УДК 625.731: 625.861

В.А. КОРНЕВ, А.А. МАКЕНОВ
V.A. KORNEV, A.A. MAKENOV
E.mail. ksucta@elcat.kg

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

FORECASTNG QUALITY OF THE PAVEMENT'S DESIGN OF UNDER UNCERTAINTY PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE BUILDING MATERIALS

Макалада статистикалык аныкталбаган жагдайда чечим кабыл алуу учурунда кокустук процесс катары долбоорлоонун өтмө технологиясы каралды. Долбоорлоо учурунда чечим кабыл алууда долбоордук кокустуктар да болушу мүмкүн, бул долбоордун сапаттуулугу, экономикалык чыгымдары менен чыгашалары деген критерийлер боюнча сапатын аныктайт. Долбоордук параметрлерди эсептөө үчүн ыктымалдуулук жана имитациялык моделдөө колдонулат. Долбоорлоонун имитациялык технологиясы жол төшөлгөсүнүн бекемдигин эсептөөдө жүзөгө ашат.

Ачкыч сөздөр: *автомобиль, ыктымалдуулук, жол, жол төшөлгөсү, ишенимдүүлүк, аныкталбагандык, нормативтик көрсөткүч, долбоорлоо, процесс.*

В работе рассматривается сквозная технология проектирования в виде случайного процесса с этапами принятия решений в условиях статистической неопределенности. Принятие решений в процессе проектирования сопровождается проектными рисками, которые определяют качество проектирования по критериям достоверности, экономических затрат и потерь. Для расчета проектных параметров используется вероятностное и имитационное моделирование. Имитационная технология проектирования реализована на примере расчета прочности дорожного покрытия.

Ключевые слова: *автомобиль, вероятность, дорога, дорожное покрытие, надежность, неопределенность, нормативный показатель, прогиб, проектирование, процесс.*

The paper deals with the design-through technology in the form of a random process with the stages of the decision-making under conditions of statistical uncertainty. Making decision in the design process is accompanied by project risks that determine the quality of the design criteria of accuracy, the economic costs and losses. To calculate the design parameters there uses probability and simulation modeling. The simulation technology of the design is implemented on the example that calculates the strength of the pavement.

Keywords: *the car, the likelihood of, the road, road surface, reliability, uncertainty, the sta-tu-tory rate, bending, design, process.*

Развитие экономики государства невозможно без системного обеспечения и развития транспортной инфраструктуры. Динамика «автомобилизации» Казахстана по некоторым показателям значительно превосходит даже развитые страны, особенно в секторе личного автомобильного транспорта. Объективным показателем динамики развития автотранспортной отрасли является ускоренный рост объемов перевозок автомобильным транспортом. С учетом данных факторов была разработана Транспортная Стратегия Республики Казахстан и план ее реализации [1]. Достижение целей, указанных Стратегией, невозможно без развития как в количественном, так и в качественном плане автодорожной сети Казахстана, состояние которой в настоящее время не отвечает современным требованиям и планам государства. Важнейшими задачами качественного развития дорожной сети являются: внедрение в автодорожной отрасли международных стандартов управления качеством, внедрение прогрессивных технологий и материалов,

повышение качества кадрового потенциала отрасли, организация приоритетных научных исследований и практическое внедрение их результатов, совершенствование конструкций дорожных одежд, совершенствование правовой и нормативно-технической базы отрасли [2-3]. Еще Эдвардс Деминг, классифицируя причины плохого качества в любой из сфер человеческой деятельности, разделял их на две группы: «специальные, выявляемые здравым смыслом, и системные». При этом, он отмечал, что 94% причин плохого качества носят системный характер и устраняя только специальные причины, доля которых составляет 6%, «добиться кардинального изменения качества принципиально невозможно».

Системность в решении проблемы качества автомобильных дорог предполагает рассмотрение проблемы в контексте ее жизненного цикла. Известно, что транспортно-эксплуатационные параметры автомобильной дороги закладываются на этапе проектирования, реализуются в процессе строительства и поддерживаются во время эксплуатации. Процесс проектирования является первым и самым важным этапом в жизненном цикле автомобильной дороги. Несмотря на широкое привлечение в проектирование новых информационных технологий, качество автомобильных дорог в Казахстане повысилось совсем незначительно. Одной из причин этого, по нашему мнению, является принцип, на который опирается вся технология проектирования, принцип детерминизма. Вместе с тем, еще в 1986 году Джеймс Лайтхил, президент Международного союза чистой и прикладной математики, сделал следующее сенсационное заявление: он извинился от имени своих коллег по Международному союзу за то, что «в течение трех веков образованная публика вводилась в заблуждение апологией детерминизма, основанного на системе Ньютона, тогда как можно считать доказанным, по крайней мере, с 1960 года, что этот детерминизм является ошибочной позицией». Особенно этот факт проявляется на примере проектирования автомобильных дорог.

Одним из источников неопределенности в системе проектирования автомобильных дорог является качество строительных материалов, а именно, их физико-механические свойства. Для расчета конструкции нежестких дорожных одежд с заданным уровнем надежности, прогнозирования ее долговечности необходимо располагать данными, характеризующими вероятностно-статистические закономерности распределения прочностных характеристик материалов конструктивных слоев и подстилающего грунта. Исследованию закономерностей распределения физико-механических свойств материалов, которые применяются для устройства нежестких дорожных одежд, посвящены работы В.Ф. Бабкова [2], В.М. Сиденко [4], В.А. Семенова [5], О.И. Игнатова [6] , В.П. Носова [8], А.Н. Скачко, С.С. Шамина [9] и других авторов. В результате выполненных исследований установлено, что физико-механические свойства грунтов обладают значительной изменчивостью (статистической вариацией). Коэффициенты вариации физико-механических свойств грунтов, характеризующие статистическую изменчивость деформационных характеристик естественных оснований в течение одного и того же сезона, зависят от типа грунта и могут изменяться в диапазоне от 5% до 40%.

Использование статистических оценок в известных технологиях проектирования авто-мобильных дорог носит локальный характер, что не дает возможности исследования процес-са накопления неопределенности, например, при послойном расчете модуля упругости. В процессе расчетов используют значительное количество математического и графического материала. Все формулы, графики и номограммы, которые используются в расчетах, получены экспериментально, однако, статистических оценок каждого расчетного акта не принято делать. В качестве оценки статистической неопределенности может использоваться среднее квадратическое отклонение [10-11].

Для реализации указанных предпосылок нами был использован имитационный расчетный алгоритм, который демонстрируется на примере расчета конструкции нежесткой дорожной одежды по известной методике. В данном подходе рассматривается

попытка «встроить» статистические инструменты в сквозную технологию проектирования, работающую в режиме реального времени, имитирующую проектные процедуры с учетом их статистической природы. Это позволит учесть разрушающие воздействия на дорогу не только по средним величинам, но и по резко выделяющимся редким событиям.

Традиционный подход из условия долговечности нежесткой дорожной одежды доказывает, что для обеспечения требуемой надежности $P_н$ нежесткой дорожной одежды по предельному состоянию необходимо, чтобы общий расчетный модуль упругости нежесткой конструкции в период эксплуатации превосходил требуемый общий модуль упругости нежесткой конструкции:

$$E_{i\,общ} - E_{тр} => 0, \qquad (1)$$

где $E_{i\ \ общ}$ – случайная величина общего расчетного модуля упругости нежесткой конструкции;

$E_{тр}$ – величина требуемого общего модуля упругости.

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

$$f_1(E_{общ}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} \cdot e^{\frac{-(E_{общ} - \overline{E}_{общ})^2}{2\sigma_1^2}}; \qquad (2)$$

$$f_2(E_{\min}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2}} \cdot e^{\frac{-(E_{\min} - \overline{E}_{\min})^2}{2\sigma_2^2}},$$

где σ^2_1 и σ^2_2 – дисперсии распределения $E_{общ}$ и $E_{тр}$.

Для обеспечения заданной надежности (обеспеченности по прочности) коэффициент прочности проектируемой конструкции по каждому из расчетных критериев не должен быть ниже требуемого значения, который задается таблично в методике расчета.

В соответствие с типовыми рекомендациями на первом этапе рассчитывается величина приведенной интенсивности N_p по формуле

$$N_p = f_{пол} \cdot \sum_{m=1}^{n} N_m \cdot S_{m\ сум}, \text{ ед./сут.} \qquad (3)$$

где $f_{пол}$ – коэффициент, учитывающий число полос движения и распределение движения по ним (определяется по табличным данным);

n – общее число различных марок транспортных средств в составе транспортного потока;

N_m – число проездов в сутки в обоих направлениях транспортных средств m-й марки;

$S_{m\ сум}$ – суммарный коэффициент приведения воздействия на дорожную одежду транспор-тного средства m-й марки к расчетной нагрузке.

Значения n, N_m и $S_{m\ сум}$ являются по своей природе величинами случайными. Законы распределения указанных величин в силу множества предпосылок можно считать нормальными. Тогда функция плотности распределения параметра N_m будет иметь следующий аналитический вид:

$$f_3(N_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma_3}} \cdot e^{\frac{-(N_{m\,i} - N_{m\,ср})^2}{2\sigma_3^2}}, \qquad (4)$$

где σ^2_3 – дисперсия распределения, а $N_{m\,ср}$ – среднее значение.

В качестве среднего $S_{m\,сум}$ принимается табличное значение.

Приведение многослойной конструкции к эквивалентной однослойной, как следует из известных рекомендаций, осуществляется послойно, начиная с подстилающего грунта. Расчетные значения модулей упругости грунтов и материалов допускается принимать в соответствие со справочными данными. Приведенные в рекомендациях значения модулей упругости грунтов и материалов в работе будут рассматриваться как средние значения случайных величин, имеющих определенные законы распределения. Тогда имитационный алгоритм расчета по допустимому упругому прогибу (по требуемому модулю деформации) ведут в последовательности, которая представлена на рисунке 1.

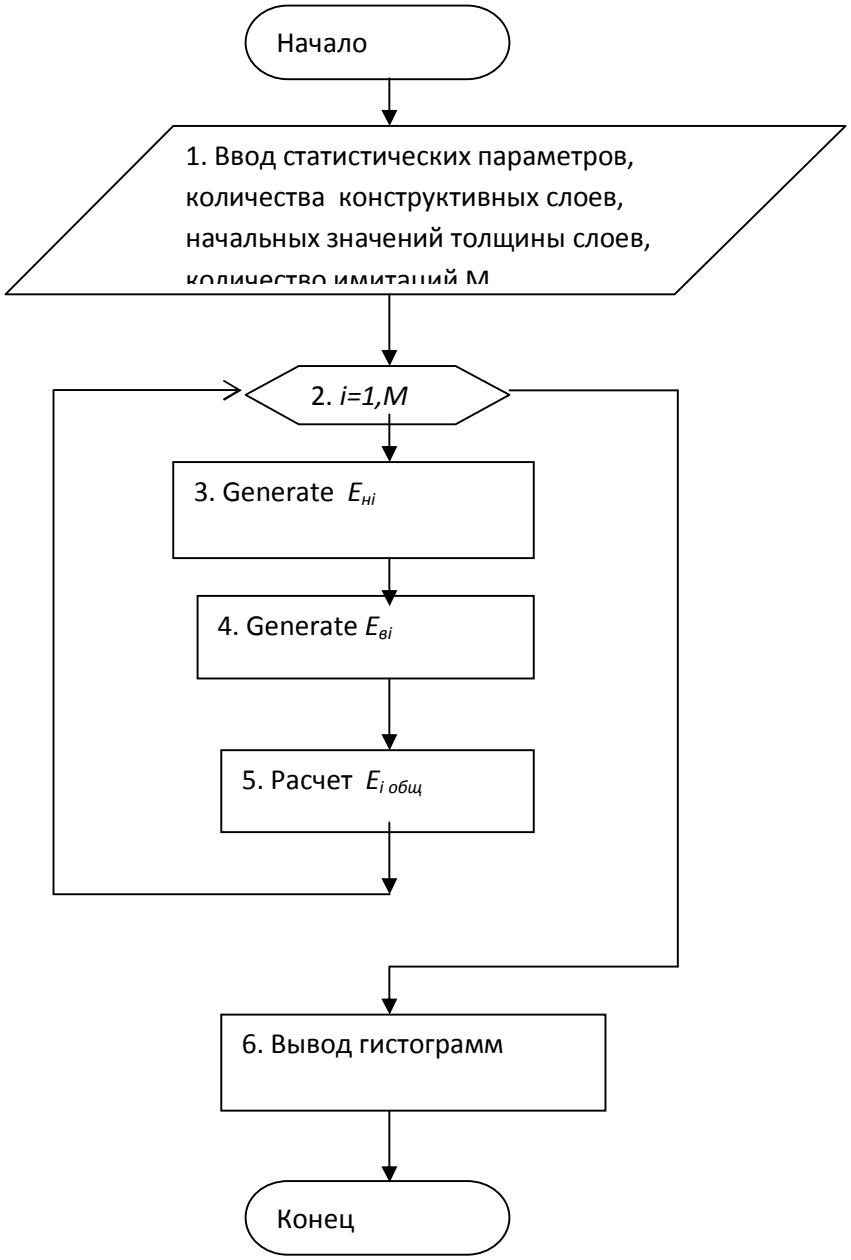


Рис. 1. Имитационный алгоритм расчета модуля упругости двухслойной конструкции дорожной одежды

В первом блоке осуществляется ввод статистических характеристик. Во втором блоке открывается начало цикла по переменной цикла M, которая определяет число имитационных реализаций (повторений). В третьем, четвертом и пятом блоках генерируются случайные значения $E_{нi}$ и $E_{вi}$. В блоке 5 осуществляется расчет $E_{i\ общ}$. В блоке 6 производится построение гистограммы распределения результата.

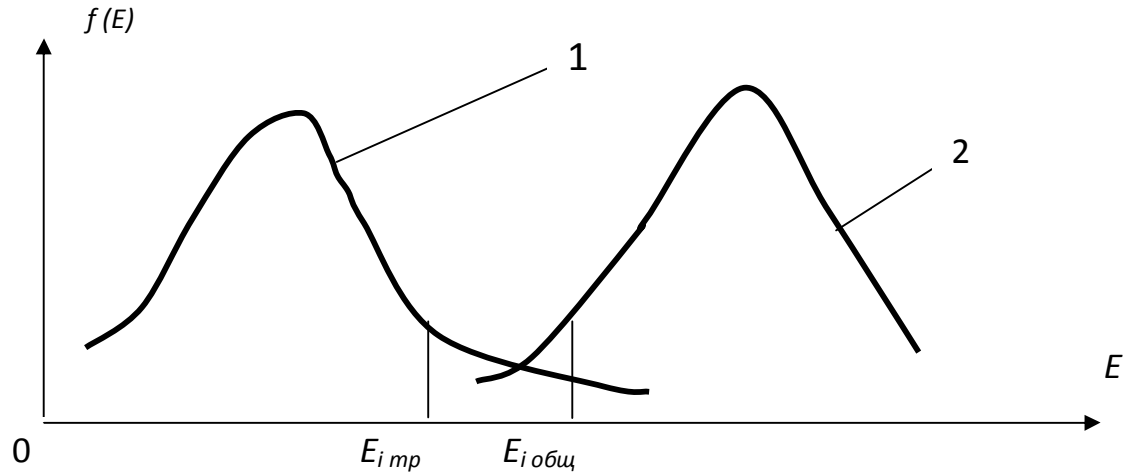
Функциональное назначение каждого шага имитационной модели кратко представлено в ее блоках. Так как расчетные выражения используются в соответствии с

установленными стандартами, необходимость в детальном описании математических выкладок отсутствует.

Результаты имитационных расчетов накапливаются в специальных массивах и по завершению цикла по переменной M осуществляется статистическая обработка. По завершению моделирования модуля упругости всей многослойной конструкции дорожной одежды, строится гистограмма распределения $E_{общ}$ и производится исследование результатов на принадлежность к определенному теоретическому закону распределения.

В соответствие с существующими нормами проектирования дорожных одежд и результатами моделирования должно соблюдаться соотношение (1). Как показывают многочисленные исследования в разных научно-практических сферах деятельности, в том числе и проектировании автомобильных дорог, в настоящее время нет строгой объективной методики определения нормативов и допусков [12-13]. Многие нормативы в дорожном проектировании задаются интервалами, поэтому правомерно предположить, что $E_{тр}$ является величиной случайной, которая в зависимости от условий эксплуатации автомобильной дороги и времени может изменяться.

Тогда графически окончательный результат проектирования можно представить рисунком 2.



1 – функция плотности распределения требуемого модуля упругости нежесткой конструкции $E_{iтр}$; 2 – функция плотности распределения общего модуля упругости нежесткой конструкции $E_{i\,общ}$

Рис. 2. Функции плотности распределения норматива и безотказности дорожного полотна

Из рисунка 2 видно, что в данном i-м расчетном цикле вероятное минимальное значение $E_{i\ общ}$ при уровне доверительной вероятности 0,95 должно быть больше максимального вероятного значения $E_{i\,тр}$.

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

Расчет конструкции на сопротивление монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе осуществляется по аналогичной имитационной методике, и детально описывать ее не имеет научно-познавательного смысла.

Работа имитационной модели осуществляется в диалоговом режиме, что позволяет ре-ализовать в проектировании - режим визуального моделирования, являющийся в настоящее время в проектной деятельности инновационным подходом. Данный подход, представляет несомненный большой практической интерес, так как позволяет наглядно представить разработчику проекта и лицу, принимающему решение, распределенное

случайным образом поле результатов проектирования. Особенно продуктивна подобная демонстрация результатов расчета в случае использования законов распределения отличных от нормального закона, с так называемыми «тяжелыми хвостами», что довольно часто встречается на практике. В научном плане подобная методика обладает новизной не только в моделировании процессов проектирования автомобильных дорог, но может быть эффективно использована и в других предметных областях.

Для получения окончательных выводов был реализован компьютерный эксперимент, который содержал традиционный расчет и предлагаемый имитационный расчет на примере конструкции дорожной одежды, состоящей из пяти слоев.

Расчетные данные по допускаемому упругому прогибу приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Расчетные данные по допускаемому упругому прогибу

№ слоя	E, МПа	h, см	h/D	E_2/E_1	$E_{общ}/E_1$	$E_{общ}$, МПа
1	3200	6	0,18	0,065	0,075	242
2	2000	8	0,24	0,07	0,104	208
3	350	18	0,52	0,24	0,4	140
4	120	50	1,52	0,28	0,69	82,8
5	34	-	-	-	-	-

Как следует из типового расчета, $E_{общ}/ E_{тр} > K_{пр}$. Из этого следует вывод: данная конструкция дорожной одежды удовлетворяет требованиям надежности и прочности по критерию упругого прогиба.

Расчет, произведенный по предлагаемой методике с использованием имитационного проектирования, показал следующее.

С целью снижения методической погрешности расчета было выбрано число имитаций (повторения расчета) равное $M = 6\,400\,000$.

Результаты машинного моделирования представлены в виде гистограммы на рисунке 2. Частоты гистограммы необходимо умножить на 100 000.

Из анализа гистограммы следует, что порядка 28% расчетных реализаций находятся ниже требуемой границы в 240 МПа. Этот результат может служить некоторым объяснением недостаточной надежности проектируемых автомобильных дорог.

В результате проведенного компьютерного эксперимента установлено, что учет случайных вариаций расчетных и конструктивных параметров при проектировании и строительстве автомобильных дорог приводит к значительному отклонению от расчетных данных детерминированной методики в сторону снижения эксплуатационных качеств дороги.

Сверхнормативные случайные отклонения являются проектными и производственными рисками, тесно коррелированными с качеством и долговечностью дорожной одежды. Риски формируются в процессе проектирования за счет ошибок объективного и субъективного свойства. Объективными ошибками, как выше было отмечено, являются вероятностная природа свойств строительных материалов, инструментальные погрешности контрольно-измерительных средств, используемых в технологии строительства. Достаточно много погрешностей методического характера – это все аналитические выражения, которые получены эмпирическим путем и представлены в графической форме в виде номограмм. В процессе использования номограмм появляется субъективная погрешность пользователя.

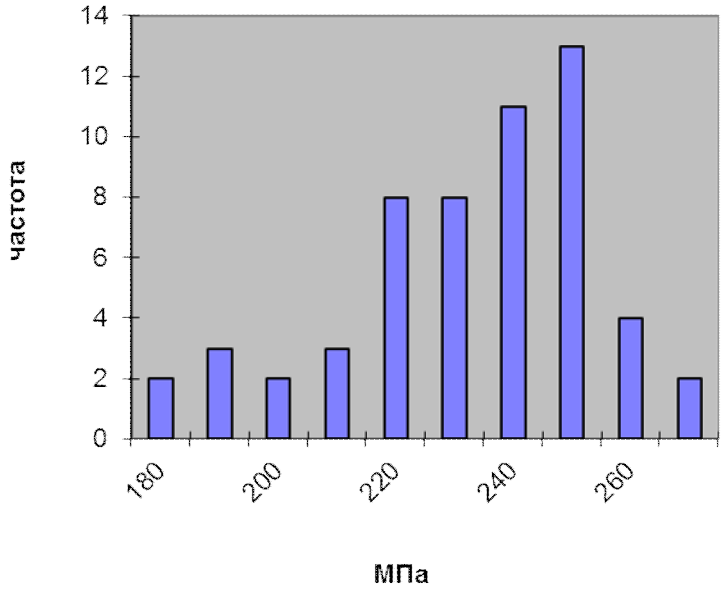


Рис. 3. Эмпирическое распределение результатов имитационного расчета прочности дорожной одежды по критерию упругого прогиба

Следовательно, проектирование автомобильных дорог осуществляется в условиях статистической неопределенности, обусловленной высокой вариацией физико-механических свойств строительных материалов. Игнорирование данного факта в процессе расчета прочностных параметров дорожной одежды приводит ошибочному завышению ее качества. Эффективным методом расчета и оценки качества проектирования дорожной одежды следует считать сквозное статистическое имитационное проектирование.

Список литературы

1. Транспортная стратегия [Электронный ресурс] / режим доступа: (http://ru.government.kz/).

2. Бабков В. Ф. Дорожные условия и безопасность движения [Текст] Учеб. пособие для вузов / В.Ф.Бабков. – М.: Транспорт, 1982. – 288 с.

3. Сильянов В. В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог [Текст] / В.В.Сильянов. – М.: Транспорт, 1984. – 287 с.

4. Сиденко В.М. Об учете неоднородностей свойств грунтовых оснований дорожных одежд [Текст] / В.М.Сиденко // Известия вузов: Строительство и архитектура. – 1959. – №6. – С. 113-116.

5. Семёнов В.А. Качество и однородность автомобильных дорог [Текст] / В.А.Семенов. – М.: Транспорт, 1989. – 125 с.

6. Игнатов О.И. Об изменчивости характеристик грунтов оснований зданий и сооружений [Текст] / О.И.Игнатов // Вопросы надежности железобетонных конструкций: Сб. науч. тр./ КуИСИ. – Куйбышев, 1975. – С.78-83.

7. Коновалов П.А. О коэффициенте изменчивости модуля деформации грунта [Текст] / П.А. Коновалов, Н.Я. Рудницкий // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1964. – №3. – С. 16-18.

8. Носов В.П. Учет изменчивости деформационных свойств земляного полотна при расчете цементобетонных покрытий [Текст] / В.П.Носов // Строительство и эксплуатация автомобильных дорог: Тр. МАДИ / Вып. 170. – М., 1979. – С.72-78.

9. Скачко А.Н. Оценка неоднородности грунтов по результатам штамповых испытаний

[Текст] /А.Н. Скачко, С.С.Шамин // Наука и техника гражданской авиации. – 1975. – №3. – С. 46-52.

10. Жигур Ю.Л. Учет вероятностно-статистической изменчивости физико-механических свойств материалов конструктивных слоев при расчете нежестких дорожных одежд: [Текст]: Автореф. дисс. … канд. техн. наук / Ю.Л.Жигур. – М.: МАДИ, 2007. – 21 с.

11. Найт Ф. Понятия риска и неопределенности//Теория и история экономических и со-циальных институтов и систем [Текст] / Ф.Найт // Альманах/ Вып. № 5. – М.: 1994. – С.23-24.

12. Нейлор Т. Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем [Текст] / Т.Нейлор. – М.: Мир, 1975. – 490 с.

13. Корнев В.А. Современные методы моделирования процессов принятия решений в системах управления [Текст]: Монография / В.А.Корнев, А.А.Макенов. – Усть-Каменогорск: Изд-во ВКГУ им. С. Аманжолова, 2008. – 148 с.