

УДК 502/504:627.82.034.93

В. Я. ЖАРНИЦКИЙ, Е. В. АНДРЕЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

ПРИНЦИПЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ В ПОСТРОЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ НИЗКОНАПОРНЫХ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН

Показано, что в пределах сделанных допущений разрешение проблемы формализации эксплуатационной надежности плотин связано с вопросами учета свойств грунтов – материала для их возведения. Предложен алгоритм оценки надежности низконапорных грунтовых плотин.

Разрушения и повреждения плотин, эксплуатационная надежность грунтовых сооружений, свойства грунтов, алгоритм расчета надежности.

It is shown that within the range of made assumptions the problem solution of formalization of dams operational reliability is connected with the questions of taking soil properties into account – the material which is used for their construction. The algorithm of reliability assessment of low-head soil dams is proposed.

Destructions and damages of dams, operational reliability of soil structures, soil properties, algorithm of reliability calculation.

Наряду со многими причинами, увеличивающими риск повреждения или разрушения грунтовых плотин, существует ряд факторов, в большей степени характерных для России и стран СНГ. К этим факторам относят превышение нормативных сроков эксплуатации целого ряда подпорных сооружений, нарушение работы отдельных узлов (элементов), запозывание или отсутствие профилактических ремонтов в связи с финансовыми трудностями и др.

Низконапорные грунтовые плотины (НГП) представляют собой наиболее распространенный класс плотин, однако в силу разных причин НГП не уделяется достаточного внимания в плане обеспечения эксплуатационной надежности. Так, по данным [1], отмечается, что значительное количество обследованных гидротехнических сооружений имеет уровень безопасности, отнесенный к опасному и неудовлетворительному (27 % и 51,8 % соответственно). Значительную проблему представляет отсутствие системных решений по разработке математических моделей надежности низконапорных грунтовых плотин.

Проблема исследования эксплуатационной надежности имеет ряд принципиальных аспектов:

не выработаны общие принципы и методология определения эксплуатационной надежности плотин; существующие подходы описывают только некоторые частные случаи, например оценку устойчивости откосов грунтовых массивов;

не выработаны методы учета особенностей свойств грунтов как материала для возведения плотин.

Сложности решения задачи эксплуатационной надежности плотин возникают при попытках применить положения ГОСТ 27.002–89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» для вычисления показателей надежности. В соответствии с этим нормативным документом «надежность – свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени и в заданных пределах значения установленных эксплуатационных показателей». Однако при этом возникает вопрос о составе тех параметров, которые должны быть приняты при расчете надежности. Так, если руководствоваться базовым нормативным документом СНиП 2.06.05–84 «Плотины из грунтовых материалов», то следует отметить, что в нем содержится указание на десятки норм и требований, часть из которых имеет качественную природу. Выходом из создавшегося положения могло бы стать установление

некоторого ограниченного состава параметров плотин, которые имели бы существенное значение при вычислении надежности – показателей надежности.

Оценку эксплуатационной надежности гидросооружений можно проводить, используя различные методы:

метод, базирующийся на построении имитационных моделей, в котором выстраиваются модели, основанные на определении эмпирической зависимости между измеряемым параметром и факторами, вызывающими его изменение;

метод, основанный на решении задачи идентификации параметров модели.

Недостаток первого подхода (имитационные модели) состоит в том, что в нем используются лишь результаты наблюдений за процессом и не привлекается априорная информация, полученная на стадии проектирования. Для непосредственного использования этой схемы, особенно в вероятностной постановке, требуется слишком много измерений по сравнению с числом измерений, которое можно получить на сложных и уникальных объектах. Во втором случае недостаток состоит в сложности решения задачи идентификации для оснований сооружений из-за сложности самих объектов и ограниченности необходимой диагностической информации, а также из-за особенностей решения самих обратных задач.

В масштабе решения поставленных в данной работе задач следует указать также на необходимость рассмотрения более общих вопросов, в частности, формулировок понятия об эксплуатационной надежности плотин, а также обоснования принципов моделирования и расчета плотин.

Еще один существенный аспект состоит в том, что в строительных нормах и правилах по плотинам заложены неоправданно высокие уровни надежности (0,99996...0,999997) независимо от той роли, которую играет в сооружении проектируемый элемент. Из этого следует, что разработчики таких нормативных документов не имеют достоверных научно-технических обоснований расчета надежности и закладывают в документы избыточные уровни показателей. Это приводит либо к неисполнению требований строительных норм и правил, либо к

экономически неоправданным затратам, т. е. к нерациональному использованию ресурсов.

Таким образом, научное обоснование требований к надежности приобретает дополнительные аспекты актуальности задачи с перспективой корректировки нормативных документов.

Наряду с перечисленными подходами можно выделить ряд моделей оценки надежности и безопасности сооружений:

методика оценки надежности гидротехнических сооружений в сложных сейсмических условиях;

оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам [2];

моделирование напряженно-деформированного состояния плотин [3];

вероятностный метод оценки устойчивости откосов [4];

метод прогнозной оценки деформации тела плотины по фактическому распределению коэффициента уплотнения грунта в сооружении [5].

Основные аналитические соотношения, полученные в методах [2–5]:

вероятность обеспечения устойчивости откоса –

$$P(k_s \geq 1) = n/N,$$

где k_s – коэффициент устойчивости; n – число исходов; N – число независимых статистических испытаний;

срок эксплуатации t в годах на момент износа [2] –

$$t = lny/l,$$

где y – относительная надежность; l – коэффициент надежности;

при решении динамических задач теории консолидации для диагональной матрицы $[C_v]$ получено соотношение [3] –

$$[C_v] = \sum_{i=1}^{n_s} \rho c_i d_s,$$

где n_s – число конечных элементов на вязкой границе; s – площадь внешней стороны конечного элемента; c_i – скорость распространения упругих волн; ρ – надежность запаса;

для вероятности обрушения откоса предложено соотношение [4] –

$$P_f = \frac{1}{2} - \Psi \left(\frac{\bar{\rho}}{\sigma_p} \right),$$

где Ψ – интегральная функция стандартного нормального распределения; $\bar{\rho}$ – среднее значение надежности запаса; σ_p – стандартное отклонение;

при использовании вероятностного метода расчета деформации тела плотины по результатам уплотнения грунта получено выражение для прогнозного определения осадки тела грунтовой насыпи или ее элементов –

$$S = H_{пл} (1 - 0,3k_{com} - 0,72\sqrt[3]{k_{com}}),$$

где $H_{пл}$ – высота насыпи; k_{com} – коэффициент (степень) уплотнения грунта в теле плотины.

Каждый из этих методов, примененный при решении определенной задачи, имеет достоинства и недостатки, которые можно рассматривать в плане перспективы построения обобщенной модели эксплуатационной надежности.

Достоинства данных методов:

использование вероятностных задач расчета надежности гидротехнических сооружений при динамических воздействиях, в которых учитывается стохастический (случайный) характер свойств грунтов основания и внешних нагрузок, позволяет выполнять вероятностные расчеты надежности ГТС в сложных сейсмических условиях;

метод [2] – в короткие сроки и по простым схемам получить количественные оценки эксплуатационной надежности объекта;

метод [3] – использование современных расчетных методов конечных элементов при решении системы дифференциальных уравнений динамической теории консолидации;

методы [4, 5] – применение вероятностного метода оценки деформации тела грунтовой плотины или ее элемента на основе анализа характеристик эмпирического распределения некоторого показателя (в [5] – коэффициента уплотнения грунта); в сооружении устанавливается заданная величина ожидаемой осадки или даются характеристики устойчивости откоса.

Недостатки указанных методов в плане построения обобщенной модели эксплуатационной надежности:

несоответствие характера воздействия (сейсмические условия) рассматриваемой задаче;

метод [2] – отсутствие достаточно полных экспериментальных данных, которые позволили бы установить соответствие показателя эксплуатационной надежности плотин и внешних признаков

(дефектов) на различных этапах жизненного цикла объекта;

метод [3] – проблематичность достаточно полного учета свойств грунтов с учетом их особой природы (об этом будет сказано ниже);

метод [5] – ограничение области применения предложенного метода этапом контроля строительства сооружения, при том что возможности метода, по-видимому, более широки.

На основе анализа указанных методов можно выделить вероятностные методы – наиболее перспективные в рамках задач данного исследования, однако их преимущества не вполне очевидны без понимания особенностей свойств грунтов как строительного материала для возведения плотин. Особенность грунтов заключается в том, что они применяются в состоянии *in-situ* или после некоторых весьма ограниченных по типу технологических операций. В сравнении с материалами искусственного происхождения для грунтов не применяются такие методы, как термообработка, синтез, спекание и некоторые другие, что в сочетании с исключительным разнообразием свойств грунтов предопределяет фундаментальное отличие грунтов от материалов искусственного (техногенного) происхождения. Это различие проявляется особенно ярко в высокой и неустранимой неоднородности свойств и характеристик грунтов, что предполагает применение вероятностного и статистического подходов при описании их свойств. Прослеживая тенденции развития представлений по механике грунтов в трудах К. Терцаги, Н. М. Герсеванова, С. И. Алексеева, Н. А. Цытовича, Ю. К. Зарецкого, В. Н. Ломбардо, С. С. Вялова, Е. А. Вознесенского и других, можно отметить, что моделирование механического поведения становится все более сложной процедурой, в которую вовлекаются реологические, физико-химические и иные факторы. Вместе с тем, такой подход далеко не всегда оправдан, поскольку может быть реализован только в некоторых частных случаях, тогда как общие методы еще не выработаны. Вероятностные методы на основе анализа характеристик эмпирического распределения некоторого показателя

могут быть перспективны, поскольку позволяют избежать выполнения многофакторных расчетов. Таким образом, очевидно, что при традиционном подходе к моделированию грунтов, а на более высоком уровне и геотехнических сооружений (грунтовых плотин), принципиальные трудности возникают уже на стадии физического моделирования, предшествующего расчетным процедурам и математическому моделированию. Нетрадиционная методология заключается в исследовании статистических и вероятностных закономерностей грунтовых сред в составе геотехнического сооружения по установленным показателям надежности. Уникальность характеристик грунтовых сред, состоящая в их неоднородности и высокой дисперсии значений параметров соответствующих частотных распределений, становится основой для аттестации объекта.

Логический переход к эксплуатационной надежности объекта в соответствии с ГОСТ 27.002–89 обусловлен тем, что при расчете надежности сложных объектов применяются вероятностные методы определения частоты отказов объекта по некоторому параметру.

В предлагаемом авторами подходе к оценке эксплуатационной надежности модель эксплуатационной надежности плотины построена на определенном допущении: разрушение плотины происходит по стохастическому механизму, для описания которого применены следующие подходы –

возникновение очагов опасных дефектов имеет непредсказуемый характер в плане локализации по телу плотины;

с точки зрения теоретического обоснования модели может быть использован принцип динамической неустойчивости грунтов, по Е. А. Вознесенскому, согласно которому вероятность неустойчивости грунтов зависит от свойств грунтов, характера воздействия на грунт (амплитуды, частоты и др.) и влажности [6];

идея В. Я. Жарницкого о возможности решения задачи вероятностной оценки деформации тела грунтовой плотины с помощью метода статистического исследования грунта (эмпири-

ческого распределения коэффициента уплотнения грунта) [5].

На основании изложенного авторами приняты следующие принципы оценки эксплуатационной надежности:

вероятность наступления отказа (критического состояния) объекта на протяжении жизненного цикла определяется в соответствии с ГОСТ 27.002–89 по установленным показателям;

вычисление вероятности наступления отказа объекта выполняется с помощью анализа характеристик эмпирического распределения некоторого показателя; принимается, что характер и вид распределения показателя инвариантен комплексу факторов (за исключением строительных технологий и методов, применяемых при строительстве грунтов, а также условий эксплуатации).

В предлагаемом подходе к оценке эксплуатационной надежности в качестве контрольного параметра принимается коэффициент уплотнения грунта, характеризующий процесс консолидации грунта – основной технологический передел.

В соответствии с положениями о динамической неустойчивости грунтов Е. А. Вознесенского для расчета $P_{од}$ – вероятности возникновения опасного дефекта (отказа объекта – по терминологии ГОСТ 27.002–89) – можно записать:

$$P_{од} = f(\alpha_{вн}, \beta_{гр.})w, \quad (1)$$

где $\alpha_{вн}$ – показатель, характеризующий воздействие (нагрузки) на строительные характеристики грунтов плотины; $\beta_{гр.}$ – показатель, характеризующий текущие свойства грунтов; w – влажность.

В случае, если переменные в (1) принять независимыми друг от друга, будет выполняться соотношение [8]:

$$P_{од} = P_1 P_2 P_3, \quad (2)$$

где P_1, P_2, P_3 – элементарные вероятности отказов, обусловленные следующими факторами: нагрузкой, свойствами грунтов и влажностью соответственно.

Допущения о независимости переменных друг от друга могут быть приняты только на уровне оценочных расчетов, а на этапе углубленных исследований необходим учет взаимовлияния переменных.

В случае, когда переменные не являются независимыми, формула (2) становится более сложной, поскольку

должны быть учтены двойные взаимодействия переменных, а также тройное их взаимодействие.

На данном этапе представляет интерес рассмотрение случая независимых переменных, для чего есть такое обоснование: внешние воздействия приводят к достижению грунтами определенного уровня консолидации; характеристики уплотненного грунта могут служить интегральным параметром по совокупности воздействий.

В основе расчетного метода лежит рабочая гипотеза – чем выше доля недоуплотненных грунтов в составе низконапорной грунтовой плотины, тем ниже эксплуатационная надежность плотины. К недоуплотненным грунтам относятся те, для которых k_{comi} ниже проектных требований. Для определения доли неууплотненных грунтов в таких плотинах применяют вероятностный анализ. Коэффициент уплотнения грунта в теле плотины k_{comi} определяется так:

$$k_{\text{comi}} = \frac{\rho_{\text{di}}}{\rho_{\text{dmax}}},$$

где ρ_{di} – плотность сухого грунта, уложенного в тело плотины; ρ_{dmax} – максимальная плотность сухого грунта, которая может быть достигнута при уплотнении.

При строительстве плотины требуется соблюдение следующего условия:

$$k_{\text{comi}} \geq k_{\text{com проект}},$$

где k_{comi} – коэффициент (степень) уплотнения грунта в теле плотины (определяется по указанной формуле); $k_{\text{com проект}}$ – коэффициент, устанавливаемый проектом в зависимости от класса сооружения, действующих нагрузок, вида и состава грунтов и т.п.

Представляется целесообразным введение безразмерного показателя, характеризующего степень исполнения проектных требований, вида

$$k_{\text{ип}} = k_{\text{comi}} / k_{\text{com проект}}.$$

В случае, если $k_{\text{ип}} < 1$, можно говорить о неполном исполнении проектных требований.

Предусматривается введение коэффициента $k_{\text{п}}$, который характеризует неучтенность дополнительных факторов, а также совокупные местные условия плотины – по степени опасности для территорий нижнего бьефа, по уровню безопасности в соответствии с регистром ГТС, по потребности в ремонте, по наличию

(отсутствию) службы эксплуатации, паводковые нагрузки. Предполагается, что $k_{\text{п}}$ будет меняться от 0,65* до 1, причем последнее его значение будет отвечать максимальной надежности. Методика определения $k_{\text{п}}$ отрабатывается в настоящее время на основе изучения реальных объектов.

На основании обработки экспериментальных данных по деформационному изменению тела и основания плотины вводится коэффициент искажения геометрии (КИГ) плотины:

по телу плотины определяется как отношение фактической высоты плотины к тому же параметру, определенному проектом –

$$k_{\text{киг}} = h_{\text{i}} / h_{\text{пр}};$$

по деформации тела и основания плотины – по отношению фактической осадки к проектному условию –

$$k_{\text{кигт.пл}} = S_{\text{т.плі}} / S_{\text{т.плпр}} \text{ и } k_{\text{кигосн.}} = S_{\text{i}} / S_{\text{пр}};$$

по безопасности состояния откосов плотины (учитывается отношение фактического коэффициента устойчивости откоса $k_{\text{усті}}$ к проектному значению $k_{\text{устпр}}$ (для нашего класса сооружения можно использовать вероятностный метод Хуана) –

$$k_{\text{киготк}} = k_{\text{усті}} / k_{\text{устпр}}.$$

Как результат обобщения $k_{\text{ип}}$, $k_{\text{п}}$, $k_{\text{киг}}$, $k_{\text{кигт.пл}}$, $k_{\text{кигосн.}}$, $k_{\text{киготк}}$, k_{γ} вводится интегральный показатель $K_{\text{ц}} = f(k_{\text{ип}}, k_{\text{п}}, k_{\text{киг}}, k_{\text{кигт.пл}}, k_{\text{кигосн.}}, k_{\text{киготк}}, k_{\gamma})$, меняющийся от 0,65 до 1.

Расчетный алгоритм оценки надежности состоит из следующих этапов:

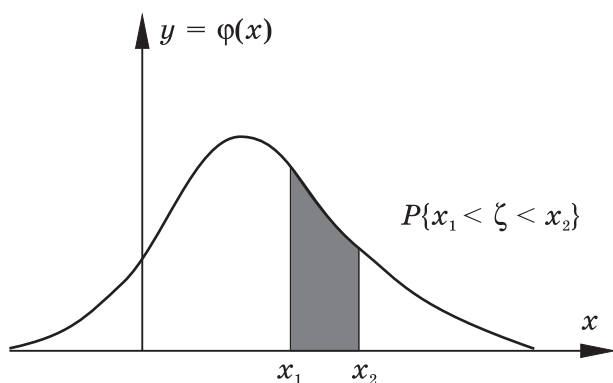
оценка статистических массивов по k_{com} с точки зрения возможности описания частотных зависимостей функциями распределения – гамма-распределением; логарифмически-нормальным и др.;

определяется вид аналитической функции – плотность вероятности – значение показателей k_{com} .

На рисунке приведена графическая интерпретация метода определения вероятности для непрерывного распределения [7]. Заштрихованная область криволинейной трапеции равна вероятности $P\{x_1 < \zeta < x_2\}$, если площадь всей фигуры между кривой

* Уточняется по имеющимся результатам обследования низконапорных грунтовых плотин

распределения и осью абсцисс равна 1.



Графическая иллюстрация определения вероятности: $P\{x_1 < \zeta < x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} \varphi(x) dx$

Для случая нормального распределения $k_{\text{ком}}$ плотность вероятности нормально распределенной случайной величины с параметром смещения μ и масштаба σ (дисперсия σ^2) имеет следующий вид:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right).$$

Функция распределения такой величины не выражается через элементарные функции и записывается через интеграл Римана:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt.$$

Вероятность попадания случайной величины ζ_0 в интервал $(x_1; x_2)$

$$P\{x_1 < \zeta_0 < x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} \varphi_0(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx - \frac{1}{2\pi} \int_0^{x_1} e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

Для плотности вероятности доли уплотненных грунтов с проектным коэффициентом уплотнения (более $k_{\text{ком проект}}$) можно записать так:

$$f(x) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \int_{0,95}^1 \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\delta^2}\right) dt.$$

Тогда коэффициент технического состояния плотины $K_{\text{теп}}$ можно выразить через отношение доли сильных грунтов к общей массе всех грунтов:

$$K_{\text{теп}} = \frac{\int_{0,95}^1 \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\delta^2}\right) dt}{\int_0^1 \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\delta^2}\right) dt}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что $K_{\text{теп}}$ меняется в пределах от 0,65 до 1. Для коэффициента эксплуатацион-

ной надежности можно записать: $K_{\text{эн}} = K_{\text{теп}} K_{\text{и}}$.

В случае, если при статистической обработке результатов не представляется возможным получить аналитические соотношения для расчета $K_{\text{теп}}$, применяется оценка по коэффициенту искажения геометрии плотины и поправочному коэффициенту.

Выводы

Сформулированы принципы описания эксплуатационной надежности плотин и методы ее оценки. Показано, что вероятностные статистические подходы могут быть эффективным инструментом решения задачи оценки эксплуатационной надежности низконапорных грунтовых плотин. Исследованы некоторые аспекты, связанные с особыми характеристиками грунтов, что позволило выявить рациональные методы их моделирования.

1. Анализ состояния гидротехнических сооружений гидроузлов Подольского района Московской области: научно-технический отчет (окончательный) / В. И. Волков [и др.] – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2009. – 29 с.

2. Добромыслов А. Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам. – М.: Изд-во: АСВ, 2008. – 72 с.

3. Орехов В. В. Прогнозное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин и скальных массивов: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2003. – 306 с.

4. Хуан Я. Х. Устойчивость земляных откосов. – М.: Стройиздат, 1988. – 240 с.

5. Жарницкий В. Я. Обеспечение качества и надежности каменно-земляных плотин при строительстве: монография. – Иваново: изд-во ИГЭУ имени В. И. Ленина, 2005. – 156 с.

6. Вознесенский Е. А. Динамическая неустойчивость грунтов. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 263 с.

7. Румшинский Л. З. Элементы теории вероятностей; изд. 5-е, перераб. – М.: Наука, 1974. – 240 с.

Материал получен редакцией 19.03.12.

Жарницкий Валерий Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Экспертиза и управление недвижимостью»

Тел. 8-905-720-30-72

E-mail: zharnitskiy@mail.ru

Андреев Евгений Владимирович, аспирант

Тел. 8-985-361-10-27