по нашему мнению, аналитические решения могут быть получены только для одномерного случайного процесса при ряде априорных допущений. Поскольку мы всегда имеем дело с многомерным процессом, то заменить его одномерным можно лишь в отдельных частных случаях. Например, при строительстве зданий по принципу I на твёрдомёрзлых грунтах пренебречь осадкой основания и опасностью выпучивания фундаментов. В этом случае надёжность системы будет определяться соотношением между несущей способностью основания и передаваемой на него нагрузкой. В 1987 г. Г.П. Пустовойт, исследуя этот одномерный процесс численным методом, пришел к выводу, что к нему применима пуассоновская модель отказов, что позволило ему получить аналитическое решение [Хрусталева и др., 1988]. Значение этого решения чрезвычайно высоко, ибо оно позволяет перебросить мост между детерминистическим и вероятностным подходами.

Однако аналитические решения — пока редкий случай; основным методом получения решения остается численный или метод статистических испытаний, который ещё называют методом Монте-Карло. Для его реализации требуется построить детерминистическое описание преобразования входных параметров в выходные и многократно выполнить это преобразование, то есть произвести испытание. По результатам испытаний вычисляется функция надёжности:

$$P(t) = P_m(t) = 1 - n(t)/m, \quad (4)$$

$P_m(t)$ — статистическая оценка функции надёжности; $n(t)$ — количество отказов за время t ; m — число испытаний.

Все расчёты ведутся на ЭВМ. Сегодня нами разработана программа НАСТ, реализующая метод Монте-Карло для трёх геотехнических систем: здание—основание, нефтепровод—грунт, взлётно-посадочная полоса—основание.

Выше мы говорили, что точность аналитического метода была оценена с помощью численного метода. А как оценить точность численного метода? Для этого надо вычислить интегральную характеристику функции надёжности—долговечность (5) и (6) и сопоставить её с фактической долговечностью реального объекта.

$$t_{lon} = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (5)$$

$$\sigma_{lon} = \sqrt{2 \int_0^{\infty} t P(t) dt - t_{lon}^2}, \quad (6)$$

где t_{lon}, σ_{lon} — математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение долговечности геотехнической системы.

Результаты сравнения приведены в табл. 1, откуда следует, что расхождение между

Таблица 1. Фактическая и расчетная долговечность некоторых зданий в г. Воркута

Тип здания	Принцип строительства	Фактическая долг. лет		Расчет долг. лет	
		До появл. деформац.	До разрушения	$t_{\text{юп}}$	$\sigma_{\text{юп}}$
3-этажное шлакоблочное здание	II	1,0	3,0	0,7	0,9
3-этажное кирпичное здание	II	4,0	—	10,0	4,3
3-этажное кирпичное здание	II	11,0	—	10,0	4,3
1-этажное кирпичное здание	I	3,0	7,0	7,3	3,2
2-этажное шлакоблочное здание	II	4,0	—	3,3	2,0
1-этажное кирпичное здание	II	1,5	6,0	3,0	1,9
2-этажное кирпичное здание	I	5,0	—	3,8	2,2
2-этажное кирпичное здание	II	3,0	7,0	2,9	1,9
3-этажное кирпичное здание	II	7,0	—	6,7	3,1
5-этажное крупнопанельное здание	II	4,0	—	6,3	5,6

фактической и теоретической долговечностью не превышает одно-сигмового интервала.

Это свидетельствует о высокой точности разработанного метода.

Остановимся ещё на одном чрезвычайно важном вопросе — управление надёжностью. Функция надёжности определяется природно-климатическими и техногенными факторами. Конструктивные элементы, входящие в группу техногенных факторов, особенно сильно влияют на значение функции, и в отличие от остальных исходных данных на них можно направленно воздействовать, изменяя тем самым функцию надёжности. Назовём эти параметры управляющими. Например, управляющими параметрами являются: глубина заложения фундамента, толщина стенки трубопровода, мощность рабочего слоя дорожной насыпи и т.п. Определённым сочетанием управляющих параметров можно обеспечить любую наперёд заданную надёжность. В связи с этим возникает вопрос: а какой она должна быть?

ОПТИМИЗАЦИЯ НАДЕЖНОСТИ ПО СТОИМОСТИ

Как известно, все созданные человеком системы имеют надёжность меньше единицы. В результате этого неизбежны отказы систем и появление материального ущерба. Чем выше надёжность, тем меньше ущерб. С другой стороны, высокая надёжность требует больших материальных затрат на создание системы. Очевидно, надо найти компромиссное решение (оптимальное). Оно соответствует минимуму суммарных приведённых затрат C , состоящих из затрат на создание системы (начальной стоимости) C_0 и затрат, связанных с возможным выходом её из строя (цены риска) C_r , которые определяются функцией надёжности.

$$C = C_0 + C_r \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$C_r = \int_0^{\infty} (dP(t)/dt) \cdot C_p(t) \cdot dt, \quad (8)$$

где $C_p(t)$ — штрафная функция.

Оптимизация осуществляется варьированием управляющих параметров.

По последствиям отказов системы подразделяются на системы, отказ которых приводит лишь к материальным потерям (системы с материальной ответственностью), и системы, отказ которых сопровождается экологическими последствиями, гибелью людей, потерей престижа и пр. (системы с моральной ответственностью). В последнем случае на надёжность системы накладывается дополнительное условие — она должна быть не ниже нормативной P_{st} .

$$C = [C_0 + C_r]_{P > P_{st}} \rightarrow \min. \quad (9)$$

Однако что такое нормативная надёжность никто не знает и здесь широкое поле для волевых решений. Поэтому в последние годы, особенно за рубежом, предпринимаются попытки перевести часть систем с моральной ответственностью в системы с материальной ответственностью. Но это специальный вопрос.

Итак, решение уравнений (7) и (9) позволяет ответить на вопрос — какой должна быть надёжность системы. Расчёты показывают, что она зависит от многих факторов, главными из которых являются стоимость сооружения и мерзлотно-геологические условия территории строительства. Особо отметим, что оптимальная надёжность зависит от стоимости возводимого объекта: чем выше стоимость, тем выше должна быть надёжность, что известным детерминистическим подходом игнорируется. В этом одно из главных отличий одного подхода от другого. Проиллюстрируем возможности вероятностного подхода на конкретных примерах.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

Пример 1. Требуется выбрать оптимальное проектное решение для взлётно-посадочной полосы, проектируемой на вечномёрзлых грунтах в районе Якутска.

Сначала рассмотрим идеальный случай (рис. 1), когда в пределах всей полосы рельеф

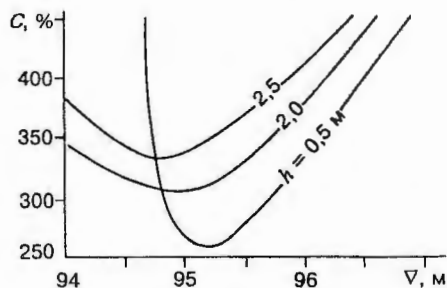


Рис. 1. Зависимость суммарной приведенной стоимости однородного участка взлетно-посадочной полосы C (в % от стоимости покрытия) от высотной отметки ее поверхности V и толщины теплоизолирующего слоя h .

абсолютно плоский, а мерзлотно-грунтовые условия однородны. В этом случае целесообразно принять в качестве управляющих параметров высотную отметку поверхности полосы (красную отметку) и толщину теплоизолирующей насыпи (верхняя часть насыпи, возводимая из крупно-скелетного материала). Эти два параметра определяют объем вертикальной планировки, а, следовательно, и её стоимость, которая со стоимостью покрытия определит начальную стоимость полосы. Определяя цену риска, предположим, что при отказе основания (осадка или пучение превосходит предельно допустимое значение для выбранного типа покрытия) покрытие полосы приходит в негодность и подлежит замене. В каждом статистическом испытании определяется число замен, если за время испытания отказов не было, то это число равно нулю. Общая сумма замен во всех испытаниях, деленная на число испытаний, даёт среднее число замен покрытия. Умножив это число на стоимость покрытия получим цену риска, суммируя её с начальной стоимостью — суммарную приведенную стои-

мость системы. Каждой паре значений управляющих параметров будет соответствовать своя суммарная стоимость. Варьируя управляющими параметрами, находим минимум суммарной стоимости — это и есть оптимальное решение.

Рассмотрим теперь реальный случай, сведя его к сумме идеальных. Для этого, используя метод перекрёстного районирования, разобьем полосу длиной L на сумму участков с относительно плоским рельефом и однородными мерзлотно-грунтовыми условиями (рис. 2). Затем создадим профиль полосы так, чтобы он максимально возможно повторял рельеф при условии, что уклоны не превышают допустимых. Будем перемещать профиль вверх-вниз, добиваясь минимума суммы стоимостей всех участков. Варьируя красной отметкой начала полосы (красные отметки участков определяются профилем) и толщиной теплоизолирующей насыпи на каждом участке, находим оптимальное решение (рис. 3).

ОЦЕНКА ТЕРРИТОРИИ ПО СТОИМОСТИ ЕЕ ОСВОЕНИЯ

Пример 2. Территория, расположенная в районе Воркуты, застраивается типовыми пятиэтажными жилыми зданиями. Требуется выбрать вариант планировки, установить принцип использования вечномёрзлых грунтов в качестве основания и способ фундаментостроения. Для решения этой задачи предварительно надо построить стоимостную инженерно-геологическую карту. Наши исследования показывают, что главными мерзлотно-грунтовыми условиями, определяющими пространственную изменчивость суммарной приведённой стоимости системы здание—основание являются: глубина залегания кровли монолитных скальных грунтов, разрез рыхлых отложений, глубина залегания кровли вечномёрзлых грунтов и их температура. Это даёт основание принять перечисленные условия в качестве классификационных признаков расчленения застраиваемой территории на участки с постоянной стоимостью освоения.

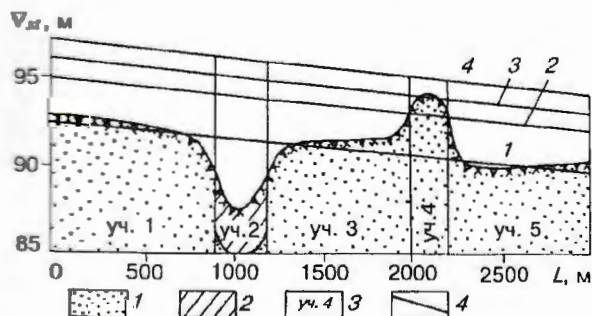


Рис. 2. Геологический разрез взлетно-посадочной полосы с выделением однородных участков и 4-х вариантов профиля.

1 — мелкий песок, 2 — суглинок, 3 — номер участка, 4 — вариант профиля; V_{st} — высотная отметка начала полосы.

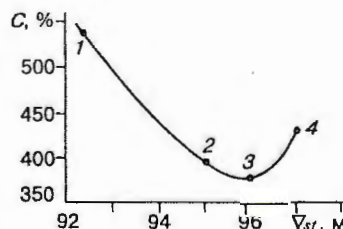


Рис. 3. Зависимость суммарной приведенной стоимости взлетно-посадочной полосы C (в % от стоимости покрытия) от высотной отметки начала полосы V_{st} .

Цифрой указан номер варианта профиля.

Таблица 2. Характеристика геологических участков, показанных на стоимостной инженерно-геологической карте

№ участка	Тип грунтовой толщи	H, м	T ₀ , град	Принцип I			Принцип II		
				C, %	P, д. ед	H _f , м	C, %	P, д. ед.	H _{th} , м
1	A	0—2	-1,5	22	0,998	0,0	45	0,72	12,0
2	A	2—6	-0,2	26	0,998	5,0	44	0,71	12,0
3	A	6—8	-0,2	27	0,998	7,0	44	0,71	12,0
4	A	8—12	-0,2	30	0,998	10,0	43	0,68	0,0
5	A	12—18	-0,2	34	0,998	15,0	23	0,75	0,0
6	A	18—22	-0,2	38	0,998	20,0	19	0,85	0,0
7	B	0—2	-1,5	23	0,990	0,0	55	0,70	13,0

Примечание. C — минимальная суммарная стоимость нулевого цикла здания (стоимость фундаментов, охлаждающих устройств, подготовки оснований и цена риска) в % от стоимости надфундаментной конструкции; P — надежность системы здание—основание в долях единицы (д. ед.); H_f, H_{th} — глубина предпостроечного промораживания и протаивания грунтов в метрах.

Для построения стоимостной карты необходимо, пользуясь этими классификационными признаками, расчленив территорию на участки, по программе НАСТ для каждого участка определить минимальные суммарные стоимости системы здание—основание, возводимой по первому и второму принципу, которую затем отобразить в границах участка. Здесь же следует отразить соответствующие этим стоимостям надёжности оснований, глубины заложения фундаментов и глубины предпостроечного промораживания—оттаивания грунтов (табл. 2). Пример такой карты для нашего случая показан на рис. 4. Накладывая на данную карту поочередно варианты планировочных решений, оцениваем стоимость

каждого первичного элемента застройки (группа зданий, возводимая по одному принципу), устанавливаем для него принцип строительства, глубину заложения фундаментов и глубину предпостроечной подготовки грунтов. Далее, суммируя стоимости первичных элементов в пределах каждого варианта планировки, находим вариант с минимальной стоимостью.

Аналогичные карты могут быть составлены для трубопроводного и дорожного строительства и с их помощью осуществлен выбор оптимальной трассы и способа возведения указанных линейных сооружений.

УЧЕТ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА В ПРОЕКТИРОВАНИИ

Пример 3. Рассмотрим приложение теории надёжности к решению спорного вопроса надо ли учитывать возможное глобальное потепление климата в проектировании.

Очевидно, что учёт глобального потепления приведёт к удорожанию строительства. Однако сегодня никто не будет вкладывать в строительство дополнительные средства, не будучи уверенным в пользе этих вложений завтра. Поэтому говорить об учёте потепления можно будет только после того, когда каждому сценарию потепления будет соотнесена вероятность его реализации. Только тогда этот спорный вопрос можно будет из области схоластических рассуждений перенести в область технико-экономических расчётов.

Допустим, что нам известна вероятность реализации сценария, тогда положительный ответ на вышеставленный вопрос может быть дан в случае, если удорожание начальной стоимости геотехнической системы за счёт учёта потепления, будет меньше ущерба от потепления умноженной на вероятность реализации сценария потепления (10).

$$C_{0i} - C_{00} < V_i \cdot C_{di}, \quad (10)$$

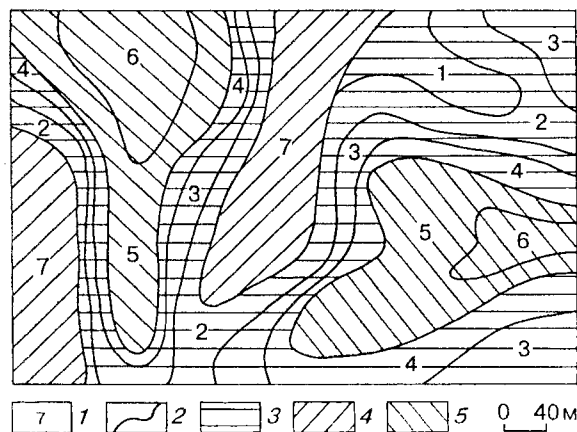


Рис. 4. Стоимостная инженерно-геологическая карта.

1 — номер геологического участка, 2 — границы участков; 3 — участки, где строительство по принципу I дешевле, чем по II, тип грунтовой толщи A; 4 — то же, тип грунтовой толщи B; 5 — участки, где строительство по принципу II дешевле, чем по I, тип грунтовой толщи A. Тип грунтовой толщи: A — покрывной суглинок (0,5—1,0 м), моренный суглинок (6—7 м), флювиогляциальные мелкие пески (свыше 10 м). B — покрывной суглинок (0,5—1,0 м), флювиогляциальные мелкие пески (свыше 10 м).

$$C_{ai} = [C_{ri} - C_{r0}]_{\theta_0}, \quad (11)$$

где C_{0i} — начальная стоимость геотехнической системы, запроектированной с учетом i -го сценария потепления; C_{00} — то же без учета потепления; C_{ai} — ущерб от i -го потепления, если оно не будет учтено при проектировании; C_{ri} — цена риска в случае i -го сценария потепления; C_{r0} — то же без учета потепления; θ_0 — оптимальная совокупность управляющих параметров без учета потепления.

Покажем, как вычислить члены уравнения (10). Как отмечалось выше, для получения оптимального решения варьированием управляющих параметров следует добиться минимума суммарной приведенной стоимости. Варьирование осуществляется для случая, когда потепления нет (случай M_0) и для случая, когда оно есть (случай M_1). После этого величина ущерба от неучёта потепления определится, как разность в ценах риска в случаях M_0 и M_1 при значениях управляющих параметров, соответствующих случаю M_0 (11). А левая часть уравнения (10) будет равна разности начальных стоимостей в оптимальных точках M_1 и M_0 . Поясним это на конкретном примере. На рис. 5 показаны графики зависимости начальной стоимости и цены риска от глубины предпостроечного оттаивания вечномёрзлого грунта под зданием, возводимом по принципу II в районе Воркуты. Рассматриваются два случая, когда градиент среднегодовой температуры воздуха равен 0 (потепления нет) и когда он равен 0,075 град/год, что соответствует среднему из известных сценариев глобального потепления. Из рис. 5 следует, что в результате потепления оптимальная точка смещается вправо по оси глубин и суммарная приведенная стоимость возрастает в 1,4 раза, при этом разность в начальной стоимости системы в точке M_1 и M_0 составляет 46% (от стоимости надфундаментной конструкции), а разность в ценах риска в точке M_0 — 60%. Согласно условию (10) данный сценарий потепления следует учитывать при проектировании в том случае, если вероятность его реализации будет больше 0,76. С увеличением стоимости надфундаментной конструкции эта „пороговая“ вероятность снижается и для дорогостоящих сооружений следует учитывать даже самые маловероятные сценарии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведёнными примерами далеко не исчерпываются все возможности вероятностного подхода к проектированию геотехнических систем. Он открывает широкие перспективы в будущем, которые сегодня даже трудно оценить. Назовём некоторые из них.

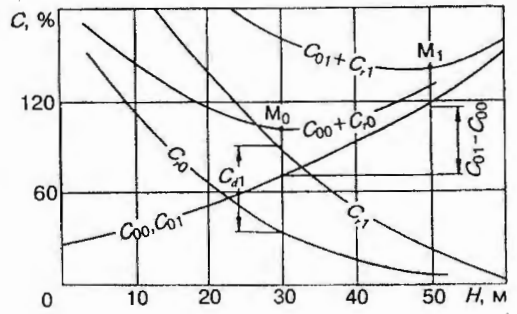


Рис. 5. График для вычисления параметров уравнения (10).

Это, прежде всего, резервирование работы системы. С точки зрения детерминистического подхода резервирование — это всегда только увеличение затрат; с точки зрения вероятностного подхода — один из возможных путей их снижения. Резервирование, как известно, дает возможность создавать высоконадёжные системы из малонадёжных элементов, т.е. снижать цену риска.

Вторым направлением является регулирование в процессе эксплуатации теплового и механического взаимодействия сооружения с грунтом. С помощью регулирования можно восстанавливать вырабатываемую надёжность системы и продлевать срок её службы. Это станет особенно важным, если начнется потепление климата. Однако регулирование осуществляется только на управляемых системах, целесообразность создания которых может быть установлена лишь с позиций вероятностного подхода.

Используя вероятностный подход, можно получить ответы на многие вопросы и в области инженерных изысканий. В частности, как зависит необходимое количество стадий изысканий (шаг адаптации) от изменчивости геокриологических условий в районе строительства и стоимости проектируемого комплекса сооружений, какой оптимальный объём изысканий должен соответствовать каждой стадии и, наконец, какое место дорогостоящих методов опробования в общем составе опробования грунтов.

Нет сомнений, что перечисленные задачи могут быть решены с позиций предлагаемого подхода, что дает основание считать его эффективным средством ускорения технического прогресса в строительстве на вечномёрзлых грунтах.

Литература

Хрусталева Л.Н., Пустовойт Г.П. Вероятностно-статистические расчеты оснований зданий в криолитозоне. Новосибирск, Наука, 1988, 252 с.

Поступила в редакцию
4 июня 1997 г.