

УДК 62-192

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ПОЧВОЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ, УЧИТЫВАЮЩИХ УСЛОВИЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Т.Б. АГАЕВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ЭКОЛОГИИ
И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

В статье рассмотрены вопросы разработки моделей надёжности технических систем на базе изучения динамики износа какого-либо элемента, характеризующего состояние стареющего оборудования с помощью мощного аппарата современной теории надёжности. Данная теория может быть применима в прикладном эрозиоведении к СПМ.

Ключевые слова: *износ, теория надёжности, сооружения, система почвозащитных мероприятий.*

Интересы дальнейшего развития эрозиоведения, выяснение нерешённых вопросов, связанных с теорией процессов почвенной эрозии (ППЭ) с соответствующим постепенным переключением внимания специалистов и эрозиоведов на проблемные вопросы, требуют безотлагательной разработки некоторых крупных теоретических и практических проблем. В частности, для практического эрозиоведения наиболее активной проблемой является разработка систем почвозащитных мероприятий (СПМ) включающих соответствие организационных, агромелиоративных, биомелиоративных и гидротехнических мероприятий направленных на регулирование ППЭ как в локальном, так и в региональном масштабе с учётом зональных закономерностей и режима проявления ППЭ [3, 4].

Одним из наиболее эффективных и надёжных почвозащитных мероприятий являются склоновые гидротехнические противозерозионные сооружения (СППС) (табл. 1), которые, несмотря на относительно высокую стоимость, обеспечивают формирование

WORKING OUT OF MODELS OF RELIABILITY OF SYSTEMS OF THE SOIL-PROTECTIVE ACTIONS CONSIDERING THE CONDITIONS OF THEIR OPERATION AND ENVIRONMENT

T.B. AGAEV

In article questions of working out of models of reliability of technical systems on the basis of studying of dynamics of deterioration of any element characterising a condition of the growing old equipment by means of the powerful device of the modern theory of reliability are considered. The given theory can be applicable in applied эрозиоведении to system of soil-protective actions.

KEYWORDS: *deterioration, the theory of reliability, a construction, system of soil-protective actions.*

оптимального режима поверхностного склонового стока (ПСС) и процессов водной эрозии почв (ВЭП) сразу после их строительства, тем самым, обуславливая эффективную защиту водных объектов от загрязнения продуктами процессов ВЭП, содержащих значительное количество самых различных ингредиентов.

Отсутствие указаний и правил по расчету и размещению СППС в горных условиях (за исключением террас), отрывается на надёжности их и ведёт к перерасходу средств, отпускаемых на борьбу с эрозией почв и охрану водных объектов от загрязнения.

Общая задача СППС состоит в снижении интенсивности ПСС и процессов ПВЭП на склонах ниже предельно допустимых значений их в том случае, когда применение агротехнических и агромелиоративных мероприятий недостаточно эффективно обеспечивают регулирование данных процессов.

В последние годы практическое эрозиоведение, которое занимается разработкой, проектированием и

ТАБЛИЦА 1.

Склоновые гидротехнические противозерозионные сооружения

Типы, подтипы и виды ГПС	Класс капитальности сооружений		Срок службы сооружений по объему аккумуляции продуктов ПВЗП в годах	Расчётная обеспеченность в % по максимальному расходу
	Постоянные	Временные		
СГПС				
1. Водонаправляющие				
а. распылители стока		V	2-5	20%
б. водоотводные и нагорные канавы		V	5-10	10%
в. водозадерживающие валы		V	5-10	10%
2. Регуляционные				
а. валы-канавы		V	< 10	10%
б. канавы-террасы		V	10-20	10%
в. террасы	V		> 20	5%
РСГПС				
3. Перегораживаемые				
а. запруды	V		10-20	5%
б. полузапруды	V		10-20	10%
в. донные перепады, пороги	V		10-20	5%
4. Сопрягающие				
а. перепады	IV		> 20	5%
б. консольные водосбросы	IV		> 20	1%
в. лотки-быстротоки	IV		> 20	1%

внедрением в СХЛ данных мероприятий, становится всё более популярным. Есть все основания считать, что это направление будет ведущим в СХП XXI в.

Но наряду с этим возникает проблема износа и разрушения СГПС, ставшая в современном мире и, в особенности, в России с её экономическим кризисом проблемой огромной сложности и эколого-экономической значимости. Резкий износ и старение (истощение защитных функций в ходе жизненного цикла) сооружений самого различного профиля приводит к росту вложений денежных средств в программы их восстановления и ремонта без ощутимой отдачи обществу результатов такого использования материальных услуг.

Современная информатика и системный анализ, обладая мощным инструментом исследования сложных систем любой природы, к которым относятся и СПМ, могут и должны внести весомый вклад в решение данной проблемы. Постановка практического эрозиоведения на твердый математический фундамент позволит решать задачи целенаправленного управления процессами эксплуатации СПМ, а также задачи оптимизации и наиболее эффективного использования всегда ограниченных ресурсов, выделяемых на решение проблемы износа и восстановления сооружений и увеличения продолжительности их эффективной эксплуатации [2, 9, 10].

Проблема борьбы с преждевременным износом технического оборудования, с целью продления периода эффективной эксплуатации его, является одной из самых старых проблем, разрабатывающихся со времени возникновения промышленного производства в мире. Методология, использовавшаяся при этом, постоянно усложнялась, дополнялась и развивалась в соответствии с другими науками, а в последнее время – информатики и системного анализа. В настоящее время можно выделить три основных направления весьма плодотворного использования метода анализа сложных систем в прикладном эрозиоведении.

Первое направление – математическое и имитационное моделирование индивидуального износа и старения отдельно взятого элемента (сооружения) системы. При этом основной задачей является изучение эффектов модификации структуры системы и функциональных характеристик ее элементов, а также эффектов внешних управляющих воздействий на процесс износа и разрушения системы.

Второе направление – использование современных методов теории вероятности и статистического анализа многомерных объектов с целью выявления степени и формы влияния внешнесредовых и других факторов, а также эффектов целенаправленных почвозащитных мероприятий на структуру и эффективность продления эксплуатации сооружений.

Третье направление – изучение динамики износа (отказа какого-либо элемента, характеризующего состояние стареющего оборудования с помощью мощного аппарата современной теории надежности. Данная теория, получившая в последние десятилетия исключительно активное и плодотворное развитие применительно к техническим системам, может быть с большим успехом применена в прикладном эрозиоведении к СПМ [1, 9, 10].

Вероятность безотказной работы для любых видов технических устройств, в том числе и СПМ, включающих СГПС, существенно зависит от несомой ими нагрузки и условия среды, в которой они находятся – в качественном отношении этот факт самоочевиден и никогда никем не доказывался и не оспаривался, а в количественном отношении ему посвящено необозримое количество научно-технической литературы. Это понятно, если учесть, что каждый вид и модификация сооружения должны быть снабжены обоснованным указанием их номинальной и предельной нагрузки (воздействие водных потоков) режимов температуры, влажности, вибрации, степени агрессивности среды, в которых сооружение может работать, а проектировщик при этом отвечает за его работоспособность [1].

Целью исследовательских работ является не расчет надежности, а создание сооружения для той нагрузки и для тех режимов эксплуатации, которые требуются потребителю, с помощью аналитических и эмпирических методов, которые специально разрабатываются для сооружений данного вида, с учетом изменения свойств элементов системы под воздействием величины и характера водных потоков, температуры и других дестабилизирующих факторов [1]. Проверка надежности составляет последующий, заключительный этап отработки конструкции и технологии.

Проверка надежности СГПС и других элементов СПМ для инженера – совершенно необходимый этап, который при отсутствии моделирования требует больших затрат времени. Если, например, потребителю требуется элемент со средним ресурсом (продолжительностью безотказной работы) 5 лет (это требование вполне реально), то в течение времени, значительно большего этого, необходимо выдерживать в рабочем режиме определенное количество элементов системы, чтобы доказать их требуемую надежность. Именно вследствие этих трудностей возникли различные классы моделей, позволяющих значительно ускорить проведение испытаний и оценить надежность [6–13].

Для эрозиоведа-практика подобные модели представляют практический интерес, поскольку позволяют наблюдать изучаемую систему не в течение 10–20 лет после момента t_2 , обозначающего начало старения, а в течение времени, в несколько раз меньшего, и обоснованно делать при этом вывод о показателях, характеризующих динамику интенсивности на всем

периоде от t_2 до t_{max} . Эти модели имеют чрезвычайно большое распространение в прикладной статистике и обладают весьма общим характером и многообразными направлениями применения. Ускорять испытания можно, в частности, используя усеченные пределы изменений определяющего параметра при наблюдении параметрических отказов, т. е. уменьшая допуск на контролируемый выходной параметр: при этом осуществляется экстраполяция закономерности изменения этого параметра на время возникновения отказа. Иногда используются смешанные физико-математические модели, использующие косвенные свидетельства накопления повреждений, возникающих в процессе износа и старения эксплуатируемых сооружений. Проявлением накопления этих повреждений являются различные маркирующие признаки, позволяющие прогнозировать примерное время наступления отказа.

В практическом эрозиоведении поиск маркирующего признака или нескольких признаков ведется в целях формирования групп риска по наиболее важным видам воздействия на элементы СПМ с последующим вычислением средней ожидаемой продолжительности срока их эксплуатации.

Именно определенные успехи в ускорении испытаний на надежность и в подборе маркирующих признаков возрастания вероятности возникновения отказа привели к идеям, позволяющим моделировать влияние нагрузки и окружающей среды на надежность. Суть этих идей состоит в том, чтобы провести испытания каких-либо элементов СПМ при форсированной нагрузке, добившись их сравнительно быстрого выхода из строя, а затем, используя фактор подобия процессов, происходящих в нормальном и форсированном режимах, пересчитать время возникновения отказа при работе в нормальном режиме. Точно такая идея возникла и в отношении параметров окружающей среды – провести испытания при повышенной интенсивности склонового поверхностного стока, когда заведомо ускоряются все процессы, ведущие к отказу, фиксировать момент отказа, а затем пересчитать на этой основе время безотказной работы в условиях нормальной температуры. Очевидно, что работа по обоснованию режимов ускоренных испытаний, имея целью повысить эффективность производства и контроля различных элементов СПМ, даёт полезную информацию о зависимости надежности от режимов и условий работы [5].

Ужесточение рабочих режимов ускоряет процессы износа и старения, переводит элемент СПМ в нерабочее состояние в ускоренном темпе. Например, под влиянием склонового поверхностного стока резко меняется механическая прочность материалов, уменьшаются напряжение разрыва и другие показатели. Как и в случае моделей, позволяющих прогнозировать время возникновения отказа по состоянию

маркирующего признака, зависимости интенсивности отказов от интенсивности склонового поверхностного стока (как и от других видов дестабилизирующих факторов и величины нагрузки) глубоко специфичны, отображают физические свойства и особенности данного вида элементов СПМ и, более того, как правило, имеют конкурирующие варианты, предлагаемые различными исследователями. Это объясняется весьма просто. Процессы, происходящие в каком-либо элементе СПМ и зависящие от того или иного дестабилизирующего фактора, настолько сложны, разнообразны и неаддитивны, что описать их с чисто теоретических позиций невозможно, а эмпирические и полуэмпирические зависимости, дающие на том или ином диапазоне экспериментальных данных хорошее расчетное совпадение, могут быть основаны на различных классах функций.

Если поставленной целью является найти максимально форсированные режимы, позволяющие провести ускоренные испытания в кратчайшие сроки, то выбор этих режимов связан с одним условием, – в режиме выбираемой форсированной нагрузки или условий окружающей среды в СПМ не должны происходить процессы, не свойственные элементам СПМ в нормальном режиме работы. Эти деструктивные процессы не дают возможности пересчета наблюдаемого времени отказа на нормальный режим, хотя и имеют большое информативное побочное значение, позволяя выяснить, как влияет «патологический» режим на свойства материалов, из которых оно изготовлено. Все основные принципы моделирования ускоренных испытаний и построение соответствующих базовых моделей были разработаны еще в 60–70-е гг. XX в., в основном применительно к не восстанавливаемым элементам радиоэлектронной аппаратуры, в том числе механическим (переключателям, разъемам, редукторам и т.п.). Все эти принципы и базовые модели используются и сейчас в технической практике, в особенности принцип недопущения посторонних процессов при ускоренных испытаниях [12, 14].

Если по аналогии с этим говорить о закономерностях старения элементов СПМ и динамики интенсивности их разрушения, то очевидно, что здесь должно соблюдаться аналогичное требование, – нельзя изучать старение в условиях развития в СПМ деструктивных, процессов, перенося полученные результаты на функционирующую в нормальных условиях СПМ, даже вводя при этом поправки и коэффициенты.

Рассмотрим принципиальную базовую модель перехода от интенсивности отказов в нормальных условиях и режимах работы к интенсивности отказов в условиях повышенной нагрузки, или действия каких-либо других факторов, влияющих на надежность. Эта модель рассматривается на примере СППС, для которых установлено, что зависимость интенсивности отказов от условий работы может быть в общем виде представлена полиномом n -й степени:

$$\lambda(x) = \lambda_{0y} + a_0x + b_0x^2 + c_0x^3 + d_0x^4 + \dots \quad (1)$$

где: $\lambda(x)$ – интенсивность отказов при данном значении влияющего фактора x ; $\lambda(0)$ – интенсивность отказов при работе в номинальном режиме по фактору x (при этом номинальное значение фактора принимается за нулевое); $a(0)$, $b(0)$ и последующие коэффициенты определяются по экспериментальным данным.

В большинстве случаев на практике ограничиваются полиномом второй степени.

Вполне очевидно, что подобная модель, универсальность которой подтверждена на больших группах разнородных элементов отображает не какую-то фундаментальную физическую закономерность, а возможность полиномов такого вида хорошо аппроксимировать монотонные возрастающие зависимости. Можно предполагать, что, используя эти возможности, легко найти такой вариант полинома, который бы аппроксимировал расчет и экспериментальные данные лучше, чем любая другая формула, предложенная эрозиоведами для расчета интенсивности отказов или разрушения тех или иных СППС не только в зависимости от действия дестабилизирующих факторов, но и в зависимости от времени. Однако удовлетворительного обоснования такого рода формализации, как правило, найти не удастся, и если они вполне удовлетворяют прагматические потребности специалиста по надежности, то эрозиоведу они приносят мало пользы.

Возможности полинома вида (1) используются и в принципиально иной модели ускоренного определения (или, скорее, прогнозирования) времени возникновения отказа – в нормальных условиях эксплуатации.

При этом используются усеченные пределы изменений определяющего параметра y при наблюдении параметрических отказов, т.е. уменьшается допуск на контролируемый выходной параметр, – если сооружение достигло усеченной границы раньше некоторого установленного момента времени, то можно ожидать возникновения параметрического отказа раньше некоторого другого момента времени, который полагается минимально допустимым для безотказной работы сооружения.

Суть модели, рассматриваемая на примере полинома вида (1), сводится к следующему. Допустим, что непрерывное изменение параметра y во времени описывается полиномом:

$$y = y_0 + a_0t + b_0t^2 + c_0t^3 + d_0t^4 + \dots$$

$$\Delta y = y - y_0 = a_0t + b_0t^2 + c_0t^3 + d_0t^4 + \dots$$

Если Δy_g – максимально допустимое изменение параметра « y », при котором возникает параметрический отказ, то можно найти среднее время t , при котором отклонение достигает значения Δy_g .

Обозначая $\Delta y_g/a_0 = z$, получим ряд:

$$Z = t + \left(\frac{b_0}{a_0}\right)t^2 + \left(\frac{c_0}{a_0}\right)t^3 + \left(\frac{d_0}{a_0}\right)t^4 + \dots$$

или, при сокращении записи:

$$Z = t + bt^2 + ct^3 + dt^4 + \dots$$

Воспользовавшись правилом обращения степенного ряда, получаем:

$$t = Z - bZ^2 + (2b^2 - c)Z^3 + (5bc - d - 5b^2)Z^4 + \dots \quad (2)$$

Далее принимается коэффициент ускорения испытаний K_y равный отношению времени t , которое было бы необходимо для недопустимого изменения Δy_g параметра y ко времени t_y , в течение которого параметр y достигнет изменения $\Delta y_g/K_y$:

$$K_y = \frac{t}{t_y}$$

Теперь отношение $\Delta y_g/K_y a_0 = z_y$, и полученный обращенный полином (2) приобретает вид:

$$t_y = Z_y - bZ_y^2 + (2b^2 - c)x_y^3 + (5bc - d - 5b^2)Z_y^4 + \dots \quad (3)$$

Полученное в результате ускоренных испытаний время t_y позволяет определить действительное время отказа $t = K_y t_y$ при граничном значении Δy_g .

Возможность применения этой высокоэффективной модели в практическом эрозиоведении ограничивается отсутствием определяющего параметра y , которым можно было бы воспользоваться. При наличии n независимых параметров, каждый из которых определяет функциональные изменения СПМ в одном из n направлений, ведущих к некоторым границам допустимого состояния, рассмотренная модель могла бы быть применена n раз, и минимальное из полученных значений t определяло бы ожидаемую продолжительность её последующей эксплуатации, однако полноценного обоснованного набора таких параметров в распоряжении эрозиоведов по опубликованным данным пока ещё нет.

Условия, в которых работают, например, СППС, учитываются во многих моделях, основанных на теории случайных функций [7, 8]. Как и в других моделях надежности, здесь предполагается зависимость скорости изнашивания от двух групп независимых факторов, а именно, в данном случае от характеристик качества сооружений и характеристик режима работы. Нетрудно провести формальную аналогию между этими факторами и условиями окружающей среды, оказывающими модифицирующее воздействие на конкретную эксплуатацию сооружения.

При изменяющемся неслучайном внешнем воздействии скорость изнашивания можно рассматривать

как случайную функцию нагрузки $B(x)$. Однотипные изделия дают близкие по форме кривые $b(x)$ зависимости скорости износа b от нагрузки x . Поэтому можно предположить, что $B(x)$ имеет характерные, специфические реализации $b(x)$, т.е. является полуслучайной функцией. При этом обычно ограничиваются случаем рассмотрения одной какой-либо нагрузки, которая превалирует над остальными, причем скорость изнашивания будет полуслучайной функцией этой случайной нагрузки x .

Случайная нагрузка x может быть представлена в виде суммы стандартной неслучайной нагрузки x_0 и случайной составляющей Δx :

$$x = x_0 + \Delta x$$

В простейшем случае, в пределах которого всегда стараются оставаться, если это допустимо, возможные реализации случайной функции $B(x)$ ограничиваются линейными уравнениями. Пели руководствоваться этим ограничением, то, разложив реализацию случайной функции $b = \zeta(x)$ в ряд Тейлора в окрестностях стандартной нагрузки x_0 и сохранив в разложении первые два члена, получим:

$$b = b_0 + u\Delta x, \quad (4)$$

где: $u = \left(\frac{d\zeta}{dx}\right)_{x=x_0}$ – чувствительность скорости износа

данного конкретного сооружения к нагрузке при $x = x_0$; b_0 – скорость изменения определяющего параметра при $x = x_0$:

Если иметь в виду случайную функцию в целом, то аналогично:

$$B = B_0 + U\Delta X. \quad (5)$$

Из этого уравнения следует, что случайную величину скорости износа B мы полагаем зависящей от случайных величин B_0 и U , которые не зависят от нагрузки x .

Случайная величина U характеризует среднее по нагрузке изменение скорости износа или разрегулирования при единичном отклонении нагрузки от стандартного значения.

При практических исследованиях износа СППС обычно достаточно знать математическое ожидание m_b и дисперсию D_b скорости изнашивания или разрегулирования. Формулы для их определения можно получить, применив к выражению (5) теоремы о числовых характеристиках случайных величин:

$$m_b = m_{b_0} + m_u m_{\Delta x}, \quad (6)$$

$$D_b = D_{b_0} + (D_x + m_{\Delta x}^2)D_u + m_u^2 D_x + 2m_{\Delta x} k_{bou}. \quad (7)$$

В этих формулах:

m_b и D_b – математическое ожидание и дисперсия скорости изнашивания при стандартной определяющей нагрузке x_0 ;

m_u и D_u – математическое ожидание и дисперсия изменения скорости изнашивания при единичном изменении нагрузки;

K_{b0u} – момент связи между скоростью изменения определяющего параметра при $x = x_0$ и чувствительностью случайной функции к изменению нагрузки также при $x = x_0$;

$D_{\Delta x}$ и $D_{\Delta x}$ – математическое ожидание и дисперсия отклонения нагрузки от ее стандартной величины x_0 .

Числовые характеристики случайных величин B_0 и U находят по экспериментальным данным, но соответствующие эксперименты отнюдь не пассивны. Прежде всего, необходимо эти величины задать из технико-экономических соображений. Затем путем кропотливой конструкторской и технологической подгонки добиться того, чтобы у проектируемого сооружения при стандартной нагрузке эти величины были близки к заданным у небольшой группы изделий, а уже затем на основании достаточно достоверной статистики определить эти параметры у разработанного вида сооружений в большом объеме.

Если зависимости $b(x)$ существенно нелинейны, то иногда целесообразно их аппроксимировать квадратными трехчленами, причем, как показывает технический опыт, в каждой конкретной задаче можно из физических соображений ввести упрощающие предположения. При этом формулы для вычисления m_b и D_b могут быть получены аналогично случаю линейной зависимости $b(x)$, однако в общем виде эти формулы выглядят громоздкими, в особенности, если зависимость $b(x)$ представляет собой не какую-либо стандартную функцию типа экспоненты, параболы и т. п., а композицию зависимостей или эмпирически полученное выражение.

При полевых испытаниях, как правило, условия работы всех исследуемых объектов практически одинаковы. Таковыми же они должны быть и в тех случаях, когда проектировщик получает задание разработать сооружение к работе в исключительно узком и специфичном диапазоне условий, например, для работы на крутых склонах, на склонах с оползневыми процессами и т.д. В этих случаях формулы для вычисления числовых характеристик износа существенно упрощаются, поскольку дисперсия и моменты связи нагрузок равны нулю.

Этот подход к изучению динамики надежности СППС на основе сведений об износе под действием скалярной случайной нагрузки легко распространить на общий случай векторной случайной нагрузки. При этом скорость изнашивания или разрегулирования какого-либо будет векторной полуслучайной функцией вектора нагрузки:

Т. Б. АГАЕВ
РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ
СИСТЕМ ПОЧВОЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ,
УЧИТЫВАЮЩИХ УСЛОВИЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ
И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

$$B = \Phi(x_1, \dots, x_n), \quad (8)$$

где: x_1, \dots, x_n – величины отдельных видов нагрузки.

Каждую из составляющих нагрузки можно полагать состоящей из стандартной неслучайной нагрузки и случайного отклонения от стандартного значения. Так как стандартная нагрузка обычно примерно соответствует той, при которой эксплуатируется объект, то отклонения составляющих нагрузки от стандартных значений обычно сравнительно невелики. Поэтому точную зависимость, записанную в общем виде формулой (8) можно аппроксимировать приближенной зависимостью:

$$B \approx B_0 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\zeta \Phi}{\zeta x_i} \right)_{x_{0i}} \Delta x_i, \quad (9)$$

где: B_0 – скорость изнашивания при стандартных условиях, когда все составляющие нагрузки $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}$ являются неслучайными стандартными; Δx_i – значение отклонения i -ой составляющей нагрузки от стандартного значения x_{0i} .

Значения частных производных в (9) являются случайными величинами, не зависящими от Δx_i . Обозначив:

$$\left(\frac{\zeta \Phi}{\zeta x_i} \right)_{x_{0i}} = U_i,$$

где U_i – чувствительность скорости износа к изменению i -ой составляющей нагрузки при ее стандартном значении, получим измененную формулу (10):

$$B \approx B_0 + \sum_{i=1}^n U_i \Delta x_i. \quad (10)$$

Для того чтобы содержательно раскрыть формулу (10), необходимо получить формулы для математического ожидания и дисперсии скорости изнашивания. Эти формулы аналогичны формулам (9) и (7) причем векторы математического ожидания и дисперсии составляют соответственно суммы векторов математического ожидания и дисперсии по каждому из видов нагрузки.

В очень большом объеме номенклатуры элементов СПМ и сооружений рассмотренный метод применим в его скалярном варианте: имеется некоторый определяющий параметр, закономерности изменения которого можно отслеживать и на основании этого отслеживания судить об изменении надежности на протяжении всего интересующего нас промежутка времени. В векторном варианте метод охватывает практически всю номенклатуру промышленной продукции, поскольку для любого ее вида имеется ограниченное количество параметров, регламентированных стандартами или техническими условиями.

Развивая метод в его скалярном варианте, полагая изменения всех контролируемых параметров

независимыми друг от друга и допуская, что каждый параметр непосредственно связан с определенной причиной разрушения сооружения, можно было бы получить довольно громоздкий аппарат для определения вероятности эксплуатации сооружения до окончания её срока, однако, к сожалению, в настоящее время нет такого набора параметров, каждый из которых однозначно определял бы определенную причину разрушения сооружения.

В векторном варианте метод, разумеется, более перспективен. Нас уже не волнует зависимость параметров друг от друга, а набор параметров по их численности может быть любым. Важно только, чтобы параметры были подобраны таким образом, чтобы изменение каждого из них отражало износ определенного элемента, системы или группы, а определенная степень износа однозначно соответствовала наступлению разрушения элемента. Выбор и обоснование таких параметров – трудная задача.

Для применения метода, по-видимому, нужно выбрать не менее 35–40 параметров, охватывающих все основные причины разрушения сооружений.

Чрезвычайно распространенным и постоянно применяемым в технике понятием является «запас прочности» (при сжатии, растяжении, изгибе, ударной нагрузке, воздействии факторов внешней среды и т.п.). Запас прочности стараются иметь по возможности достаточно высоким, что объясняется двумя причинами: во-первых, надо обезопасить сооружения от редких, но возможных «всплесков» дестабилизирующих воздействий: во-вторых, запас прочности в процессе эксплуатации постепенно снижается, и поэтому, чем больше первоначальный запас прочности, тем долговечнее сооружение. Запас прочности определяется относительно номинальных значений нагрузки и дестабилизирующих факторов и очень часто нормируется в стандарте на сооружение. При этом для эксплуататора идеальным является вариант, когда по истечении срока морального износа сооружения его запас прочности продолжает оставаться значительно больше 1 (это обеспечивает достаточно малую вероятность выхода из строя за время эксплуатации).

Запасы прочности относительно всех видов воздействий имеют распределения, чаще всего близкие к нормальным, вследствие чего однотипные сооружения отличаются друг от друга по долговечности, а распределения характеризуются каждое двумя параметрами – средним значением и дисперсией. Дисперсию каждого распределения обычно полагают неизменной, а среднее значение с течением времени перемещается в сторону уменьшения. Для упрощения это перемещение среднего можно считать дискретным, происходящим в каждую принятую единицу времени.

Тогда каждая единица времени в течение срока службы совокупности сооружений характеризуется

определенными распределениями максимально допустимой (предельной) нагрузки и максимально допустимых деструктивных воздействий (каждое из распределений строится при номинальных величинах всех прочих факторов).

Каждому полученному распределению максимально допустимых параметров ставится в соответствие другое распределение – реально наблюдавшихся в течение данной единицы времени значений параметра (нагрузки или дестабилизирующего фактора окружающей среды). Таким образом, на одном графике оказываются два распределения, в той или иной мере накладывающихся друг на друга.

В работе Капура и Ламбертсона [8] рассматриваются различные варианты модели для определения надежности деталей, испытывающих механическую нагрузку в виде напряжения. Плотность распределения $f(S_1)$ напряжений S_1 в течение некоторой единицы времени (на протяжении всего времени исследования полагается неизменной по всем параметрам распределения. В то же время прочность S_2 (имеющая ту же размерность, что и напряжение), характеризующаяся для данной совокупности изделий плотностью $f(S_2)$, уменьшается с течением времени. Это уменьшение проявляется снижением средней величины $\mu(S_2)$:

$$\mu(S_2) = \mu^0(S_2) - \psi(t), \quad (11)$$

где: $\mu^0(S_2)$ – средняя прочность в нулевой момент времени (т.е. в начале эксплуатации); $\psi(t)$ – некоторая функция снижения средней прочности от времени работы.

Вероятность Q безотказной работы за некоторую фиксированную единицу времени соответствует области плотностей распределений $f(S_1)$ и $f(S_2)$:

$$Q\{S_2 > S_1\} = P\{S_2 - S_1 > 0\}, \quad (12)$$

где $P\{S_2 > S_1\}$ – вероятность того, что прочность превышает напряжение.

Вероятность того, что некоторое значение напряжения находится в небольшом интервале dS_1 , равна:

$$P\left\{S_1^0 - \frac{dS_1}{2} \leq S_1 \leq S_1^0 + \frac{dS_1}{2}\right\} = f(S_1^0)dS_1, \quad (13)$$

где: S_1^0 – значение напряжения в середине интервала dS_1 .

Вероятность того, что прочность S_2 превышает значение напряжения S_1^0 , задается выражением:

$$P\{S_2 > S_1^0\} = \int_{S_1^0}^{\infty} f(S_2)dS_2, \quad (14)$$

Вероятность того, что значение напряжения заключено в малом интервале dS_1 , а прочность S_2 превышает напряжение, определяется как произведение:

$$f(S_1^0)dS = \int_{S_1^0}^{\infty} f(S_2)dS_2, \quad (15)$$

На всем диапазоне распределений прочности и напряжения для некоторого момента времени t вероятность безотказной работы Q_t составит:

$$Q = \int_0^{\infty} f(S_1^0) \left[\int_0^{\infty} f(S_2)dS_2 \right] dS_1. \quad (16)$$

Эта формула относится к некоторому элементарному промежутку времени. Естественно, что вероятность безотказной работы по мере увеличения срока эксплуатации убывает, и время является той переменной, по которой следует ещё раз провести интегрирование.

В развитие этой статической модели мы предлагаем следующий динамический подход. Для того, чтобы некоторый объект мог выйти из строя в интервале $(t, t+dt)$, он должен работать безотказно в период $(0, t)$. Согласно правилу умножения вероятностей, вероятность выхода объекта из строя в интервале $(t, t+dt)$ составляет:

$$q(t, t+dt) = f(t)dt = Q(t)z, \quad (17)$$

где: $Q(t)$ – вероятность безотказной работы в интервале времени $(0, t)$; z – условная вероятность выхода объекта из строя за время $(t, t+dt)$ при условии, что в интервале $(0, t)$ отказа не было.

Величина z выражается через интенсивность потока отказов $\lambda(t)$:

$$z = \lambda(t)dt. \quad (18)$$

При использовании $\lambda(t)$ рассматриваются лишь объекты, остающиеся годными к моменту t , а вышедшие из строя исключаются из рассмотрения. Это означает, что $Q_t = \lambda(t)$. В то же время, как было установлено при рассмотрении общих принципов оценки надежности:

$$M(t) = \frac{dP(t)}{P(t)dt}, \quad (19)$$

где: $P(t)$ – вероятность безотказной работы за период $(0, t)$.

Решение уравнения (19) дает фундаментальную функцию надежности:

$$p(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(t)dt\right\} = \exp\left\{-\int_0^t Q_t dt\right\}, \quad (19a)$$

где: Q_t – функция, заданная уравнением (16) в котором распределение $f(S_2)$ характеризуется уменьшением среднего значения прочности с течением времени.

В частности, при нормальном распределении прочности плотность распределения $f(S_2)$ в каждый момент времени t равна:

$$f_1(S_2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[S_2 - \mu_0(S_2) + \psi(t)]^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (20)$$

В этой формуле от времени зависит только составляющая $\psi(t)$. Она-то и определяет динамику снижения долговечности изделия.

В наибольшей мере обычно подтверждается предположение о том, что скорость снижения прочности увеличивается с уменьшением прочности (поскольку нагрузка перераспределяется на элементы СПМ, еще не затронутые возникшими дефектами):

$$\frac{d\psi(t)}{dt} = k\psi(t). \quad (21)$$

Применительно к различным сооружениям рассмотренная модель обладает существенным недостатком: она дает возможность рассматривать вероятность разрушения только под воздействием одного фактора внешней среды. Для того, чтобы преодолеть этот недостаток, приходится либо многократно применять модель в отношении каждого из воздействующих факторов в отдельности с последующим перемножением вероятностей того, что ни один из этих факторов не окажет на сооружение разрушающего воздействия, либо усложнить модель и рассматривать факторы воздействия в совокупности, а способность сооружения к адаптации оценивать, исходя из пространства допустимых для него параметров.

Первая из этих возможностей требует весьма сомнительного допущения, что факторы воздействуют на сооружение независимо друг от друга. Вторая возможность требует для своей реализации большой предварительной работы, прежде всего по формированию пространства допустимых состояний к обоснованию его размерности.

Таким образом, были рассмотрены некоторые применяемые в теории надежности математические модели, которые имеют определённую перспективу, позволяют придать им адекватное эрозионное обеспечение и обозначить рамки их применения в прикладном эрозиоведении.

ЛИТЕРАТУРА

1. АГАЕВ Т.Б., ГАБИБОВ Ф.Г. Разработка методики расчёта склоновых гидротехнических противоэрозионных сооружений на сочетание нагрузок. Тр. АзНИИСА «Новые достижения в строительстве, наук и архитектуре», Баку, 1994.
2. АГАЕВ Т.Б. Эрозиоведение и математическая статистика, М.: «РОМА», 1999.
3. АГАЕВ Т.Б. О некоторых недостатках в современном эрозиоведении. М.: Мелиоинформ НП журнал «Вопросы мелиорации, 2004, № 5–6.
4. АГАЕВ Т.Б. Современное эрозиоведение: понятия, состояние, развитие. Сб. научн. трудов Моск. рег. отд. РАЕН «Экологические проблемы регионального мониторинга окружающей среды», 2006.
5. БЕССОНОВ А.А. Прогнозирование характеристик надёжности автоматических систем. Л.: «Энергия»,

- 1970.
6. **ГАСКАРОВ Д.В. и др.** Прогнозирование технического состояния и надёжности радиоэлектронной аппаратуры. М.: «Советское радио», 1974.
 7. **ДРУЖИНИН Г.В.** Надёжность автоматизированных систем, М.: «Энергия», 1967.
 8. **ДРУЖИНИН Г.В.** Надёжность автоматизированных производственных систем, М.: «Энергоатомиздат», 1986.
 9. **ИБАДЗАДЕ Ю.А., АГАЕВ Т.Б., ГАБИБОВ Ф.Г.** Некоторые аспекты использования методов теории надёжности технических систем в современном эрозиоведении// В журн. «Вестник с/х науки», Баку, 1990, № 6.
 10. **ИБАДЗАДЕ Ю.А., АГАЕВ Т.Б.** Разработка противоэрозионных мероприятий на основе методов теории надёжности технических систем. М.: ЦБНТИ, «Мелиорация и водное хозяйство», 1991, Вып. 6.
 11. **КАПУР К., ЛАМБЕРСОН Л.** Надёжность и проектирование систем. М.: «Мир», 1980.
 12. **ПЕРРОТЕ А.И. и др.** Основы ускоренных испытаний радиоэлементов на надёжность. М.: Советское радио», 1968.
 13. **СОТСКОВ Б.С.** Основы теории и расчёта надёжности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. М.: «Высшая школа», 1970.
 14. **BURNET T.L.** Truncation of Sequential Life Tests/ Proc. 8-th at Sump. On Reliability and Quality Control in Electronics, N-V, 1962.

Агаев Тамерлан Балаевич,
д.т.н., президент Международной академии экологии и природопользования (МНАЭП)

☎ 105064, г. Москва, ул. Казакова, д. 15, офис 25,
тел.: +7 (499) 131-97-89