

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ДОРОГ

Макала автомобиль жолдорунун сапатын башкаруунун автоматташтырылган системасынын курамында жол жабуусунун бекемдик көрсөткүчтөрүн эсептөөдөгү статистикалык моделдерди колдонуу маселерине арналган.

Данная статья посвящена вопросам использования статистических моделей при расчете показателей прочности дорожного покрытия в составе автоматизированной системы управления качеством автомобильных дорог.

The article is devoted to the issues of statistic models usage while calculating road surface strength indexes in automated system of automobile road quality management.

Несмотря на высокую степень автоматизации процесса проектирования автомобильных дорог, качество проектов по критериям безопасности движения, долговечности и экономичности возросло не намного. Одной из причин недостаточного качества проектной документации является детерминированный подход в технологии проектирования. Физико-механические свойства материалов в конструкции дорожного полотна, нормативы проектирования, расчетные формулы и номограммы получены в большинстве эмпирическими методами и сглажены при помощи инструментов математической статистики, что также указывает на их вероятностное происхождение. Во многих работах и нормативных документах уже предлагаются подходы в проектировании дорог, базирующиеся на статистических методах /1, 2/. Внедрению статистических методов в проектную практику препятствует, с одной стороны, их сложность, с другой стороны – отсутствие экспериментальных данных о характеристиках случайных функций и процессов. Ю.Л.Жигуром исследованы методы использования вероятностного подхода к проектированию автомобильных дороги и приведены экспериментальные данные статистических свойств строительных материалов, которые представлены в табл. 1 /2/.

Таблица 1

Коэффициенты вариации модуля упругости грунтов по сезонам года

Ф.И.О. исследователя	Тип грунта	Коэффициент вариации V_E (%) по сезонам года			
		весна	лето	осень	зима

Коновалов П.А.	Песок	12-20	-	-	-
Рудницкий Н.Я.	Мореные глины	43	-	-	-
Коновалов С.В., Ермолаев Н.Н.	Суглинок	40	-	-	-
	Суглинок	30	30	30	30
Игнатов О.И.	Глина, суглинок супеси	30...35	-	-	-
Захаров С.Б.	Суглинок легкий	40	-	-	-
Скачко А.Н., Шамин С.С.	Глина	4,5...10	-	-	-
	Суглинок	5,7...6,0	-	-	-
	Песок мелкозернистый	5,5	-	-	-
	Песок среднезернистый	6,9	-	-	-
Носов В.П.	Супесь легкая	8,0	5,0	7,0	-
Семенов В.А.	Суглинок	30,0	10,0	23,0	-
Степушин А.П.	Супесь	25	17	13	-

Коэффициент вариации модуля упругости подстилающего грунта изменяется в значительном диапазоне и зависит от типа грунта. Фактические значения коэффициента вариации модуля упругости грунтов изменяются в диапазоне от 8 до 43 % /2/.

Как показал анализ выполненных работ, общим недостатком внедрения в проектную практику и теорию вероятностных методов является отсутствие сквозной процессной систематики, так как все известные исследования опираются на статистические оценки конечных и некоторых промежуточных результатов и коэффициентов. При этом в большинстве случаев предполагается использовать нормальный закон распределения. Несмотря на то, что нормальное распределение нашло широкое применение во всевозможных вероятностных расчетах, следует указать на существенные недостатки подобного подхода.

Во-первых, следует отметить тот факт, что нормальный закон в природе не существует и, используя в расчетах гипотезу о нормальности, тем самым уже вносится методическая погрешность. Нормальное распределение выведено из предположения наличия в процессе проектирования бесконечно большого числа параметров и процедур, которые имеют «некоторый вектор» (ориентир на статистическую закономерность), все эти векторы в пространстве проекта расположены равномерно хаотически и их проекции «суммируются на общую ось», образуя нормальность. На самом деле ни один проект не имеет бесконечного числа этапов, параметров или процедур, их число ограничено, и среди них может преобладать один или два фактора, критерия или системных звена с наибольшим «весом», неопределенность в которых и определяет конечное распределение результата.

Во-вторых, предполагая распределение по нормальному закону, во всех проектно-расчетных моделях игнорируется наличие корреляционной связи, что количественно снижает результирующую неопределенность.

В связи с этим нами предпринята попытка «встроить» статистические параметры в алгоритм проектирования, работающий в режиме реального времени, который имитирует

проектные процедуры с учетом их статистической природы. Подобный алгоритм можно реализовать на базе имитационного моделирования, что ставит новую задачу разработки соответствующей модели для целей проектирования. Имитационное проектирование автомобильных дорог в масштабе проектного времени следует рассматривать как новую парадигму в проектировании автомобильных дорог.

Важное место в системе «водитель – автомобиль – дорога – среда» (ВАДС) отводится внешней среде. В упомянутых выше работах под внешней средой чаще всего понимаются погодные условия [2]. В данной работе предлагается считать неотъемлемой частью ВАДС подсистему учета и анализа ДТП, а также методы проведения экспертизы ДТП, которые используются в органах дорожной полиции и прочих организациях. Этот подход обосновывается тем, что измерения, расчеты и прогнозы также являются величинами случайными, которые приводят к ошибкам в процессе принятия решений, т.е. рискам водителя транспортного средства (ТС), рискам проектировщиков дорог и, в конечном итоге, к рискам общества и государства. Объективная оценка данных рисков позволит декомпозировать общий системный риск и «снять» необоснованную ответственность водителя ТС или претензии к качеству дорог, а также количественно оценивать некоторые участки дороги с позиции риска как вероятности возникновения ДТП и в случае высокой вероятности устанавливать на данных участках предупреждающие дорожные знаки и количественно отмечать эти риски в проектах. Для оценки указанных рисков предусматривается разработка вероятностных моделей, что также является одной из задач исследования в настоящей работе.

Развитие автомобильного транспорта и совершенствование конструкций автомобилей постоянно повышают требования к качеству путей сообщений и управления ТС. Влияние автомобиля на безопасность дорожного движения определяется совершенством его тяговых и тормозных качеств, т.е. способностью быстрого торможения без заноса, а также маневренностью, обеспечивающей возможность вписываться в кривые малых радиусов, вынужденно устраиваемые на автомобильных дорогах в сложных условиях рельефа.

Важное место в системе обеспечения безопасности дорожного движения отводится качеству дорожной одежды. Долговечность и прочность нежесткой дорожной одежды зависят от целого ряда случайных аргументов: давления от расчетного автомобиля, отклонений толщин и модуля упругости конструктивных слоев от проектных значений, углов внутреннего трения и сцепления в грунте, температуры и т.д. С позиций общей теории надежности условие надежности нежесткой дорожной одежды может быть записано в вероятностном виде как

$$P_{op} > P_H,$$

где P_{op} – вероятность безотказной работы конструкции нежесткой дорожной одежды; P_H – нормативное значение вероятности безотказной работы нежесткой дорожной одежды.

В период эксплуатации условие надежности должно соблюдаться для всех видов предельного состояния нежесткой конструкции. Для обеспечения требуемой надежности P_H нежесткой дорожной одежды по первому предельному состоянию необходимо, чтобы общий расчетный модуль упругости нежесткой

конструкции в период эксплуатации превосходил минимальный требуемый общий модуль упругости нежесткой конструкции:

$$E_{i \text{ общ}} - E_{i \text{ мин}} \geq 0,$$

где $E_{i \text{ общ}}$ – случайная величина общего расчетного модуля упругости нежесткой конструкции; $E_{i \text{ мин}}$ – случайная величина минимального требуемого общего модуля упругости.

С целью оценки влияния формы законов распределения на качество (вариацию) результата нами исследуются три закона распределения: нормальный, равномерный и закон Вейбулла.

Если функции плотности распределения подчиняются нормальному закону, то аналитически они будут иметь следующий вид:

$$f_1(E_{i \text{ общ}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(E_{i \text{ общ}} - E_{i \text{ общ}})^2}{2\sigma_1^2}};$$

$$f_2(E_{i \text{ мин}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{(E_{i \text{ мин}} - E_{i \text{ мин}})^2}{2\sigma_2^2}},$$

(1)

где σ_1^2 и σ_2^2 – дисперсии распределения $E_{i \text{ общ}}$ и $E_{i \text{ мин}}$.

Индексация статистических параметров, как в данном случае 1,2 (σ_1^2 , σ_2^2), так и в дальнейшем, принимается порядковая, что облегчит алгоритмизацию и программирование задачи.

Для обеспечения заданной надежности (обеспеченности по прочности) коэффициент прочности проектируемой конструкции по каждому из расчетных критериев не должен быть ниже минимального требуемого значения, определяемого по таблице /4/.

После выбора конструкции дорожной одежды (этот этап в настоящей работе не исследуется) приступают к расчету прочности дорожного полотна. В задачу расчета входит определение толщин слоев одежды в вариантах, намеченных при конструировании, или выбор материалов с соответствующими деформационными и прочностными характеристиками при заданных толщинах слоев.

В соответствии с известными рекомендациями /4/ определяются расчетные параметры подвижной нагрузки. В качестве расчетной схемы нагружения конструкции колесом автомобиля принимается гибкий круговой штамп диаметром D , передающий равномерно распределенную нагрузку величиной p . Величины расчетного удельного давления колеса покрытия p и расчетного диаметра D приведенного к кругу отпечатка расчетного колеса на поверхности покрытия назначают с учетом параметров расчетных типов автомобилей.

В зависимости от вида расчетной конструкции используют различные характеристики, отражающие интенсивность воздействия на нее подвижной нагрузки. В данном случае воспользуемся перспективной (на конец срока службы) общей среднесуточной интенсивностью

движения N , которую устанавливают по данным «анализа закономерностей изменения объема перевозок и интенсивности транспортного потока при проведении титульных экономических обследований» /4/.

В соответствие с типовыми рекомендациями величина приведенной интенсивности N_p определяется по последнему году эксплуатации автомобильной дороги по формуле

$$N_p = f_{пол} \sum_{m=1}^n N_m S_{m\text{ сум}}, \text{ ед./сут.}$$

(2)

где $f_{пол}$ – коэффициент, учитывающий число полос движения и распределение движения по ним, определяемый по табличным данным /4/; n – общее число различных типов транспортных средств в составе транспортного потока; N_m – число проездов в сутки в обоих направлениях транспортных средств m -го типа; $S_{m\text{ сум}}$ – суммарный коэффициент приведения воздействия на дорожную одежду транспортного средства m -го типа к расчетной нагрузке.

В выражении (2) N_m , $S_{m\text{ сум}}$ являются по своей природе величинами случайными. Закон распределения величина N_m в силу множества предпосылок будем считать нормальным с параметрами среднего и дисперсий: $N_{m\text{ ср}}$, σ_3^2 .

Тогда функция плотности распределения этого параметра будет иметь следующий аналитический вид:

$$f_{3(N_m)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_3^2}} e^{-\frac{(N_m - N_{m\text{ ср}})^2}{2\sigma_3^2}},$$

(3)

где σ_3^2 – дисперсия распределения; $N_{m\text{ ср}}$ – среднее значение.

В качестве среднего $S_{m\text{ сум ср}}$ выбирается значение из табл. 2 /4/.

Таблица 2

Коэффициент приведения к расчетной нагрузке $S_{m\text{ сум}}$

Типы автомобилей	Коэффициент приведения к расчетной нагрузке $S_{m\text{ сум}}$
Легкие грузовые автомобили грузоподъемностью от 1 до 2 т	0,005
Средние грузовые автомобили грузоподъемностью от 2 до 5 т	0,2
Тяжелые грузовые автомобили грузоподъемностью от 5 до 8 т	0,7
Очень тяжелые грузовые автомобили грузоподъемностью более 8 т	1,25
Автобусы	0,7

Типы автомобилей	Коэффициент приведения к расчетной нагрузке $S_{т\ cум}$
Тягачи с прицепами	1,5

Предварительное изучение состава транспортного потока на автомобильной дороге Усть-Каменогорск – Зыряновск позволяет аппроксимировать функцию плотности распределения коэффициента приведения $S_{т\ cум}$ законом Вейбулла с параметром формы в интервале 2,0...2,8. Фактическое значение коэффициента формы будет найдено специальным экспериментом. Формула функции плотности распределения закона Вейбулла имеет следующий вид:

$$f_{(S_{т\ cум})} = \frac{b}{a} (S_{т\ cум} - \gamma) e^{-\frac{(S_{т\ cум} - \gamma)^b}{a}}, \quad (4)$$

где a – параметр масштаба; b – параметр формы; γ – параметр положения.

При численном значении параметра формы $b = 1,0$ данный закон моделирует экспоненциальное распределение, при значении $b=2,5$ закон Релея, а при $b= 3,25$ форма распределения Вейбулла близка к нормальному закону. Аналитическая форма интегрального закона распределения имеет следующий вид:

$$F_{(S_{т\ cум})} = 1 - e^{-\frac{(S_{т\ cум} - \gamma)^b}{a}}. \quad (5)$$

Наличие аналитической формы интегрального закона намного упрощает генерирование необходимых вероятных реализаций для исследуемых событий.

Следующим этапом будет расчет конструкции в целом по допускаемому упругому прогибу.

Величину минимального требуемого общего модуля упругости конструкции вычисляют по эмпирической формуле [4/

$$E_{min} = 98,65 [lg(\Sigma N_p) - c], \text{ МПа}, \quad (6)$$

где ΣN_p – суммарное расчетное число приложений нагрузки за срок службы дорожной одежды, устанавливаемое в соответствии с формулой (4).

Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки к точке на поверхности конструкции за срок службы определяют по формуле

$$\Sigma N_p = 0,7 N_p \frac{K_c}{q (T_{ca} - 1)} T_{pдз} k_n, \quad (7)$$

где n – число типов автомобилей; N_p – приведенная интенсивность на последний год срока службы, авт./сут; $T_{pдз}$ – расчетное число расчетных дней в году, соответствующих определенному состоянию деформируемости конструкции; k_n – коэффициент, учитывающий вероятность

отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого; K_c – коэффициент суммирования определяют по формуле

$$K_c = \frac{q^{T_{cl}} - 1}{q - 1}, \quad (8)$$

где T_{cl} – расчетный срок службы; q – показатель изменения интенсивности движения данного типа автомобиля по годам.

Независимо от результата, полученного выше, требуемый модуль упругости должен быть не менее нормативного.

Общий расчетный модуль упругости конструкции определяют по формуле для двухслойного полупространства /4/.

Модельные обозначения параметров приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Статистические модельные параметры законов распределения параметров выражения

Параметр	Среднее значение	Дисперсия
E_i	E_{icp}	σ_5^2
$E^{(s)}_i$	$E^{(s)}_{icp}$	σ_6^2
h	h_{cp}	σ_7^2
D	D_{cp}	σ_8^2

С учетом этого расчет прочности по допустимому упругому прогибу (по требуемому модулю деформации) осуществляют в следующей последовательности (рис. 1).

Результаты имитационных расчетов накапливаются в специальных массивах, и по завершению цикла по переменной M выполняются статистическая обработка с построением гистограмм E_{imin} , $E_{ioбц}$ и их исследование на принадлежность к определенному теоретическому закону распределения.

Назначая величину доверительной вероятности на поле распределения E_{imin} , можно получить расчетное значение рисков проектирования и заказчика проекта, которые могут быть интерпретированы как коэффициенты надежности и прочности.

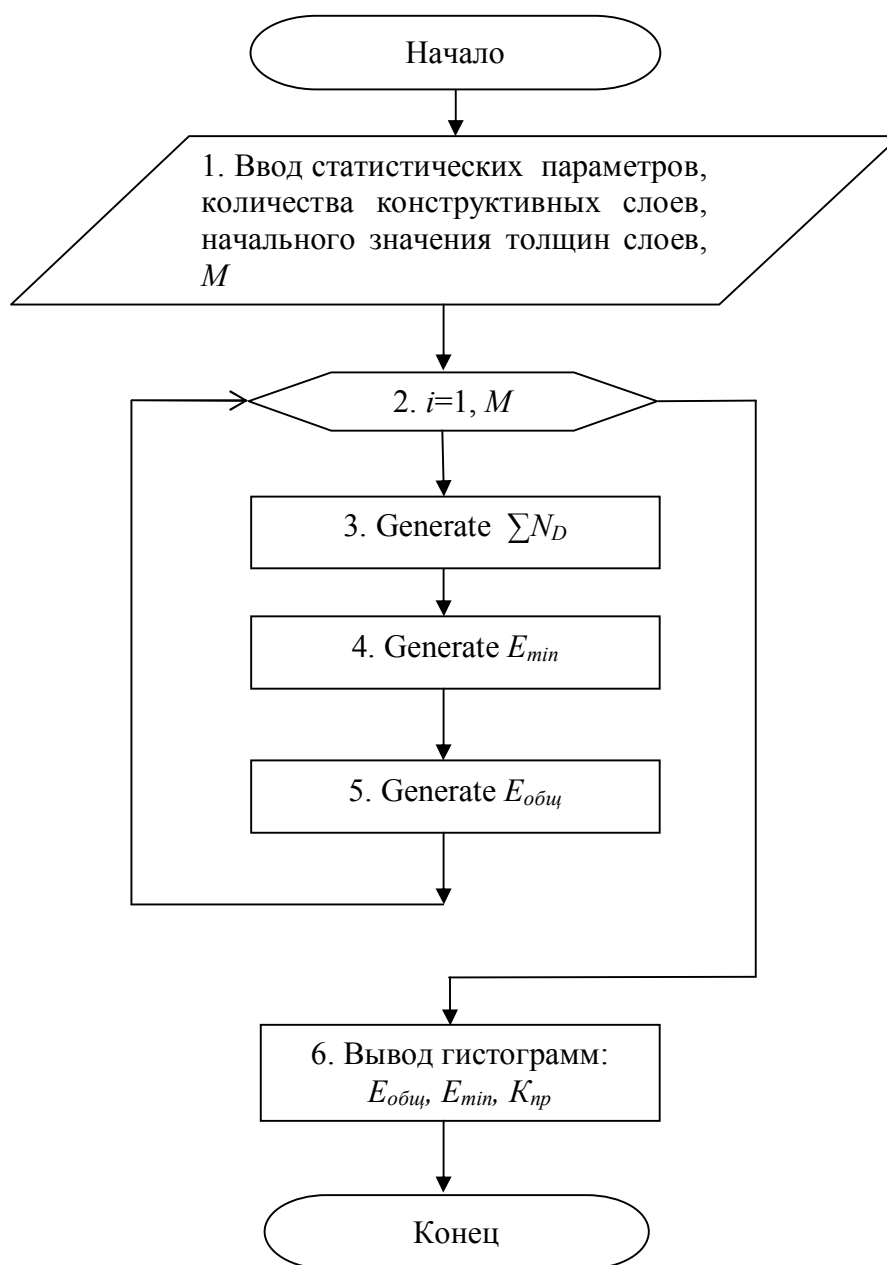


Рис. 1. Имитационный алгоритм расчета прочности дорожной одежды по допустимому прогибу

Полученные результаты моделирования можно положить в основу процессов принятия решений в системе автоматизированного проектирования дорожных покрытий.

Окончательные расчеты и рекомендации представляется возможным получить путем проведения компьютерного эксперимента на базе реальных экспериментально-статистических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сиденко В.М. Об учете неоднородностей свойств грунтовых оснований дорожных одежд // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1959. – № 6. – С. 113-116.
2. Жигур Ю.Л. Учет вероятностно-статистической изменчивости физико-механических свойств материалов конструктивных слоев при расчете нежестких дорожных одежд: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МАДИ, 2007. – 21 с.
3. Бабков В.Ф., Андреев О.В. Проектирование автомобильных дорог: Учеб. для вузов / Ч. I. – М.: Транспорт, 1979. – 367 с.
4. СН РК 3.03-19-2006 Проектирование дорожных одежд нежесткого типа. – Астана, 2007. – 69 с.