

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ НАСЫПИ,
ПРОЕКТИРУЕМОЙ В ЗОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ
ПО ВТОРОМУ ПРИНЦИПУ**

Канд. техн. наук **Т.В. Гавриленко**,
магистр **О.А. Иванова**
(Сибирский федеральный университет)
Конт. информация: OAivanova@sfu-kras.ru
tv gavrilenko@sfu-kras.ru

Предложена методика оценки параметрической надежности земляного полотна при учете случайной природы входного фактора (относительной влажности) и определении методом статистической линеаризации вероятностных характеристик выходного параметра (осадки земляного полотна). Сформулированы критерии отказа насыпи, запроектированной по второму принципу в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Применение методики проиллюстрировано на конкретном примере. При учете вариативности даже одного фактора, рассматриваемого как случайная величина, в приведенном примере получено очень низкое значение вероятности безотказной работы, хотя с позиций нормативной методики в детерминистической постановке критерий устойчивости насыпи выполняется. Предложены значения нормированной вероятности безотказной работы земляного полотна.

Ключевые слова: *основание насыпи, устойчивость откосов, второй принцип проектирования, многолетнемерзлые грунты, критерии отказа, вероятность безотказной работы.*

Одним из основных этапов проектирования автомобильной дороги и ее элементов является анализ надежности и безопасности объектов. Понятие надежности автомобильной дороги неоднократно формулировалось. Так, например, соответствующие определения даны в [1] и [2, п. 6.32]. Введение новых нормативных документов, касающихся области надежности технических объектов, требует внесения коррективов в сформулированные ранее определения. Согласно действующему ГОСТ Р 27.002-2015, под надежностью технического объекта понимают его способность выполнять требуемую функцию в заданных режимах и условиях применения [3]. Тогда надежность автомобильной дороги может быть сформулирована как комплексное свойство, заключающееся в

ее способности обеспечивать безаварийное движение автомобильного транспорта с расчетной скоростью и интенсивностью движения в течение заданного межремонтного периода при соблюдении соответствующих эксплуатационных правил.

Базовым понятием теории надежности любого технического объекта является отказ, под которым понимается событие, заключающееся в нарушении его работоспособного состояния, т.е. состояния, в котором технический объект способен выполнять требуемые функции. Отказ автомобильной дороги – это невозможность обеспечить безопасное движение автомобильного транспорта с заданной расчетной скоростью.

При рассмотрении автомобильной дороги в виде сложной системы ее отказ является следствием отказов отдельных элементов системы, таких как земляное полотно, дорожные одежды, искусственные сооружения, геометрические элементы дороги и другие. Среди этих элементов наиболее подробно исследована надежность дорожных одежд [1]. В данной статье исследуется надежность дороги, связанная с устойчивостью земляного полотна (насыпи), возводимого в районе распространения многолетнемерзлых грунтов.

Надежность земляного полотна может быть определена по так называемой методике «параметрической теории надежности», применяемой к сооружениям, конструкциям и основаниям [4-6]. Она базируется на объединении традиционной методологии предельных состояний с методами теории вероятностей. В самой общей постановке условие непревышения предельного состояния любого строительного объекта (условие прочности, устойчивости и т.п.) записывают неравенством:

$$\Psi (\gamma_f, \gamma_m, \gamma_n, \gamma_c, F_n, R_n) \geq 0 , \quad (1)$$

где

функция ψ , зависящая от параметров:

γ_f – нормативного коэффициента надежности по нагрузке;

γ_m – нормативного коэффициента надежности по материалу;

γ_n – коэффициента ответственности сооружения;

γ_c – коэффициента условий работы;

F_n – нормативного значения обобщенного силового воздействия;

R_n – нормативного значения сопротивления материала.

Если вероятностный аппарат ограничивается областью случайных величин и их функций, без учета фактора времени в явном виде, то тогда модели отказов являются идентичными условиями наступления предельных состояний строительного объекта, только при вероятностной трактовке исходных параметров. Отказом считается событие, заключающееся в невыполнении условия (1).

Для системы «*сооружение – основание*» критерий надежности по предельным состояниям был сформулирован в [7]. Критерий можно записать в виде:

$$\Psi = Y_1 - Y_2 \geq 0, \quad (2)$$

где

Y_1 – «внутренний» фактор системы «*сооружение – основание*», характеризующий ее несущую способность или предельно допустимую деформацию;

Y_2 – «внешний» фактор условий работы системы, характеризующий фактически действующие нагрузки при их наиболее невыгодном сочетании и обуславливающий наиболее тяжелые условия работы системы в отношении возможности потери несущей способности грунтовым основанием или появления наибольших деформаций.

Рассмотрим задачу об оценке параметрической надежности насыпи, запроектированной по второму принципу. Известно, что в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов применяют три принципа проектирования земляного полотна [8]. Первый принцип предусматривает сохранение основания насыпи в мерзлом состоянии в течение всего периода эксплуатации дороги. Второй допускает частичное оттаивание грунта под подошвой насыпи. А при использовании третьего принципа предусматривается возведение насыпи после предварительного оттаивания многолетнемерзлых грунтов и их осушения в пределах дорожной полосы.

Общую устойчивость насыпи, запроектированной по второму принципу, оценивают по трем критериям [8]. Первый критерий накладывает ограничение на разность величин осадки основания насыпи по двум створам. Отказом сооружения считается событие, при котором нарушается условие:

$$|\Delta S_{\text{осн}}| < h_{\text{доп}} , \quad (3)$$

где

$\Delta S_{\text{осн}}$ – разность осадок основания насыпи в вертикальных сечениях, проведенных по бровке земляного полотна и в средней части откоса;

$h_{\text{доп}}$ – предельно допустимое значение разности осадок.

Второй критерий позволяет оценивать величину суммарной конечной осадки сооружения и выражается неравенством:

$$S < S_{\text{доп}} , \quad (4)$$

где

S – суммарная осадка основания и нестабильных слоев насыпи;

$S_{\text{доп}}$ – допускаемая величина осадки, значения которой приведены в [8, табл. 9]. Отказ – событие, при котором условие (4) не выполняется.

Обычно в насыпи, запроектированной в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, выделяют верхнюю и нижнюю части [8]. Верхняя часть насыпи включает в себя дорожную одежду и слой грунта, обеспечивающий необходимую прочность и стабильность конструкции дорожной одежды. При этом ее толщина h_0 должна составлять не менее 1,5 м. Верхняя часть насыпи является стабильным слоем, осадка которого не учитывается, потому что ее устраивают из непучинистых и слабопучинистых грунтов допустимой влажности с уплотнением в процессе строительства до требуемого значения коэффициента плотности. Нижняя часть насыпи, в зависимости от степени переувлажнения оттаявшего и талого глинистого грунта, может иметь две зоны: неконсолидируемую и консолидируемую. Суммарную осадку такой насыпи и основания определяют по формуле:

$$S = S_{\text{осн}} + S_{\text{н}} + S_{\text{к}} , \quad (5)$$

где

$S_{\text{осн}}$ – осадка основания насыпи, см;

$S_{\text{н}}$ – осадка нестабильных слоев из переувлажненного глинистого грунта неконсолидируемой зоны насыпи, см;

$S_{\text{к}}$ – осадка глинистого грунта консолидируемой зоны нестабильного слоя насыпи, см [8].

Если рассмотреть упрощенную постановку задачи для невысокой насыпи, в которой отсутствует как консолидируемая, так и неконсолидируемая часть, то осадка земляного полотна будет определяться только деформациями основания и выражение (5) примет вид:

$$S = S_{\text{осн}} . \quad (6)$$

Третий критерий устойчивости земляного полотна заключается в оценке формы ореола оттаивания. Необходимо, чтобы она была выпуклой вверх, и граница между мерзлой и талой зонами имела бы пологое очертание [8]. Отказом будет считаться вогнутая (выпуклостью вниз) форма ореола оттаивания. Математическая формулировка этого критерия отказа приведена в [9].

Отказ сооружения в результате нарушения его общей устойчивости представляет собой *событие-следствие*, имеющее место, если выполняется хотя бы один из вышеперечисленных критериев отказа. Рассмотрим в данной статье оценку надежности земляного полотна, обусловленную критерием (4). Тогда критерий надежности (2) примет вид:

$$\Psi = S_{\text{доп}} - S \geq 0 . \quad (7)$$

Если за меру надежности принять вероятность безотказной работы сооружения, то она определится как вероятность выполнения условия (7), т.е. $P = P(\psi \geq 0)$.

Задачу о нахождении параметрической надежности земляного полотна можно представить в виде системы с входными и выходными параметрами. На входе – параметры, влияющие на надежность сооружения. Прежде всего, – это климатические, грунтовые и гидрологические условия, определяющие характеристики грунтов. На выходе – величина осадки сооружения в различных створах поперечного сечения земляного полотна. Тогда основные этапы расчета параметрической надежности земляного полотна как строительного объекта, сводятся к следующему [10]:

- составление уравнения связи между входными параметрами (x_1, x_2, \dots, x_n) и выходным параметром S , осадкой основания земляного полотна по различным створам;
- разделение входных параметров на случайные и неслучайные (детерминированные);
- определение на основе имеющейся информации вероятностных характеристик входных случайных параметров;

- определение вероятностных характеристик выходных параметров системы на основе выбранного уравнения связи;
- выбор области допустимых (допредельных) состояний сооружения;
- определение надежности объекта как вероятности пребывания в допустимой области состояний в пределах срока службы;
- выбор уровня нормативной надежности;
- оценка надежности сооружения.

Согласно ОДМ [8], при проектировании насыпи по второму принципу на просадочных грунтах величины осадок основания земляного полотна в различных сечениях поперечного профиля рассчитывают по зависимости:

$$S = eh_{от} , \quad (8)$$

где

e – относительная осадка грунта основания после его оттаивания под нагрузкой,
 $h_{от}$ – расстояние от подошвы насыпи до ореола оттаивания [8].

На величину осадки влияет множество факторов (величина нагрузки, конструкция дорожной одежды, тип грунта основания насыпи, мощность деятельного слоя, температурный режим, льдистость многолетнемерзлых грунтов и т.д.), которые в большинстве по своей природе являются случайными. Рассмотрение всей их совокупности как случайных величин, а также учет стохастической связи между ними, делает решение задачи оценки надежности крайне затруднительным, поэтому мы ограничились частным случаем, когда стохастический характер учитывается только для одного входного параметра задачи. Этот параметр необязательно должен вносить самый весомый вклад в величину осадки насыпи. В вероятностной постановке задачи важным является параметр, вариативность которого можно достоверно оценить на основании экспериментальных или натурных данных. Кроме того, он должен помочь получить математически обоснованные стохастические характеристики величины осадки как выходного параметра системы. Таким параметром является относительная влажность грунта деятельного слоя W , от которой в методике [8] параметрически зависят величины e и $h_{от}$. Тогда уравнение связи можно записать в виде:

$$S = \varphi(W) . \quad (9)$$

Определим вероятностные характеристики входного случайного параметра системы, т.е. относительной влажности. Предполагаем, что случайная величина влажности подчиняется нормальному закону (закону Гаусса) распределения по следующим причинам. Во-первых, распределению Гаусса подчиняются случайные величины, отклонение которых от средних значений вызывается большой совокупностью случайных факторов, каждый из которых в отдельности незначителен. Математически это обосновывается центральной предельной теоремой [11]. Во-вторых, исходя из опыта вероятностных расчетов надежности гидросооружений и их оснований, значения коэффициента вариации влажности грунта C_v равны 0,15-0,35, а при значении C_v , равным 0,1-0,3, показатели свойств природных и искусственных грунтов можно рассматривать распределенными по нормальному закону [6].

Любая случайная величина X , подчиняющаяся нормальному закону распределения, полностью описывается двумя характеристиками: математическим ожиданием $M(X)$ и дисперсией $D(X)$, связанной со стандартом отклонения выражением $\sigma_X = \sqrt{D(X)}$. Согласно [12], статистической оценкой математического ожидания случайной величины X является среднеарифметическое выборки ее значений \bar{X} . Тогда статистической оценкой случайной величины относительной влажности является среднеарифметическое значение \bar{W} , получаемое по статистическим данным многолетних наблюдений или серии экспериментов. Зная коэффициент вариации, можно определить стандартное отклонение по формуле:

$$\sigma_W = C_v \cdot \bar{W} , \quad (10)$$

и, возведя его в квадрат, получить оценку дисперсии σ_W^2 .

На следующем этапе определим вероятностные характеристики распределения выходного параметра системы – величины осадки земляного полотна. Здесь статистический подход к их оценке не применим, потому что земляное полотно не является серийным однотипным изделием наподобие радиодеталей или автомобилей, и поэтому приходится оперировать понятием индивидуальной (субъективной) вероятности [5]. В данном случае характеристики законов распределения случайных величин можно получить с помощью приема рандомизации, применяемого к уравнению связи [5, 6]. Здесь могут использоваться различные подходы, наибольшее распространение среди которых получили методы статистических испытаний (Монте-Карло) и статистической линеаризации. В данной статье мы используем метод статистической линеаризации.

ции, суть которого заключается в следующем [5]. Согласно теории вероятностей, математическое ожидание и дисперсию случайной величины S , параметрически связанной со случайной величиной W зависимостью (9), можно определить по соответствующим формулам:

$$M(S) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(W)p(W)dW ; \quad (11)$$

$$\sigma_S^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (\varphi(W) - M(S))^2 p(W)dW , \quad (12)$$

где

$p(W)$ – плотность распределения случайной величины W [5].

Если функциональная зависимость (9) является непрерывной и дифференцируемой в интервале практически возможных значений случайной $w_1 \leq W \leq w_2$, т.е. вероятность $P(w_1 \leq W \leq w_2) \approx 1$, то нелинейная зависимость $\varphi(W)$ на этом интервале может быть заменена приближенно касательной, проведенной в точке с абсциссой W . Предполагается, что на достаточно узком интервале (w_1, w_2) нелинейная зависимость (9) и касательная близки между собой, поэтому зависимость $\varphi(W)$ в пределах интервала можно заменить уравнением касательной:

$$S = \varphi(M(W)) + \varphi'(M(W))(W - M(W)) , \quad (13)$$

где

$\varphi'(M(W))$ – значение производной $\varphi'(W)$ при $W = M(W)$.

Если раскрыть скобки и ввести соответствующие обозначения, то выражение (13) примет вид:

$$S = T_1 W + T_2 , \quad (14)$$

где

T_1 и T_2 – линейные коэффициенты, которые можно определить методом наименьших квадратов.

Для этого из интервала (w_1, w_2) нужно выбрать несколько значений относительной влажности: W_1, W_2, \dots, W_n , а затем для каждого из них по методике [8] определить величину осадки S_1, S_2, \dots, S_n . Тогда коэффициенты T_1 и T_2 можно найти по соответствующим формулам:

$$T_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})(S_i - \bar{S})}{\sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2} ; \quad (15)$$

$$T_2 = \bar{S} - T_1 \bar{W} , \quad (16)$$

где

$$\bar{W} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{n} ;$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} .$$

Для любой линейной функции вида (14) выполняется правило [11]:

$$M(S) = T_1 M(W) + T_2 ; \quad (17)$$

$$\sigma_S^2 = T_1^2 \cdot \sigma_W^2 . \quad (18)$$

Таким образом, зная математическое ожидание и дисперсию входной случайной величины W , достаточно просто определить математическое ожидание и дисперсию выходной случайной величины S .

Из теории вероятностей известно, что если случайную величину, подчиненную нормальному закону распределения, подвергнуть любому линейному преобразованию, то получится снова случайная величина, распределенная нормально [11]. Следовательно, случайная величина осадки земляного полотна S распределена по нормальному закону.

Величину $S_{\text{доп}}$, выведенную на основе практического инженерного опыта, также следует рассматривать как случайную, распределенную по нормальному закону. Тогда предлагаемые в нормативном документе их значения следует трактовать как математическое ожидание. Количественная оценка рассеяния допускаемых нормативных параметров требует отдельного исследования, поэтому в данной статье мы ограничимся предположением о коэффициенте вариации – 0,1 (как нижней границей для принятия гипотезы о нормальном законе распределения).

Значения вероятностей случайных величин, распределенных по нормальному закону, определяются с помощью функции Лапласа $\Phi(x)$ и тогда вероятность безотказной работы по критерию (4) можно записать в виде:

$$P = P(S < S_{\text{доп}}) = 0,5 + \Phi \left(\frac{M(S_{\text{доп}}) - M(S)}{\sqrt{\sigma_{\text{доп}}^2 + \sigma_S^2}} \right), \quad (19)$$

где

$M(S_{\text{доп}})$, $\sigma_{\text{доп}}$ – математическое ожидание и стандарт отклонения случайной величины $S_{\text{доп}}$ соответственно.

Отдельной проблемой в решении задач надежности элементов автомобильной дороги является нормирование приемлемого (нормативного) уровня надежности. Значения допустимой вероятности безотказной работы транспортных сооружений (автодорожных и городских мостов, тоннельных конструкций и противообвальных защитных сооружений) предложены в [2, табл. 2]. Их отказ приводит к полной остановке движения автотранспорта на участке дороги, на котором имеются вышеперечисленные транспортные сооружения. Что касается автомобильных дорог, то приемлемый для них уровень надежности в документе [2] увязывается с надежностью дорожных одежд, потому что надежность автомобильной дороги трактуется, как *«ее способность обеспечивать безопасное движение со средней скоростью (близкой к оптимальной) в течение нормативного или заданного срока службы»*. На среднюю скорость движения автомобилей существенно влияет состояние дорожных одежд. Оценка вероятности безотказной работы капитальных дорожных одежд в течение межремонтного периода была выведена в [13]. Она составляет 0,95.

Однако уровень надежности автомобильной дороги должен быть выше, потому что ее надежность обусловлена надежностью не только дорожных одежд, но и земляного полотна. В отличие от дорожных одежд, отказ которых главным образом приводит лишь к снижению скоростей движения автотранспорта, отказ земляного полотна, выражающийся в виде его деформаций, нередко приводит к полному прекращению движения транспорта на аварийном участке. В силу этого уровень нормативной надежности земляного полотна, по нашему мнению, должен быть сопоставим с уровнем надежности транспортных сооружений. В отсутствие общепринятого нормативного значения показателя надежности земляного полотна, на начальном этапе разработки вероятностной методики оценки его надежности предлагается использовать допустимые значения вероятности безотказной работы для противообвальных сооружений, которые можно воспринимать как элемент защиты земляного полотна. Вероятность безотказной работы противооб-

вальных сооружений зависит от класса надежности. В рекомендациях [2, табл. 1] противообвальные сооружения на дорогах I и II категорий относят к 1 классу, на дорогах III и IV категорий – ко 2 классу. Вероятность безотказной работы противообвальных сооружений 1, 2 и 3 классов соответственно в документе принята 0,999953; 0,99953 и 0,9953.

Рассмотрим пример расчета надежности земляного полотна автомобильной дороги III категории, нормативный уровень надежности которой принят равным 0,99953. Дорога расположена в дорожно-климатической зоне I_1 . Ориентация автомобильной дороги по оси: юг – север.

Дорожные одежды – облегченные. Верхний слой покрытия – асфальтобетон мелкозернистый толщиной 8 см; нижний слой покрытия – черный щебень – 12 см; верхний слой основания – щебень фракционированный 40-80 мм с заклиной мелким щебнем – 15 см; нижний слой основания – щебеночно-песчаная смесь – 25 см; дополнительный слой основания – песок среднезернистый – 0,35 м.

В насыпи отсутствуют неконсолидируемая и консолидируемая зоны. Рабочая отметка (как разность отметок оси дороги и рельефа по оси дороги) составляет 1,5 м. Земляное полотно выполнено из суглинка легкого пылеватого с крутизной откосов 1:4. Откосы и подошва насыпи укреплены торфо-песчаной смесью. Толщина укрепления на откосе и у подошвы составляет соответственно 0,25 м и 0,3 м.

Грунт деятельного слоя в основании насыпи – также суглинок легкий пылеватый с числом пластичности $I_p = 17$ %. Среднее значение относительной влажности $\bar{W} = 40\%$, поэтому можем принять $M(W) = 0,4$. Дисперсию σ_W^2 оценим с помощью коэффициента вариации. Согласно [6, табл. 5.1], коэффициент вариации C_v относительной влажности может находиться в пределах 0,15-0,35. Пусть $C_v = 0,2$. Тогда, подставляя значения в формулу (10), $\sigma_W = C_v \cdot \bar{W} = 0,2 \cdot 0,4 = 0,08$.

Оценим математическое ожидание $M(S)$ и дисперсию σ_S^2 случайной величины осадки S , применив метод статистической линеаризации в окрестности среднего значения аргумента W , т.е. на интервале [0,35;0,45]. Из него выберем несколько значений относительной влажности: W_1, W_2, \dots, W_n (где $n = 8$) и для каждого из них по методике, изложенной в главе 7 ОДМ [8], определим величину осадки S_1, S_2, \dots, S_8 по оси дороги. Методика была запрограммирована в Excel. Полученные значения осадки насыпи земляного полотна сведены в табл. 1.

Таблица 1

*Расчеты осадки земляного полотна
при различных значениях влажности*

<i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
W_i	0,35	0,37	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,45
$S_i, \text{ м}$	0,018	0,029	0,041	0,046	0,052	0,064	0,070	0,081

Следует отметить, что не для всех значений относительной влажности из **табл. 1** условие устойчивости земляного полотна $S < S_{\text{доп}}$ выполнено, потому что допустимая осадка насыпи с облегченными дорожными одеждами составляет $S_{\text{доп}} = 6$ см [**8, табл. 9**].

По формулам (15) и (16) получим значения линейных коэффициентов $T_1 = 0,65$ и $T_2 = -0,21$. Погрешность линейной аппроксимации составляет 5,1 %. Затем по формулам (17) и (18) находим математическое ожидание и дисперсию случайной величины осадки:

$$M(S) = T_1 \cdot M(W) + T_2 = 0,65 \cdot 0,4 - 0,21 = 0,05 \text{ м} = 5 \text{ см};$$

$$\sigma_S^2 = T_1^2 \cdot \sigma_W^2 = 0,65^2 \cdot 0,08^2 = 0,0027 \text{ м}^2 = 27 \text{ см}^2.$$

Стандартное отклонение: $\sigma_S = \sqrt{\sigma_S^2} = \sqrt{0,0027} = 0,052 \text{ м} = 5,2 \text{ см}$.

В качестве оценки математического ожидания случайной величины $S_{\text{доп}}$ примем ее нормативное значение для земляного полотна с облегченными дорожными одеждами $M(S_{\text{доп}}) = 6$ см. Дисперсию найдем по правилу, связывающему стандарт отклонения с коэффициентом вариации [**11, 12**]:

$$\sigma_{\text{доп}} = M(S_{\text{доп}}) \cdot C_v = 6 \cdot 0,1 = 0,6 \text{ см}.$$

Тогда дисперсия составит $\sigma_{\text{доп}}^2 = 0,6^2 = 0,36 \text{ см}^2$.

Вычислим аргумент функции Лапласа в формуле (19):

$$\frac{M(S_{\text{доп}}) - M(S)}{\sqrt{\sigma_{\text{доп}}^2 + \sigma_S^2}} = \frac{6 - 5}{\sqrt{0,36 + 27}} = \frac{1}{\sqrt{27,36}} = 0,448.$$

По специальным таблицам Функции Лапласа [12] находим, что $\Phi(x) = 0,1736$. Вероятность безотказной работы, вычисляемая по формуле (19), $P = P(S < S_{\text{доп}}) = 0,5 + 0,1736 = 0,6736$. Сравнивая его с нормативным значением вероятности безотказной работы 0,99953, получаем достаточно низкое значение меры надежности, хотя нормативный критерий устойчивости в детерминистической постановке задачи выполняется.

ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании анализа представленной работы можно отметить следующие результаты.

1. Сформулировано понятие надежности автомобильной дороги, согласующееся с государственным стандартом на основные термины и определения по надежности технических объектов.
2. Предложена методика оценки параметрической надежности земляного полотна в виде насыпи, запроектированной по второму принципу в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов.
3. Сформулированы критерии отказа насыпи, основанные на развитии методики предельных состояний системы «насыпь-основание».
4. По аналогии с отказом защитных противообвальных сооружений, приводящим к отказу автомобильной дороги, предложены значения нормированной вероятности безотказной работы земляного полотна.
5. Разработана методика решения задачи параметрической надежности насыпи при учете случайной природы входного фактора (относительной влажности) и определении вероятностных характеристик выходного параметра (осадки земляного полотна) методом статистической линеаризации.
6. На конкретном примере проиллюстрировано применение данной методики. При учете вариативности даже одного фактора, рассматриваемого как случайная величина, в приведенном примере получили очень низкое значение вероятности безотказной работы, хотя с позиций нормативной методики в детерминистической постановке критерий устойчивости насыпи выполняется. Это свидетельствует о том, что необходимо развивать методику предельных состояний в направлении учета случайной природы факторов, влияющих на устойчивость насыпи.
7. Хотя в изложенной методике принято много гипотез, тем не менее она может быть эффективно использована, например, при ва-

риантном проектировании конструкции насыпи, когда можно сравнить конкурирующие варианты не только по экономичности, но и по вероятности безотказной работы сооружения. Одна и та же вероятностная методика, применяемая к конкурирующим вариантам, даже при ее несовершенстве, позволит отобрать более надежную конструкцию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сильянов В.В. *Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог* / В.В. Сильянов. – М.: Транспорт, 1984. – 287 с.
2. *Рекомендации по оценке и обеспечению надежности транспортных сооружений. Актуализ. редакция от 01.10.2008* / ЦНИИС Минтранспроя СССР. – М., 2008. – 73 с.
3. ГОСТ Р 27.002-2015. *Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения.* – М., Госстандарт. – 24 с.
4. Болотин В.В. *Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений* / В.В. Болотин. – М.: Стройиздат, 1971. – 256 с.
5. Райзер В.Д. *Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций* / В.Д. Райзер. – М.: Стройиздат, 1986. – 192 с.
6. Векслер А.Б. *Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений* / А.Б. Векслер, Д.А. Ивашиных, Д.В. Стефанишин. – СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2002. – 592 с.
7. Ермолаев Н.Н. *Надежность оснований сооружений* / Н.Н. Ермолаев, В.В. Михеев. – Ленинград: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1976. – 152 с.
8. ОДМ 218.2.094-2018. *Методические рекомендации по проектированию земляного полотна автомобильных дорог общего пользования из местных талых и мерзлых переувлажненных глинистых и торфяных грунтов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов* / Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). – М., 2018. – 49 с.
9. Гавриленко Т.В. *Применение вероятностного подхода к оценке надежности основания насыпи в северной климатической зоне* / Т.В. Гавриленко, О.А. Иванова // Национальная ассоциация ученых (НАУ): научно-технический журнал. – 2020. – № 54. – С. 15-17. – Электрон. данные – URL: <https://national-science.ru/primenenie-veroyatnostnogo-podxoda-k-ocenke->

nadyozhnosti-osnovaniya-nasyupi-v-severnoj-klimaticheskoj-zone-15-17/ (дата обращения: 30.11.2020).

10. Стефанишин Д.В. Проблемы надежности гидротехнических сооружений / Д.В. Стефанишин, С.Г. Шульман. – СПб: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1991. – 52 с.
11. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1991. – 384 с.
12. Горелова Г.В. Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением Excel / Г.В. Горелова, И.А. Кацко: учеб. пособие для вузов. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 480 с.
13. Золотарь И.А. Экономико-математические методы в дорожном строительстве / И.А. Золотарь. – М.: Транспорт, 1974. – 248 с.

L I T E R A T U R A

1. Sil'yanov V.V. Transportno-ekspluatacionnye kachestva avtomobil'nyh dorog / V.V. Sil'yanov.– М.: Transport, 1984. – 287 s.
2. Rekomendacii po ocenke i obespecheniyu nadyozhnosti transportnyh sooruzhenij. Aktualiz. redakciya ot 01.10.2008 / CNIIS Mintransstroya SSSR. – М., 2008. – 73 s.
3. GOST R 27.002-2015. Nadyozhnost' v tekhnike (SSNT). Ter-miny i opredeleniya. – М., Gosstandart. – 24 s.
4. Bolotin V.V. Metody teorii veroyatnostej i teorii nadyozhnosti v raschyotah sooruzhenij /V.V. Bolotin. – М.: Strojizdat, 1971. – 256 s.
5. Rajzer V.D. Metody teorii nadyozhnosti v zadachah normirovaniya raschyotnyh parametrov stroitel'nyh konstrukcij / V.D. Rajzer. – М.: Strojizdat, 1986. – 192 s.
6. Veksler A.B. Nadyozhnost', social'naya i ekologicheskaya bezopasnost' gidrotekhnicheskikh ob"ektov: ocenka riska i pri-nyatie reshenij / A.B. Veksler, D.A. Ivashincov, D.V. Stefanishin. – SPb.: Izd-vo OAO «VNIIG im. B.E. Vedeneeva», 2002. – 592 s.
7. Ermolaev N. N. Nadyozhnost' osnovanij sooruzhenij / N. N. Ermolaev, V. V. Miheev. – Leningrad: Strojizdat. Leningr. otd-nie, 1976. – 152 s.
8. ODM 218.2.094-2018. Metodicheskie rekomendacii po proektirovaniyu zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog ob-shchego pol'zovaniya iz mestnyh talyh i myorzlyh pereuvlazh-nyonnyh glin-

- istyh i torfyanyh gruntov v zonah rasprostraneniya mnogoletnemyorzlyh gruntov /Federal'noe dorozhnoe agentstvo (Rosavtodor). – M., 2018. – 49 s.*
9. *Gavrilenko T.V. Primenenie veroyatnostnogo podhoda k ocenke nadyozhnosti osnovaniya nasypi v severnoj klimati-cheskoj zone / T.V. Gavrilenko, O.A. Ivanova // Nacional'naya asociaciya uchenyh (NAU): nauchno-tekhnicheskij zhurnal. – 2020. – № 54. – S. 15-17. – Elektron. dannye. – URL: <https://national-science.ru/primenenie-veroyatnostnogo-podhoda-k-ocenke-nadyozhnosti-osnovaniya-nasypi-v-severnoj-klimaticheskoj-zone-15-17/> (data obrashcheniya: 30.11.2020).*
 10. *Stefanishin D.V. Problemy nadyozhnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenij / D.V. Stefanishin, S.G. SHul'man. – SPb: VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 1991. – 52 s.*
 11. *Ventcel' E.S. Teoriya veroyatnostej i eyo inzhenernye pri-lozheniya / E.S. Ventcel', L.A. Ovcharov. – M.: Nauka, 1991. – 384 s.*
 12. *Gorelova G.V. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika v primerah i zadachah s primeneniem Excel / G.V. Gorelova, I.A. Kacko: ucheb. posobie dlya vuzov. – Rostov n/D: Feniks, 2005. – 480 s.*
 13. *Zolotar' I.A. Ekonomiko-matematicheskie metody v do-rozhnom stroitel'stve / I.A. Zolotar'. – M.: Transport, 1974. – 248 s.*
-

**EVALUATION OF PARAMETRIC RELIABILITY OF EMBANKMENT
DESIGNED IN THE PERMAFROST REGION BY REALIZING THE
SECOND PRINCIPLE**

*Ph. D. (Tech.) T.V. Gavrilenko,
Master of Science (Tech.) O.A. Ivanova
(Siberian Federal University)
Contact information: OAIvanova@sfu-kras.ru;
tvgavrilenko@sfu-kras.ru*

The method for estimating the parametric reliability of the roadbed when taking into account the random nature of the input factor (relative humidity) and determining the probabilistic characteristics of the output parameter (roadbed settlement) by statistical linearization is proposed. The failure criteria for an embankment designed according to the second principle in the permafrost region are formulated. The application of this method is illustrated by a specific example. Taking into account the variability of even

one factor considered as a random variable, in the example a very low value of the probability of failure-free operation has been derived, although from the standpoint of the normative methodology in the deterministic setting, the criterion of the embankment stability is fulfilled. The values of the normalized probability of the roadbed failure-free operation are proposed.

Key words: *embankment base, slope stability, second principle of design, permafrost soils, failure criterion, probability of failure-free operation.*

Рецензент: д-р техн. наук А.М. Кулижников (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 31.08.2020 г.