

**П.Б. Рапопорт, к.т.н., доцент,
Ю.Э. Васильев, к.т.н., доцент
А.В. Кочетков, д.т.н., профессор,
Н.Е. Кокодева, к.т.н., доцент**

Уроки прогнозирования

Во всех странах к числу важных прикладных проблем относят обеспечение срока службы автомобильных дорог. В технической литературе достаточно широко представлены многочисленные случаи преждевременного разрушения по разнообразным причинам сооружений, построенных в течение последних 30–35 лет [1, 2, 7, 8], в том числе и дорог. Особенно остро проявляются эти проблемы при эксплуатации инженерных сооружений.

Анализ публикаций, проведенный за период 1965–2005 гг., показал, что все большая их часть затрагивает в той или иной степени вопросы срока службы (долговечности). Обеспечение капитальных долговременных сооружений (тоннелей, мостов, различного типа подземных сооружений, метрополитенов, покрытий автомобильных дорог и т.п.) стало основной проблемой, решаемой при проектировании и строительстве [9, 10].

Имеющую место тенденцию снижения долговечности автомобильных дорог трудно объяснить одними только производственными и эксплуатационными дефектами. Авторы полагают, что причину следует искать в недостатках самой концепции проектирования и недостаточной изученности процессов деградации материалов в эксплуатируемых сооружениях.

Объяснять многочисленные случаи преждевременного разрушения и выхода из строя автомобильных дорог задолго до истечения проектного срока их службы несоблюдением существующих требований, направленных на обеспечение долговечности при проектировании, строительстве и эксплуатации, не вполне корректно. Чаще всего они определяются несовершенством этих требований и недостаточной изученностью проблемы долговечности автомобильных дорог.

Условия, обеспечивающие надежность и долговечность дорожных конструкций определялись более 30 лет назад для условий европейской части второй и третьей дорожно-климатических зон. Именно в этих зонах были первоначально организованы посты и станции для наблюдений за водно-температурным режимом земляного полотна и проводились систематические обследования дорог силами, главным образом, СоюздорНИИ (его Ленинградского филиала), а также МАДИ и ХАДИ.

Позже стали проводиться подобные исследования в других регионах страны – в зоне вечной мерзлоты, в Сибири, на Дальнем Востоке в условиях засушливой зоны в Казахстане и Средней Азии. Широким кругом дорожных строительных организации, кафедр и других научных коллективов все эти исследования велись, по существу, на единой теоретической основе. Все они предусматривали: организацию долговременных наблюдений на постах и станциях; проведение систематического обследования дорог с целью выяснения фак-

тического характера их работы; обработку, обобщение и систематизацию получаемых результатов обследования; сопоставление полученных данных с результатами теоретических расчетов; обоснование эмпирических коэффициентов, уточняющих методику расчетов. Опыт, практические данные, корректировка на их основе теоретических положений в течение всех предшествующих лет были основой совершенствования норм.

В результате в теоретические зависимости вводились эмпирические коэффициенты, обеспечивающие приближение результатов расчетов к реальным условиям работы дорожной одежды (например – коэффициент, учитывающий различие в реальном и лабораторном режимах растяжения повторной нагрузкой, а также вероятность совпадения во времени расчетной (низкой) температуры покрытия и расчетного состояния грунта рабочего слоя по влажности). Величины эмпирических коэффициентов колеблются в довольно широком интервале и достигают больших значений. Большие значения и многочисленность эмпирических коэффициентов определяют степень нашего незнания о реальных условиях работы конструкций и доказывают, что существующие методы расчета недостаточно корректно отражают работу дорожной одежды в составе конструкции реальной дороги.

Необходимо отметить, что значения используемых эмпирических коэффициентов получены на основе анализа и изменения состояния дорожных одежд в процессе эксплуатации реальных автомобильных дорог, существовавших на момент обследования, т.е. построенных до 1980 г. Общеизвестно, что нормы, созданные на основе практических данных, эффективны только в тех условиях, для которых они создавались. Со времени разработки действующих норм, изменились: требования к автомобильной дороге; состав транспортных потоков, виды транспортных средств, нагрузки; материалы, из которых изготавливаются дорожные одежды; свойства традиционных материалов, непосредственно в конструктивных слоях; технологии и способы строительства дорожных одежд. Возможно, этим объясняется наблюдаемые на практике многочисленные случаи преждевременного разрушения автомобильных дорог во всех климатических зонах.

Конструкции современных дорожных одежд, рассчитанные по устаревшей методике, не выдерживают новых нагрузок. Во многих случаях не учитываются климатические условия регионов, которые также изменились, а в отдельных случаях и недостаточно исследованы. В связи с этим неоднократно делались и делаются попытки пересмотра или дополнения существующих методик расчета дорожных одежд, в них вводятся соответствующие коррективы, но они все равно не поспевают за постоянно прогрессирующими возможностями промышленности, техники и т.д.

Обновление норм требует больших, финансовых, материальных и интеллектуальных затрат, привлечения многочисленных научных коллективов, в том числе и для организации систематических повсеместных наблюдений за состоянием дорожных одежд автомобильных дорог различных технических категорий в различных дорожно-климатических зонах с последующей обработкой и систематизацией получаемых данных.

В связи с этим разработка метода прогнозирования долговечности автомобильных дорог, то есть способа исследования, направленного на разработку конкретного прогноза, представляется актуальной.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условия его применения может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания их свойств. Все показатели надежности являются функциями времени: безотказность — время работы до момента наступления отказа; ремонтпригодность — время, которое затрачивается на предупреждение отказа и устранение его последствий; долговечность — время до наступления предельного состояния; сохраняемость — время сохранения работоспособного состояния объекта, выключенного из эксплуатации.

В ГОСТ Р 51898-2002 Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты (разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 10 «Основополагающие общетехнические стандарты. Оценка эффективности и управление рисками», принят Постановлением Госстандарта России от 5 июня 2002 г. № 228-ст.) рассматриваются аспекты безопасности: предназначенное использование; возможное предсказуемое неправильное использование; способность к действию при ожидаемых условиях использования; совместимость с окружающей средой; эргономические факторы; безотказность; ремонтпригодность и удобство обслуживания; долговечность; возможность утилизации; специальные потребности пользователей продукции, процесса или услуги, например детей, пожилых людей, групп людей с ограниченными возможностями. Следует подчеркнуть, что вопросы ремонтпригодности и долговечности стандартом рассматриваются как аспекты безопасности.

Под долговечностью в настоящее время принято понимать свойство объекта сохранять свою работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и регламентов. За предельное состояние объекта принимается состояние, при котором дальнейшая эксплуатация

должна быть прекращена по причинам: безопасности, снижения эффективности эксплуатации, необходимости проведения капитального ремонта.

Прогноз — это научно обоснованное суждение о возможных состояниях объекта или системы в будущем и (или) об альтернативных путях и сроках наступления этих состояний. Изменение состояния автомобильной дороги происходит в результате внешних воздействий на фоне внутренних процессов, происходящих в конструктивных слоях дороги. Прогнозирование включает в себя оценку изменения состояний дороги во времени на прогнозном фоне. Прогнозный фон — это совокупность внешних по отношению к объекту прогнозирования условий, существенных для решения задачи прогноза.

Внешнее возмущающее воздействие — это эксплуатационная среда, действие которой наряду с силовым воздействием может сопровождаться изменением гидрогеологических условий и температурно-влажностного режима и солнечной радиации среды. Результат внешнего воздействия в значительной степени зависит от теплопереноса, температурно-влажностных деформаций материалов, составляющих конструктивные слои, и степени дефектности автомобильных дорог. Изменения структуры и свойств материалов конструктивных слоев приводят к перераспределению напряжений в составляющих конструктивных слоев и к появлению и развитию дефектов.

Изменения структуры, связанные с внутренними физико-химическими процессами — это результаты продолжающейся гидратации цементов, окисления битума, изменения гранулометрического состава компонентов конструктивных слоев, перераспределения напряжений в составляющих конструктивных слоев, связанное с различиями и изменениями во времени деформативных характеристик компонентов состава, появления и «самозалечивания» дефектов структуры и т.д. Интенсивность протекания внутренних процессов зависит от внешних воздействий. Последствия внешних воздействий зависят также и от степени дефектности структуры конструктивных слоев к началу этих воздействий. Многочисленность видов дефектов и дифференциация их по степени развития делает задачу описания состояния автомобильной дороги в целом достаточно сложной задачей.

Развитие дефектов во времени определяется, помимо прочего, и технологией изготовления (строительства), степенью начальной дефектности и прошлым («предысторией») отдельных конструктивных слоев и дороги в целом. Все это позволяет отнести автомобильную дорогу к сложным динамическим системам.

Применительно к дорогам складывается классическая ситуация, когда малые причины могут иметь большие последствия (наличие небольшой по размеру выбоины или трещины может привести к провалам или проломам в дорожной одежде, отсутствие расклинки на локальном участке приводит к расстройству всего щебеночного слоя и т.д.). Математики называют это свойство чувствительностью к начальным данным. То, что чувствительность объекта прогнозирования, как сложной системы, к на-

чальным данным ведет к хаосу, понял в 1963 г. американский метеоролог Э.Лоренц. Компьютерный анализ, осуществленный им, привел к принципиальному результату: динамический хаос, то есть непериодическое движение в детерминированных системах, где будущее однозначно определяется прошлым, имеет конечный горизонт прогноза, то есть прогнозирование долговечности автомобильных дорог в принципе возможно.

Выделение из многообразного прогнозного фона какого-либо воздействия в качестве доминирующей причины исчерпания долговечности, как и выделение одного из потребительских свойств автомобильной дороги в качестве определяющего дает частное решение задачи, которое работает далеко не всегда. Анализ существующих методов оценки или прогнозирования долговечности выявил нецелесообразность раздельного (фрагментарного) рассмотрения внутренних и внешних воздействий.

Так как объект целесообразно рассматривать одновременно с «прогноznым фоном», то, в соответствии с принятой терминологией, он представляется как «объект прогнозирования». Далее используется принцип системности, требующий взаимоувязанности и соподчиненности прогнозов объекта прогнозирования и прогнозного фона и их элементов.

Детерминированное прогнозирование, в основе которого лежит игнорирование статистической неоднородности среды и свойств материала, для прогнозирования состояния автомобильной дороги, по-видимому, неприемлемо. Перспективно статистическое прогнозирование, основанное на предположении о вероятностном характере изучаемых процессов.

В связи с тем, что показатели эксплуатационного качества относятся к стохастическим величинам, их следует оценивать вероятностно-статистическими методами. Наиболее распространенной оценкой изменчивости показателей являются среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации. Профессором В.А. Семеновым в результате проведенных исследований, получены значения коэффициентов вариации параметров [3], при которых обеспечиваются различные уровни качества дорожных одежд. В дальнейшем эти данные использовались в разработанной профессором В.В. Столяровым теории риска [4], позволяющей количественно оценивать состояние дорожных одежд на любой период времени по следующим показателям: по риску разрушения дорожных одежд; по фактическому сроку службы дорожных одежд; по риску пластических сдвигов в малосвязных слоях одежд; по риску нарушения сплошности в монолитных слоях при изгибе.

Риск (темп) разрушения дорожной одежды во времени является качественной инженерной характеристикой конструкции и, в соответствии с теорией вероятности, определяется выражением

$$r_t = S_p / S_o \quad (1)$$

где S_p — площадь разрушенной части конструкции на участке дороги за период времени t , м²; S_o — общая площадь конструкции дороги на участке, м².

Период времени, соответствующий допустимому риску разрушения, является фактическим сроком службы

дорожных покрытий до капитального ремонта. Прогноз фактического срока службы (t_ϕ) до начала работ по усилению дорожной одежды нежесткого типа выполняется с использованием данных детального обследования прочности конструкции и заключается в следующем:

1) В соответствии с ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд» устанавливается допустимый уровень надежности дорожной одежды (K_H).

2) Определяется допустимая вероятность разрушения дорожной одежды (r) за срок ее эксплуатации по зависимости $r_{дон} = 1 - K_H$.

Устанавливается фактический срок службы дорожной одежды по методике, представленной в работах [4,5,6]. Если в какой-либо год (t) величина r_t достигла допустимую вероятность разрушения $r_{дон}$, то данный период t будет являться фактическим сроком службы (t_ϕ). В противном случае, расчет необходимо продолжить.

Для прогноза разрушения дорожной одежды и фактического срока службы теоретико-экспериментальным путем получена формула изменения эквивалентного модуля упругости во времени:

$$E_{ЭТ(t)} = E_{ЭТ} \left(1 - \frac{C_V^{ЭТ}}{C_{V(t)}^{ЭТ}} \cdot \gamma \cdot t \right) \quad (2)$$

где $E_{ЭТ}$ — приведенное к расчетной температуре среднее значение эквивалентного модуля упругости на участке обследования и установленное методами математической статистики, МПа; $C_V^{ЭТ}$ — коэффициент вариации приведенного к расчетной температуре эквивалентного модуля упругости на момент обследования; $C_{V(t)}^{ЭТ}$ — коэффициент вариации приведенного к расчетной температуре эквивалентного модуля упругости в t -м году; γ — коэффициент, учитывающий снижение однородности эквивалентного модуля упругости во времени, 1/годы; t — период времени, спустя который эквивалентный модуль упругости принимает значение $E_{ЭТ(t)}$, годы.

Известные методы статистического прогнозирования — экспоненциальное сглаживание и авторегрессионные схемы — не могут в нашем случае использоваться в полном объеме, так как, несмотря на их эффективность, они требуют предварительных длительных систематических наблюдений на каждом объекте. При использовании этих методов необходимо, чтобы время прогнозирования было мало по сравнению со временем предварительного изучения процесса. Предпочтительным является поисковый или исследовательский прогноз, то есть прогноз, содержанием которого является определение возможных состояний объекта прогнозирования в будущем.

Возможность создания подобной методики основана на использовании ряда положений теории хаоса и катастроф. Принципы построения подобных систем могут быть поняты исходя из положений нелинейной, неравновесной термодинамики; теории открытых диссипативных и интерактивных систем, то есть систем, управляемых положительными обратными связями и состоящих из большого числа взаимодействующих subsystem (созданных лауреатом Нобелевской премии И.Р. Пригожиным); теории бифуркаций, дифферен-

цируемых на обратимые (равновесные) и необратимые (неравновесные) [11-14]. Системами, управляемыми положительными обратными связями и состоящими из большого числа взаимодействующих subsystemов и являются любые сложные технические системы, в том числе автомобильные дороги. До работ И.Р. Пригожина полагали, что развитие и диагностику любых систем можно исследовать, исходя из оценки влияния составляющих элементов и внешних воздействий. Предполагалось, что динамика систем адекватно описывается равновесными состояниями, возмущаемыми внешними силами, а изменения выходных параметров систем пропорциональны этим возмущениям. Однако эксперименты и результаты диагностики состояний реальных автомобильных дорог показали, что достаточная для практики точность не достигается.

В нашем случае методики определения отдельных свойств дорожно-строительных материалов не отработаны (определение нормативных, расчетных и кратковременных модулей упругости материалов, содержащих органическое вяжущее; дисперсных материалов; прочность материала монолитного слоя при многократном растяжении при изгибе; нормативное значение предельного сопротивления растяжению при изгибе при расчетной низкой весенней температуре при однократном приложении нагрузки; коэффициентов, учитывающих снижение прочности вследствие усталостных явлений при многократном приложении нагрузки, учитывающих снижение прочности во времени от воздействия погодных-климатических факторов), не обеспечивают воспроизводимости, заданной точности, а в отдельных случаях отсутствуют. Условия испытаний, как правило, отличаются от условий, в которых материалы служат в условиях реальной эксплуатации.

Результаты, полученные во время лабораторных исследований, отличаются от истинных значений, характеризующих изучаемое свойство материала. Это является следствием того, что порядок изготовления и испытания образцов отличается от норм, установленных ГОСТом; сказываются погрешности испытательного оборудования и ошибки самого экспериментатора; немаловажную роль играет изменчивость свойств исходных материалов. Случайные причины невозможно определить заранее, а тем более учесть количественно. В результате влияния случайных факторов полученные значения одного и того же показателя имеют случайный характер. А случайные показатели не могут характеризовать истинные свойства материала. Путем статистической обработки результатов можно установить достаточно близкое к истинному значение изучаемого свойства материала. Обнаруживается картина изменчивости свойства и некоторые его закономерности, что способствует управлению процессом исследования и надлежащего контроля над ним.

В таких системах можно считать, что их развитие идет от менее к более вероятному состоянию. Численную оценку этого явления для закрытых систем дал Больцман, введя в термодинамику понятие энтропии — параметра, значение которого пропорционально логарифму

вероятности состояния системы. Закон роста энтропии в закрытой системе и есть одна из формулировок второго начала термодинамики. Исключения составляют только моменты возникновения малых, маловероятных и кратковременных самопроизвольных флуктуаций в системе.

Обратимость большей части процессов, происходящих в эксплуатируемой автомобильной дороге, не подтверждается практикой их содержания, что делает несостоятельными исходные аксиомы, рассмотренные выше. В принципе автомобильная дорога не является строго закрытой и линейной системой. Использование рассмотренного выше подхода для сложных, открытых и нелинейных систем, в том числе и для автомобильных дорог, обычно приводило к неадекватности расчетных и опытных данных.

Исследования И.Р. Пригожина [11-14] показали, что интерактивные системы никогда не достигают равновесного состояния, эволюционируя от одного метастабильного состояния к другому. Автомобильная дорога представима в виде именно интерактивной системы и характеризуется метастабильными состояниями, сменяющимися друг друга случайным образом. Эти состояния могут самопроизвольно существенно удаляться от равновесного. Возможна также эволюция состояний автомобильной дороги под внешним воздействием на фоне внутренних процессов, вопреки понятию «энтропия» от хаоса к порядку и усложнению структур, вплоть до самопроизвольного «самозалечивания дефектов» и протекания структурообразующих процессов. В процессе своей эволюции они самопроизвольно переходят из-за износа, перегрузок, и т.д. от субкритического к критическому и суперкритическому состоянию, стремясь к катастрофическому разрушению. Для предотвращения подобного исхода используются специальные аварийные и ремонтные (лечебные) системы или содержание и различные ремонты дорог.

На первом этапе (субкритическом) работы сложной технической системы, катастроф либо вовсе не возникает, либо для их возникновения необходимы внешние воздействия, мощность которых сопоставима с энергетикой системы (подобная ситуация может возникнуть при воздействии на дорогу одноразовых нагрузок, превышающих расчетные значения, кратковременного воздействия низких отрицательных (менее -50°C) или повышенных (более 50°C) температур и т.д., в результате чего в материалах конструктивных слоев возникают микро и макродефекты — очаги будущего разрушения). После достижения критического (а тем более суперкритического) состояния мощности воздействий, необходимых для провоцирования катастроф, снижаются на много порядков.

Если «напряжения» в системе становятся сопоставимыми с порогом ее устойчивости, то, поскольку и «напряжения», и уровни порогов флуктуируют, может создаться положение, когда система потеряет устойчивость, и в этот момент (в этой точке фазовой траектории системы) возникает бифуркация, то есть точка расщепления первоначальной траектории системы на

«пучок» виртуальных траекторий. В этих условиях даже незначительное, случайное внешнее воздействие может перевести систему на одну из виртуальных траекторий, которая станет новой, реальной, фазовой траекторией системы. Само воздействие при этом сыграет роль спускового крючка.

Как показал И.Р. Пригожин, подобная бифуркация не обязательно фатальна для системы, поскольку сложная техническая система может попасть на новую траекторию, не ведущую к полной потере устойчивости системы. В этом случае бифуркация является равновесной и обратимой. Однако если в такой системе отсутствует аварийная подсистема, бифуркации будут повторяться, и какая-нибудь из них может стать фатальной, то есть необратимой, после которой произойдет катастрофа и система разрушится. Как очевидно из изложенного, момент катастрофы строго не предсказуем, и сложная техническая система может функционировать надежно, лишь имея в своем составе эффективную аварийную подсистему (систему содержания и ремонта автомобильных дорог), работающую в реальном масштабе времени.

С точки зрения математики, любая динамическая система, что бы она ни моделировала, описывает движение точки в фазовом пространстве.

За последние годы оформилась специальная дисциплина — техническая диагностика, цель которой — оценка состояния различных технических систем по результатам измерения контролируемых параметров. Состояние при этом характеризуется как вектор характеристик системы, который вместе с исходным сигналом (воздействием) определяет ее дальнейшее поведение. Знание состояния позволяет предсказать поведение системы в будущем. Процесс жизнедеятельности системы может быть представлен в виде непрерывного поступательного перемещения во времени от исходного (начального) состояния до конечного (предельного) состояния. Расстояние между состояниями системы (близость состояний) в пространстве признаков может быть измерено любым из известных способов (среднеквадратическое расстояние, евклидово расстояние или косинус угла между векторами в пространстве признаков). Расстояние между состояниями бетона удобнее измерять косинусом угла между векторами:

$$\cos \varphi = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^{(p)} x_i^{(q)}}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i^{(p)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[\sum_{i=1}^n (x_i^{(q)})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

где x_i — координата состояния в n — мерном пространстве признаков, p, q — соответственно индексы принадлежности к состоянию.

$\cos \varphi$ может меняться в определенных пределах (от 0 до ± 1), что делает выбранный способ измерения расстояния более привлекательным. Соответственно φ при этом меняется от 90° до 0° .

Процесс жизнедеятельности системы (автомобильной дороги) представляет собой непрерывное поступательное перемещение во времени от исходного (начального) состояния, при котором расстояние максимально и $\cos \varphi$

$= 1$ (или $\varphi = 0^\circ$), до конечного (предельного) состояния, при котором расстояние минимально и $\cos \varphi = 0$ (или $\varphi = 90^\circ$). Отсутствие каких-либо повреждений соответствует значению $\varphi = 0^\circ$, а достижение предельного состояния — $\varphi = 90^\circ$.

За предельное может быть принято состояние, при котором необходим ремонт, капитальный ремонт, реконструкция или восстановление дороги. Таким образом, мы практически представили в виде тренда (рис. 1) обобщенную качественную характеристику направления развития объекта прогнозирования или, по принятой терминологии, прогнозную тенденцию.

Если пользоваться терминологией известной теории «русел и джокеров», фактически создаются условия для

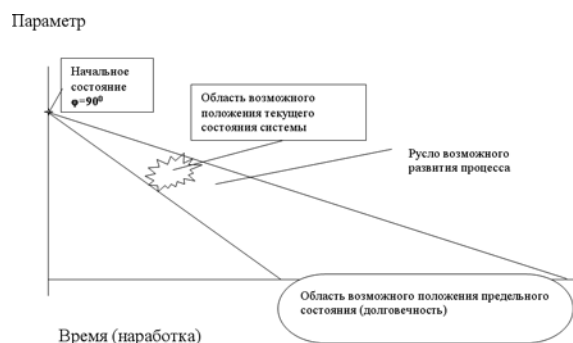


Рис. 1. Процедура прогноза

определения возможного русла развития процесса. В общем случае, в отличие от математических моделей, построенных в естественных науках, наши переменные могут меняться скачком. В фазовом пространстве многих объектов есть места, называемые областями джокеров. В этих областях случайность или игровой элемент либо фактор (не имеющий никакого значения в другой ситуации) может оказаться решающим и не только повлиять на судьбу объекта прогнозирования, но и скачком перевести ее в другую точку фазового пространства (бифуркация). Правило, по которому совершается этот скачок, называется джокером.

В практике эксплуатации автомобильных дорог известны случаи, когда разрушения имеют внезапный характер, например, из-за изменения зернового состава грунты превращаются в пучинистые с известными последствиями.

Такие скачки увеличивают число вариантов и степень неопределенности прогнозов в области джокера (расщепление первоначальной траектории системы на «пучок»). Области фазового пространства, где обеспечиваются условия предсказания поведения объекта прогнозирования с устраивающей точностью, называются руслами. Точность прогноза при этом будет определяться конкретными факторами: погрешностью определения текущего состояния (рис. 1); моментом времени определения текущего состояния; типичностью эксплуатационного воздействия до этого момента. Если нетипичное эксплуатационное воздействие выпадет за пределы момента времени определения текущего состояния, то оно окажет существенное влияние на точность прогноза, в противном случае — нет.

Рассмотрим возможность прогнозной экстраполяции тренда состояния автомобильных дорог. Количественной характеристикой объекта прогнозирования, в нашем случае будет изменяющаяся в процессе эксплуатации близость состояний, измеряемая углом φ . Если φ – расстояние между текущим в момент времени t_i и предельным состояниями, и $\pi/2 - \varphi$ – степень повреждения или дефектности автомобильной дороги за время t_i или путь, пройденный автомобильной дорогой за время t_i ,

то $(\pi/2 - \varphi)/t$ – скорость развития процесса во времени, а $(\pi/2 - \varphi)/\pi/2$ представляет собой относительную поврежденность за время t_i . Долговечность в данном случае может трактоваться как определение времени, за которое система достигнет состояния, принятого за предельное, или пройдет от начального состояния путь равный $\pi/2$, считая, что скорость останется неизменной. Долговечность автомобильной дороги может быть определена из выражения

$$\begin{aligned} (\pi/2 - \varphi)/\pi/2 &= t_i/T \\ \text{или } T &= (\pi t_i/2)/(\pi/2 - \varphi) \end{aligned} \quad (4)$$

При этом время $(T - t_i)$ представляет собой так называемый остаточный ресурс дороги. Определение остаточного ресурса позволит, обосновано назначать сроки различного вида ремонтов, или принятия решений об усилении или защите автомобильной дороги.

Может быть проведена аналогия с наиболее известными гипотезами накопления повреждений теории механической усталости. Так в соответствии с гипотезой линейного накопления повреждений Пальмгрена-Майнера разрушение наступает если:

$$D_1 + D_2 + \dots + D_{i-1} + D_i \geq 1 \quad (5)$$

где D_i – доля поврежденности. $D = \{10, D = 1$ – если автомобильная дорога находится в предельном состоянии, 0 – в противном случае.

D при этом может определяться по формуле:

$$D = \left(\frac{n_1}{N_1}\right)^{m_1} + \left(\frac{n_2}{N_2}\right)^{m_2} + \dots + \left(\frac{n_K}{N_K}\right)^{m_K} \quad (6)$$

где N_1, N_2, \dots, N_K – количество циклов приложения нагрузки на уровне $1, 2$ и K вызывающее полное разрушение (достижение дорогой предельного состояния), n_1, n_2, \dots, n_K – количество циклов приложения нагрузки уровня $1, 2, \dots, K$ к моменту изучения состояния дороги; m_1, m_2, \dots, m_K – безразмерные величины, характеризующие степень агрессивности по отношению к изучаемому материалу нагрузок уровня $1, 2, \dots, K$.

Применительно к автомобильной дороге вводятся допущения: под разрушением следует понимать достижение автомобильной дорогой предельного состояния; существует цикличность изменения эксплуатационной среды или прогнозного фона, и она составляет 1 год; изменения происходят внутри годового цикла, но не за его пределами; воздействие среды можно представить в виде времени воздействия к моменту обследования автомобильной дороги ($n_i = t_i$); количество циклов приложения эксплуатационной среды или прогнозного фона, вызывающее достижение автомобильной дорогой предельного состояния, является по определению дол-

говечностью дороги T ; агрессивность среды от цикла к циклу не меняется ($m_i = 1$).

Тогда выражение (6) можно представить в виде:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{T} \leq 1 \quad (7)$$

или с учетом непрерывности процесса повреждения – в виде:

$$D = \int_0^t \frac{dt}{T} \quad (8)$$

Состояние исследуемой автомобильной дороги в каком-либо возрасте t описывается изменениями наиболее информативных параметров относительно их значений в состоянии, принятом за начальное.

Если теперь измерить расстояние в φ в n -мерном пространстве признаков, то тем самым будет охарактеризована поврежденность автомобильной дороги. Тогда долговечность может быть представлена в виде функции $T = F(\varphi, t)$ и определена по формуле (4).

Выражение (4) имеет смысл только при значении $\cos \varphi \leq 1$, что возможно при выполнении условия

$$\left[\sum_{i=1}^n x_i^{(p)} * x_i^{(q)} \right]^2 \leq \sum_{i=1}^n (x_i^{(p)})^2 \sum_{i=1}^n (x_i^{(q)})^2 \quad (9)$$

Преобразуем полученное выражение к виду

$$\left[\sum_{i=1}^n x_i^{(p)} * x_i^{(q)} \right]^2 \leq \sum_{i=1}^n (x_i^{(p)})^2 \sum_{i=1}^n (x_i^{(q)})^2,$$

соответствующему универсальному неравенству Коши-Буняковского

$$\begin{aligned} (a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n)^2 &\leq \\ &\leq (a_1 + a_2 + \dots + a_n)^2 (b_1 + b_2 + \dots + b_n)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

которое выполняется при любых значениях $a_i b_i$.

Следовательно, прогнозирование по предложенному методу возможно при условии, если

$$\sum_{i=1}^n x_i^{(p)} * x_i^{(q)} \geq 0 \quad (11)$$

чему соответствует определенный физический смысл.

При

$$\sum_{i=1}^n x_i^{(p)} * x_i^{(q)} < 0$$

предельное состояние при конкретной эксплуатационной ситуации недостижимо. Прогнозирование долговечности автомобильной дороги возможно, но при этом необходима разработка достаточно информативного метода определения состояний системы. Важнейшей характеристикой прогнозного пространства является его размерность, то есть число величин, которыми определяется состояние автомобильной дороги. Очевидно, что все состояния должны описываться в одинаковых параметрах. Количество параметров должно быть конечно. Вид параметров зависит от типа и вида автомобильной дороги, а также от эксплуатационной среды.

Выполнение работ по содержанию (установленная система технического обслуживания и регламентов) связано с предупреждением, выявлением и устранением различного рода дефектов (повреждений, деформаций и разрушений) и нежелательного изменения таких

параметров как: сцепные качества, коллейность, восстановление потребительских свойств автомобильной дороги и т.п.

Состояние автомобильной дороги понимается как степень соответствия нормативным требованиям переменных параметров и характеристик дороги. Предлагается использовать для описания состояния только те параметры, которые изменяются под воздействием прогнозного фона, а именно от совместного действия: транспортных средств; гидрогеологических и метеорологических условий; уровня содержания и ремонта автомобильных дорог.

В качестве таких параметров могут быть приняты все виды меняющихся во времени под воздействием прогнозного фона дефектов и повреждений, которые можно оценить количественно. Например: относительное количество приходящихся на единицу длины дороги, трещин с дифференциацией по ширине раскрытия, площадь участков шелушения покрытия, площадь выбоин, коэффициент сцепления, глубина колеи и т.п.

Используем для этого известные методы теории распознавания образов, которые учитывают требование многопараметрической оценки и возможность получения результатов за приемлемое время. Выбор параметров для описания состояния системы предлагается осуществлять следующим образом.

Если J – набор номеров всех признаков, определяющих состояние

$$j = \{j_1, j_2, \dots, j_k\} \text{ некоторая часть набора } J$$

$$\text{Пусть } X = x(j) = (x_1, x_2, \dots, x_n), X(j) = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jk}),$$

$$\mu_1(j) = \{x(j); x \in \mu_1\}, \mu_2(j) = \{x(j); x \in \mu_2\}.$$

Вводится функция расстояния между множествами μ_1 и μ_2 в R_n

$$\rho(\mu_1, \mu_2) = \min \{ \rho(x, y); x \in \mu_1; y \in \mu_2 \}.$$

Задача оценивания информативности подсистем признаков формулируется в виде: найти набор $j \in J$, содержащий K признаков, при котором величина $\rho(\mu_1(j), \mu_2(j))$ приобретала бы максимальное значение.

В результате получен массив экспериментальных данных, представляющий собой значения характеристик потребительских свойств автомобильной дороги в раз-

личных возрастах. Характеристики свойств автомобильной дороги могут быть рассмотрены в виде реализаций случайного процесса их изменения во времени.

Анализ случайного процесса связан с исследованием автокорреляционной функции вида

$$R_\tau = \frac{1}{n-\tau} \sum_{i=1}^{n-\tau} \Delta X_i \Delta X_{i+\tau}, \text{ где } \Delta X_i = X_i - \bar{X}; i = 1, 2, \dots; n - \text{объем выборки}; \tau = t_j - t_2 - \text{момент времени реализации или сечения случайного процесса}; X_i - \text{среднеарифметическое значение выборки } x_i.$$

Изменение автокорреляционной функции случайного процесса реализаций основных параметров автомобильной дороги представлено на рисунке 2, и показывает, что по мере увеличения τ значение R_τ приближается к нулю.

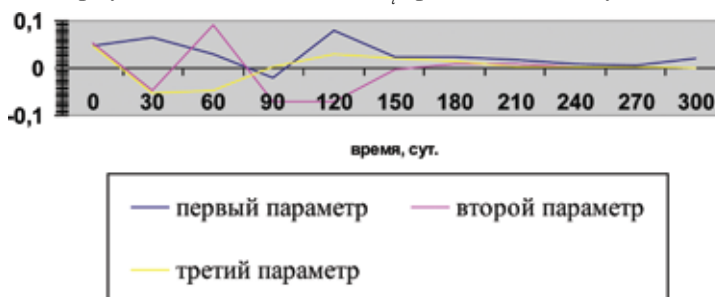


Рис. 2. Изменение автокорреляционной функции во времени

Затухание автокорреляционной функции является формальным признаком эргодичности случайного процесса. Зарегистрирован факт декоррелированности автокорреляционной функции одновременно для трех параметров автомобильной дороги (рис. 2). Одна реализация за достаточно большой промежуток времени, в нашем случае не менее одного года, может достаточно полно характеризовать рассматриваемый случайный процесс, что согласуется с высказанным предположением о пригодности выбранных параметров.

Эффективно проведение подобных исследований совместно с реализацией базисного анализа для определения информативной (базовой) дискреты времени или измерителя, например, с помощью программы «Гусеница».

Получены результаты использования разработанного метода прогнозирования состояний применительно к

Таблица 1
Результаты прогнозирования времени, необходимого для достижения цементным бетоном покрытия автомобильной дороги состояния, принятого за предельное

Возраст дороги в рассматриваемом состоянии (к моменту определения параметров)	Значение близости рассматриваемого состояния к исходному		Возраст дороги к моменту достижения предельного состояния, определенный по формуле (2)
	Сos φ	φ	
1 месяц	0	900	-
1 год	0,1645	80,50	9,47/13,9
1 год 6 месяцев	0,2281	76,80	10,22/7,0
2 года 6 месяцев	0,2989	72,160	12,61/14,6
2 года 11 месяцев	0,4335	64,20	10,17/7,5
4 года 7 месяцев	0,69*4	460	9,37/14,7
6 лет 8 месяцев	0,7898	37,80	11,36/3,3
7 лет 9 месяцев	0,9122	23,70	10,52/4,4
11 лет	1,0	00	-

Примечания: 1. За начальное принято состояние дороги в возрасте 1 месяц.
2. За предельное принято состояние дороги в возрасте 11 лет.
3. Над чертой приведен прогнозируемый возраст в годах, под чертой – ошибка прогнозирования в %.

автомобильной дороге Ташкент – Самарканд с цементным покрытием представлены в **табл. 1**.

Анализ результатов, представленных в таблице, показывает удовлетворительную погрешность прогноза (до 14,7%). Погрешность прогноза уменьшается с удаленностью от начального состояния. Например, удаление от начального состояния на 2 года 11 месяцев в сравнении с удаленностью в 1 год привело к уменьшению ошибки прогноза с 13,9 до 7,5%. Во всех случаях ошибка менее 15%. ➔

Литература

1. Рапопорт П.Б., Рапопорт Н.В., Молчанов В.С. Долговечность современных цементных бетонов транспортных сооружений. Повышение работоспособности железных и автомобильных дорог в сложных природных условиях. Межвуз. сб. научн. тр. СГУПС, Новосибирск, 2001. - С. 94-103.

2. Рапопорт П.Б. Оценка и прогнозирование стойкости бетона с добавкой пластификатора в условиях сухого жаркого климата. Автореф. дис. канд. техн. наук. - Алма-Ата. 1988. - 19 с.

3. Семенов В.А. Качество и однородность автомобильных дорог. - М.: Транспорт, 1989. - 125 с.

4. Столяров В.В. Проектирование автомобильных дорог с учетом теории риска. Части 1,2.- Саратов: СГТУ, 1994. - 184 с., - 232 с.

5. Кокодеева, Н.Е. Определение срока службы дорожной одежды и темпов ее разрушения с учетом изменения влажности грунта в расчетный период года (с пози-

ции теории риска) / Н. Е. Кокодеева // Строительство и реконструкция. Известия Орел ГТУ, №6/26 (574) 2009 (ноябрь-декабрь) - С. 86-90.

6. Кокодеева, Н. Е. Анализ эксплуатационного состояния дорожных одежд нежесткого типа / Н. Е. Кокодеева // Проблемы транспортного строительства и транспорта : материалы междунар. науч.-техн. конф. / СГТУ. - Саратов, 1997. Вып.2. - С. 9-15.

7. Фазылов У.Ф., Юсупов Р.Р., Мукумов Х.А. Икрамов А.Р. Влияние комплексных климатических воздействий на прочность и деформации бетона. - В сб. тр. ТашПИ «Исследование строительных материалов и конструкций», Ташкент, 1986. - С. 80-86.

8. Zito F. La drabilità del calcestruzzo La tecnica professionale. Collegio inqeqheri ferroviari italiani, 1983. P. 636-643.

9. K. Hajnal-Konyi. Concrete New Ways of Building. London, 1951. P. 19.

10. Idorn G. M. Cognate energy and Darabrlyty. Cognate International Design Construction. USA. 1984. P. 13-20.

11. Пригожин И.Р. Неравномерная статистическая механика. - М.: Мир, 1964. - 314 с.

12. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. - М.: Изд. группа Прогресс, 1986. - 432.

13. Пригожин И.Р., Стенгерс И. Время, хаос, квант. - М.: Изд. группа «Прогресс», 1994. - 272 с.

14. Пригожин И. Конец определенности. Время, Хаос и Новые Законы Природы / Регулярная и хаотическая динамика, 2001. - 208 с.