



МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ РОВНОСТИ И ПРОЧНОСТИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД НА ОСНОВАНИИ ТЕОРЕТИЧЕСКО-ПРАКТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ю. В. Буртыль*, Д. В. Капский

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Беларусь

burtyl76@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9170-5257>
d.kapsky@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9300-3857>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Существующие средства измерения упругого прогиба дорожной конструкции в большинстве стран являются низкопроизводительными для объемов сети дорог области или страны. Дефлектометры, применяемые при оценке прочности дорожных конструкций выполняют ежегодный объем измерений для сезона положительных температур примерно до 3000 км в год. Таким образом, для Республики Беларусь основной прочностной параметр дороги измеряется с периодичностью 5-7 лет на сети республиканских дорог продолжительностью около 16000 км и с еще большей периодичностью для сети дорог Казахстана, России. Складывающаяся ситуация не позволяет своевременно определять несущую способность конструкции, отсутствие информации приводит к ущербу от проезда тяжелых грузовиков, плату за проезд при снижении несущей способности, формированию критических дефектов дорожной конструкции, снижению эффективности распределения бюджетных средств при планировании ремонтов.

Материалы и методы. Методология исследований основана на существующей практике расчета общего модуля упругости, методах прогнозирования изменения ровности покрытий. Модель может быть дополнением к существующим системам оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог всех уровней.

Результаты. В статье представлена модель зависимости ровности от прочности дорожной конструкции. Исходя из условий эксплуатации и начального значения ровности дорожных покрытий предлагается выполнять расчет коэффициента прочности дорожных конструкций для разных категорий дорог и интенсивности движения. Изменение в структуре материалов вызывают деформации и неровности и показатель ровности интегрирует все виды деформаций. По этой причине предполагается, что существует зависимость между прочностью и ровностью дорожных конструкций.

Заключение. Предлагаемая модель может применяться в первую очередь для оценки прочности дорог низких категорий, на участках дорог местной сети дорог, т.е. там где диагностика не проводится или проводится с большой периодичностью. Данная модель может быть широко использована предприятиями дорожной отрасли, заказчиком для выбора в ремонт наиболее ослабленных участков дорог, подрядчиком для расчета усиления при выполнении ремонтных работ. Практическими измерениями на опытных участках подтверждается зависимость снижения прочности на участках с неудовлетворительной ровностью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: продольная ровность, коэффициент прочности, нежесткие дорожные одежды, интенсивность движения, математическая модель, несущая способность.

Статья поступила в редакцию 01.06.2022; одобрена после рецензирования 22.07.2022; принята к публикации 27.07.2022.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Буртыль Ю. В., Капский Д. В. Моделирование взаимосвязи ровности и прочности нежестких дорожных одежд на основании теоретическо-практических исследований // Вестник СибАДИ. 2022. Т. 19, № 4 (86). С. 570-583. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583>

© Буртыль Ю. В., Капский Д. В., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583>
EDN: MGXUAY

MODELLING THE RELATIONSHIP OF SMOOTHNESS AND RESISTIBILITY IN NON-RIGID PAVEMENTS BASED ON THEORETICAL AND PRACTICAL STUDIES

Yury V. Burtyl*, Denis V. Kapski
Belarusian National Technical University,
Minsk, Belarus

burtyl76@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9170-5257>
d.kapsky@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9300-3857>
*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The existing means of measuring the elastic deflection of the road structure in most countries are low-performance for the volume of the road network of a region or country. Deflectometers used in assessing the strength of road structures perform annual measurements for the season of positive temperatures up to about 3000 km per year. Thus, for the Republic of Belarus, the main strength parameter of the road is measured with a frequency of 5-7 years on the network of republican roads of about 16,000 km and with an even greater frequency for the road network of Russia and Kazakhstan. The current situation does not allow to determine the bearing capacity of the structure in a timely manner and the lack of information leads to damage from the passage of heavy trucks, fares with a decrease in bearing capacity, the formation of critical defects in the road structure, and a decrease in the efficiency of budget allocation when planning repairs.

Materials and methods. The research methodology is based on the existing practice of calculating the total modulus of elasticity, methods for predicting changes in the evenness of coatings. The model can be an addition to the existing system for assessing the transport and operational condition of roads at all levels.

Results. The article presents a model of the dependence of evenness on the strength of the road structure. Based on the operating conditions and the initial value of the evenness of road surfaces, it is proposed to calculate the strength factor of road structures. The changes in the structure of materials cause deformations and irregularities, and the evenness index integrates all types of deformations. For this reason, it is assumed that there is a relationship between strength and evenness of road structures.

Conclusion. The proposed model can be used primarily to assess the strength of roads of low categories, road sections of the local road network, i.e. where diagnostics are not carried out or are carried out with a large frequency. This model can be widely used by road industry enterprises, by a customer to select the most weakened road sections for repair, and by the contractor to calculate the reinforcement during repair work. The practical measurements in experimental areas confirm the dependence of the decrease in strength in areas with unsatisfactory evenness.

KEYWORDS: longitudinal evenness, strength factor, non-rigid pavement, traffic intensity, mathematical model, bearing capacity.

The article was submitted 01.06.2022; approved after reviewing 22.07.2022; accepted for publication 27.07.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Burtyl Y. V., Kapski D. V. Modelling the relationship of smoothness and resistibility in non-rigid pavements based on theoretical and practical studies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (4): 570-583. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583>

© Burtyl Y. V., Kapski D. V., 2022



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Предпосылки для исследований. Исследования и методы современной практики подтвердили взаимосвязь процессов формирования дефектов и деформаций с возникновением и отражением неровностей на дорожном покрытии [1, 2]. Деформации материала являются определяющим фактором снижения его прочностных характеристик и в итоге несущей способности. Суммарный объем неровностей отражает все виды разрушений и может служить интегрированным показателем эксплуатационного и безопасного состояния дорог с асфальтобетонным покрытием. Снижение прочности дорожной конструкции вызвано необратимыми деформациями, которые в свою очередь отражаются на ровности покрытия [3].

Использование упругого прогиба конструкции в расчете дорожных одежд представлялось достаточно целесообразным и удобным, учитывая накопленный фактический материал, имеющийся в дорожной отрасли в отношении этого критерия. Этот показатель длительное время являлся и является в настоящее время основой для оценки прочности дорожных одежд в процессе их эксплуатации [4].

Проблематика вопроса. Однако проблематика оценки прочности дорожных конструкций заключается в том, что:

1) измерение упругого прогиба – это дискретные измерения с установленной периодичностью (200 м и более), что не позволяет оценивать прочность на всем участке дороги, а точнее между точками измерения;

2) расчет требуемого модуля упругости проводится на основании только интенсивности движения (7) и не аккумулирует все внешние воздействия, такие как температура, влажность, периодичность и скорость нагружения;

3) расчет общего модуля упругости выполняется по номограммам, при проектировании, а при измерении инструментально на дороге применяется абсолютно другая математическая модель (13), что не позволяет достоверно прогнозировать изменение прочности;

4) пластические деформации не учитываются как вид разрушения при измерении и расчете прочностных характеристик;

5) производительность лабораторий и средств измерений упругого прогиба не позволяют охватывать при проведении диагностики

дорог значительную протяженность сети дорог в год.

Предлагаемое решение. Ровность дорожных покрытий – это критерий прежде всего безопасности и удобства движения, что очень важно для пользователей дорог. Накопление деформаций в дорожной одежде следует также рассматривать как деформационное разупрочнение, описываемое посредством соответствующего изменения макросвойств объема материала, сопровождающееся накоплением неровностей. Таким образом, неровности, отраженные на покрытии, могут характеризовать общее снижение как прочности отдельных материалов, так и надежность конструкции в целом [5]. В качестве оценочного параметра ровности последние десятилетия во многих странах использовался международный индекс ровности IRI¹. Построение математической модели между ровностью и прочностью дорожной конструкции позволит систематизировать общий подход к оценке состояния дорог, в первую очередь по объему неупругих деформаций, которые в настоящее время не учитываются

Практическое применение. Движение по покрытию с различной формой неровностей сопровождается ударами, колебаниями колес и кузова автомобиля, что вызывает увеличение динамических нагрузок на дорожные конструкции и в последствии – преждевременные разрушения. Увеличивается коэффициент динамичности и соответственно осевая нагрузка. Разработка модели прогнозирования ровности от прочности дорожной конструкции позволит более оперативно устанавливать прочностной ресурс дорожных конструкций для сети дорог.

Основной целью исследований является формирование модели зависимости коэффициента прочности дорожной конструкции и ровности покрытия. Реализация выполнения основывается на следующих задачах: разработка математической модели, опытное подтверждение математической модели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При стабильной работе уплотненных слоев покрытия и основания формирование неровностей к концу расчетного срока проходит в установленных пределах. В этом случае надежность дорожной конструкции в течение всего срока службы по приросту неровностей обеспечена при условии (1) [6]:

¹ ASTM E1170-97 (2017) Standard practices for simulating vehicular response to longitudinal profiles of traveled surfaces

$$K_{н.р.} = \frac{\Delta IRI_{норм}}{\Delta IRI_{факт}} = 1, \quad (1)$$

где $K_{н.р.}$ – коэффициент эксплуатационной надежности по условиям безопасности дорожного движения;

$\Delta IRI_{норм}$ – нормативное значение прироста неровностей дорожного покрытия за расчетный период, м/км;

$\Delta IRI_{факт}$ – фактическое значение прироста неровностей дорожного покрытия, м/км.

Для выражения (1) фактический прирост неровностей покрытия не должен превышать нормативное значение по условиям безопасности в течении расчетного срока службы.

Согласно теории Качанова-Работнова текущее состояние внутренней поврежденности образца можно охарактеризовать с помощью параметра поврежденности D , который является монотонно возрастающей функцией времени в интервале $0 \leq D \leq 1$. Параметр поврежденности интерпретируется как относительное уменьшение площади поперечного сечения вследствие возникновения внутри образца микродефектов (2) [7]:

$$D = \frac{S_{факт}}{S_{норм}}, \quad (2)$$

где $S_{факт}$ – площадь поперечного сечения, уменьшенная вследствие возникновения неупругих деформаций от внешнего воздействия за расчетный период, m^2 .

$S_{норм}$ – площадь поперечного сечения при работе материала при отсутствии неупругих деформаций и микроразрушений, m^2 ;

Деграция материала обусловлена постепенным уменьшением эффективной площади, которая несет растягивающую нагрузку и определяет сопротивляемость образца растяжению. Числитель выражения (2) возрастает с увеличением объемов внешнего воздействия.

Интенсивность движения транспортных средств – это основной фактор, вызывающий прирост деформаций и разрушений в дорожной конструкции. Именно суммарное количество расчетных автомобилей принимается в качестве расчетного параметра прочностных характеристик автомобильных дорог.

По условию накопление усталостных повреждений асфальтобетонного покрытия, с

точки зрения гипотезы Пальмгрена-Майнера, усталостные разрушения зависят от фактического и допустимого количества приложенных расчетных нагрузжений [8]. С точки зрения линейного накопления усталостных деформаций от расчетных нагрузок повреждаемость по (2) для дорожной конструкции представим в виде (3) [9]:

$$D = \frac{n}{N}, \quad (3)$$

где n – фактическое количество приложений расчетной нагрузки в течение расчетного периода, ед.;

N – максимальное количество приложений расчетной нагрузки, которые могут выдержать дорожные одежды для обеспечения заданной надежности при работе конструкции в упругой стадии, ед.

Работоспособность и безопасность дорожного покрытия, дорожной одежды зависят от изменения ровности покрытия и количества приложенных расчетных нагрузок, определяющих величину коэффициента надежности [9]. Следовательно, выражения (1) и (3) тождественны и взаимозависимы, при обеспечении срока службы приравнены (4)

$$\frac{\Delta IRI_{норм}}{\Delta IRI_{факт}} = \frac{n}{N}. \quad (4)$$

Тогда из выражения (4) фактическое значение к концу срока службы определяется выражением (5)

$$\Delta IRI_{факт} = \frac{N}{n} \times \Delta IRI_{норм}. \quad (5)$$

Для определения покрытия с учетом начальных параметров значение ровности заменим как изменение ровности (6)

$$IRI_{факт} - IRI_0 = \frac{N}{n} \times (IRI_{норм} - IRI_0), \quad (6)$$

где IRI_0 – начальное значение ровности при вводе объекта в эксплуатацию по требованию приемочного контроля, м/км (таблица 1);

$IRI_{норм}$ – нормативное значение ровности по условиям безопасности дорожного движения, м/км (таблица 2).

Таблица 1
Нормативные требования к ровности асфальтобетонных покрытий IRI_0
после ремонта (строительства)
Источник: составлено авторами.

Table 1
Regulatory requirements for smoothness of asphalt concrete pavements IRI_0
after repair (construction)
Source: compiled by the authors.

Страна (стандарт, рекомендации)	Ровность дорожных покрытий для категорий автомобильных дорог IRI_0 , м/км				
	I	II	III	IV	V
Беларусь (таблица 15, ТКП 059.1-2020), возведение	1,5	1,8	1,8	2,5	2,5
Россия (п. 16.5, СП 78.13330.2012)	2,2	2,2	2,6	2,6	-
Россия (приложение, ТР 134-03, рекомендации)	1,4	1,6	1,6	1,8	2,1
Казахстан (п. 6, ПР РК 218-03-2016, отлично)	1,8	2,3	2,3	2,3	2,3
Казахстан (п. 4.1.4, ПР РК 218-49-2005)	2,3	2,8	2,8	-	-

Таблица 2
Нормативные требования к ровности асфальтобетонных покрытий IRI_{norm}
по условиям безопасности движения
Источник: составлено авторами.

Table 2
Regulatory requirements for the smoothness of asphalt concrete pavements IRI_{norm}
for traffic safety conditions
Source: compiled by the authors.

Страна (стандарт, рекомендации)	Ровность дорожных покрытий для категорий (уровня требований/ состояния) автомобильных дорог IRI_{norm} , м/км				
	I(1)	II(2)	III (3)	IV(4)	V(5)
Беларусь (п. 6.1.1, СТБ 1291-2016, по уровням требований)]	4,1	5,5	6,2	7,3	7,5
Россия (таблица 5.1, ГОСТ Р 50597-2017)	4,0	4,5	5,0	6,0	7,5
Казахстан (п. 5.2.4, СТ РК 1912-2009, по уровню эксплуатационного состояния)	3,4	4,7	5,0	5,6	5,6

В Республике Беларусь, странах СНГ допустимое количество расчетных автомобилей (N) устанавливается исходя из суточной интенсивности движения, приведенной к расчетной с учетом ежегодного прироста за срок службы. С увеличением количества расчетных автомобилей увеличивается модуль конструкции дорожной одежды (7) [10, с. 177]:

$$E_{\text{тр}} = 98,65 \times (\lg(N) - C), \quad (7)$$

где $E_{\text{тр}}$ – требуемый модуль упругости дорожной конструкции, МПа;

C – параметр уравнения, в зависимости от расчетной нагрузки.

Выражение (6) определения фактической ровности покрытия для эксплуатационного состояния при отношении фактического и требуемого модулей упругости преобразуем в (8)

$$IRI_{\text{факт}} = \frac{E_{\text{тр}}}{E_{\text{факт}}} \times IRI_{\text{норм}} + IRI_0 \times \left(1 - \frac{E_{\text{тр}}}{E_{\text{факт}}}\right), \quad (8)$$

где $E_{\text{факт}}$ – фактический измеренный модуль упругости дорожной конструкции, МПа.

Отношение модулей упругости согласно методике на проектирование нежестких дорожных одежд определяется как коэффициент прочности дорожной конструкции (9), для данного случая фактический коэффициент прочности²:

$$K_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{факт}}}{E_{\text{тр}}}, \quad (9)$$

где $K_{\text{пр}}$ – коэффициент прочности дорожной конструкции.

С учетом отношения (9) определение фактической ровности с учетом текущего эксплуатационного состояния представляется в виде (10)

$$IRI_{\text{факт}} = \frac{1}{K_{\text{пр}}} \times IRI_{\text{норм}} + IRI_0 \times \left(1 - \frac{1}{K_{\text{пр}}}\right). \quad (10)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Построим график изменения коэффициента прочности и фактической ровности для дорог различных категорий, используя уравнение (10) и аппроксимированную линейную функцию (рисунки 1-2).

В научно-прикладной практике учеными предлагались модели зависимости ровности от прочностных характеристик. При отсутствии данных об интенсивности движения минимальный модуль упругости в исследованиях Е. В. Каленовой предлагается определять исходя из максимально допустимой ровности покрытия [11]:

$$E_{\text{min}} = -11,477 \times S + 294,77, \quad (11)$$

где E_{min} – минимальный требуемый модуль упругости дорожной конструкции, МПа;

S – допустимая ровность покрытия к концу срока службы дорожной одежды, измеренная по 3-метровой рейке, мм.

По данным исследований О. А. Красикова установлено, что величина относительного изменения ровности покрытия зависит от прочности и однородности дорожной одежды (12), характеризуемой стандартом отклонения модуля упругости, а также суммарной интенсивностью движения [12]:

$$S_t = S_o \left(1 + c \cdot E_{\text{min}}^d \cdot N_c(t)^{a \cdot E_{\text{min}}^b}\right), \quad (12)$$

где S_t – прогнозируемое значение ровности, см/км;

S_o – начальное значение ровности покрытия, см/км;

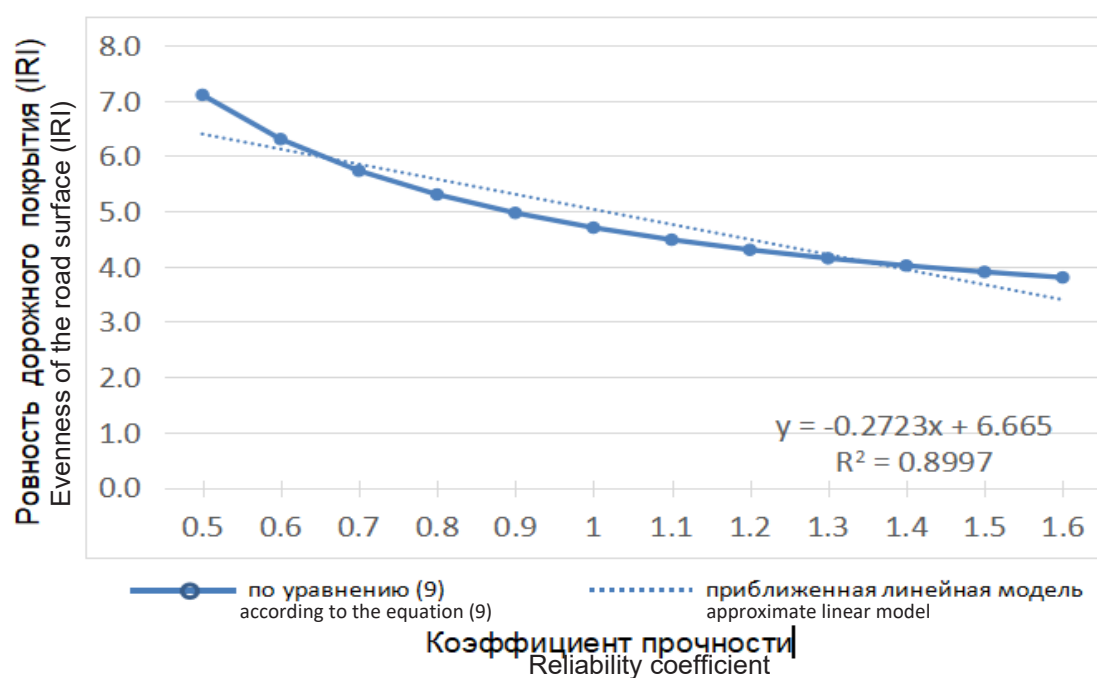
E_{min}^d – минимальный модуль упругости с заданной надежностью при односторонней доверительной вероятности, МПа;

$N_c(t)$ – суммарная интенсивность, приведенная к расчетной нагрузке, авт./сут;

t – время службы дорожной одежды, лет;

a, b, c, d – параметры, значения которых устанавливаются на основании эксперимента.

² Афиногенов О. П. Конструирование и расчет дорожных одежд: учебное пособие / О. П. Афиногенов, С. В. Ефименко, В. Н. Ефименко; под ред. С. В. Ефименко. 2-е изд., доп. и перераб. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2020. 444 с.



a – III категория a – III category

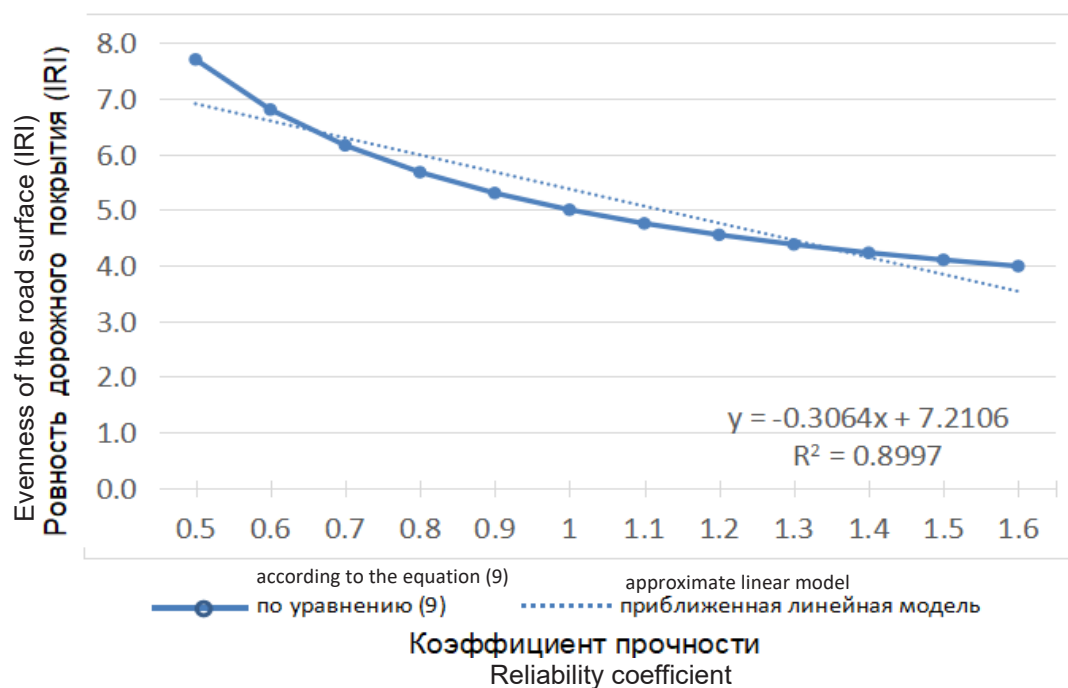


Рисунок 1 – Прогнозное изменение ровности дорожного покрытия при изменении прочности дорожной конструкции для дорог II-III категории
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Predictive change in the smoothness of the road surface with a change in the resistibility of the road structure for roads of 2-3 categories
Source: compiled by the authors.

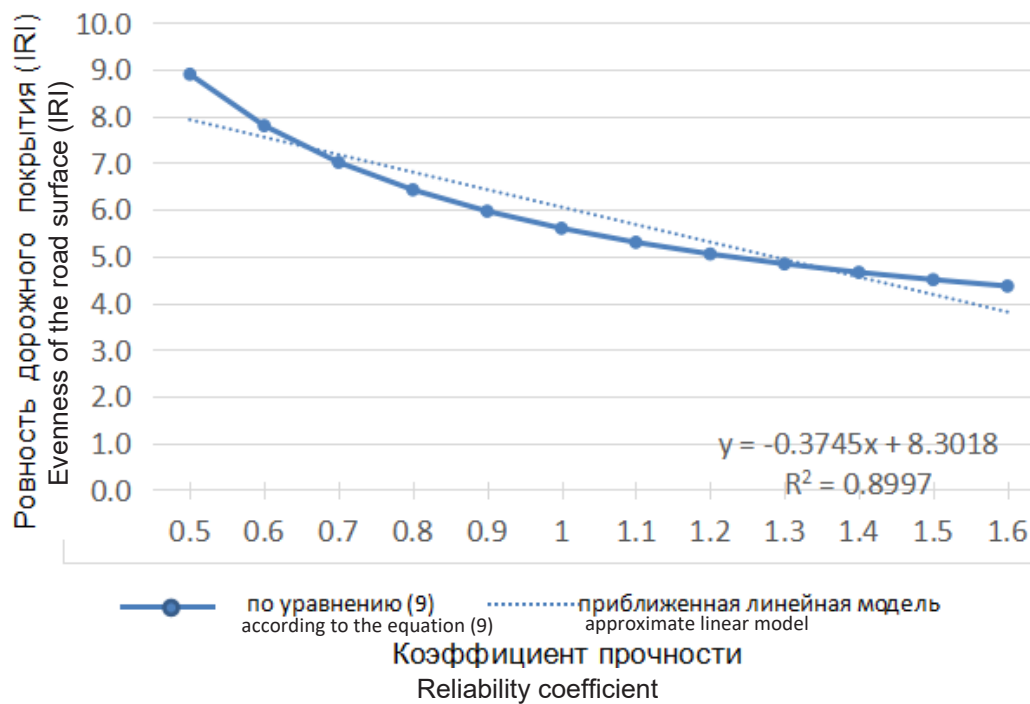


Рисунок 2 – Прогнозное изменение ровности дорожного покрытия
изменении прочности дорожной конструкции для дорог IV категории
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Predictive change in the smoothness of the road surface,
change in the strength of the road structure for roads of 4 category
Source: compiled by the authors.

Испытания по измерению величины упругого прогиба покрытия под воздействием динамического нагружения проводились дефлектометром падающего груза PRI2100 FWD по ГОСТ 32729-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Метод измерения упругого прогиба нежестких дорожных одежд для определения прочности» (рисунок 3).

В качестве объектов исследований принимались опытные участки республиканских автомобильных дорог. Модуль упругости конструкции (E_p) определялся по формуле (13) [13]:

$$E_p = \frac{p \cdot D(1 - \mu^2)}{l_f}, \quad (13)$$

где p – удельное давление, $p=0,6$ МПа;

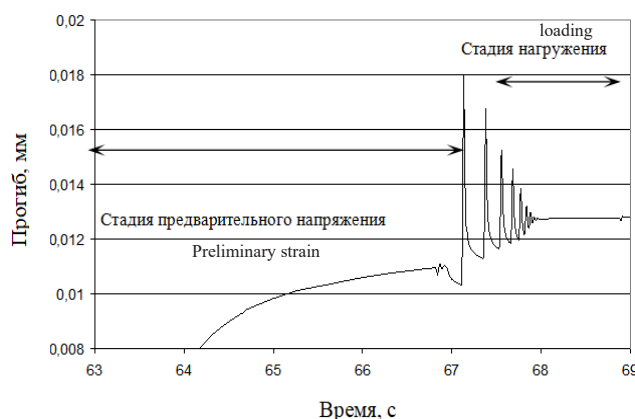
D – диаметр круга, эквивалентный отпечатку штампа, $D = 0,33$ м;

μ – коэффициент Пуассона, $\mu = 0,33$;

l_f – измеренный и далее приведенный к расчетной нагрузке упругий прогиб дорожной одежды по формуле (14), м



а – установка измерения
упругого прогиба
а – Deflection measurement device



б – деформация при проведении
испытаний
b – Deformation during testing

Рисунок 3 – Установка динамического нагружения – дефлектометр падающего груза PRI 2100 FWD для измерения упругого прогиба дорожной конструкции
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Dynamic loading setup - PRI 2100 FWD drop load deflectometer for measuring the elastic deflection of a road structure
Source: compiled by the authors.

$$l_f = l \cdot \frac{Q_p}{Q_f}, \quad (14)$$

где l – измеренный упругий прогиб дорожной одежды, м;

Q_p – расчетная нагрузка, $Q_p = 50$ кН;

Q_f – фактическая нагрузка, кН.

В международном сообществе в качестве одного из способов принято оценивать неровности дорожных покрытий по индексу IRI. Международный индекс IRI – это математическое представление накопленного хода подвески транспортного средства, деленное на пройденное расстояние [14].

Индекс IRI имеет единицы уклона профиля: метр на километр или миллиметр на метр³. Ровность покрытия по индексу IRI измерялось установкой «Профилограф» (рисунок 4).

Принцип работы установки основан на отражении лазерного луча от поверхности по-

крытия. Основным измерительным органом при работе установки «Профилограф» являются лазерные сенсоры.

Измерения проводились на опытных участках республиканских дорог (13 участков), при общем количестве измерений 2477 по ГОСТ 33101-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Покрывтия дорожные. Методы измерения ровности». По результатам измерений на каждом участке строились кумулятивные кривые и для уровня надежности 0,9 принимались значения IRI и E_p на участке⁴. Оценка на долговечность дорог может быть разработана и внедрена на основе базы данных ровности дорог без дорогостоящего сбора данных о воздействии конкретного автомобиля [15]. Результаты проведения испытаний приведены в таблице 3⁵.

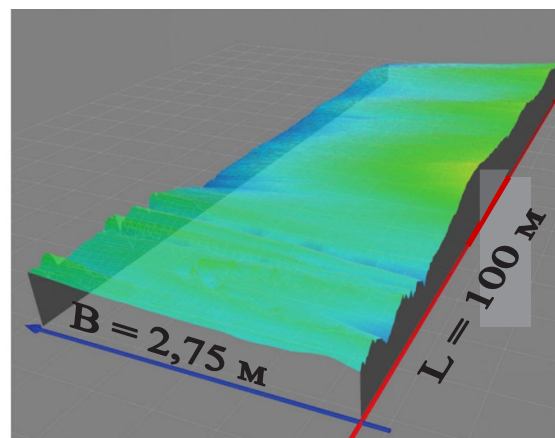
³ ASTM E950 / E950M-09 Standard test method for measuring the longitudinal profile of traveled surfaces with an accelerometer established inertial profiling reference

⁴ Щеколдин В. Ю. Развитие методов классификации на основе анализа кумулятивных кривых / В. Ю. Щеколдин, М. Ю. Лысенко // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП - 2018: материалы междунар. научно-техн. конф., Новосибирск 2-6 окт. 2018 г.: в 8 т. / Новосибирский гос.техн. ун-т ; редкол. А.А. Батаев [и др.]. Новосибирск, 2018. С. 97–100.

⁵ Отчет о транспортно-эксплуатационном состоянии и назначении ремонтных мероприятий на 2017 год сети республиканских автомобильных дорог Республики Беларусь



а – измерительная установка
«Профилограф»
а – Profilograph measuring device



б – построение профиля при
измерении установкой «Профилограф»
b – profiling by measuring with the Profilograph

Рисунок 4 – Установка измерения ровности дорожных покрытий
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Installation for measuring the smoothness of road surfaces
Source: compiled by the authors.

Таблица 3

Результаты измерений и расчета ровности покрытия, модуля упругости
Источник: составлено авторами.

Table 3

Results of measurements and calculation of the smoothness, modulus of reliability
Source: compiled by the authors.

Титул дороги	Участок, км	Кол-во измерений	Модуль упругости, МПа	Ровность покрытия, м/км
М-7	57,823-62	58	222	5,8
М-5	21,243-32,2	111	305	3,9
Р-10	3,9-19	219	287	5,3
Р-101	0-25,7	258	154	6,6
Р-105	0-17,8	253	165	7,1
Р-107	0,57-11,7	160	193	5,4
Р-108	4,560-16,5	161	288	4,1
Р-120	55-72,3	173	200	7,0
Р-123	1-15,7	147	195	6,1
Р-34	5,5-33,7	283	173	8,1
Р-35	5-20	430	217	7,4
Р-56	2-10,8	123	184	6,7
Р-77	1,3-8,3	101	221	5,2

Графическое построение корреляционной зависимости методом наименьших квадратов по полученным результатам приведено на рисунке 5 [16, 17].

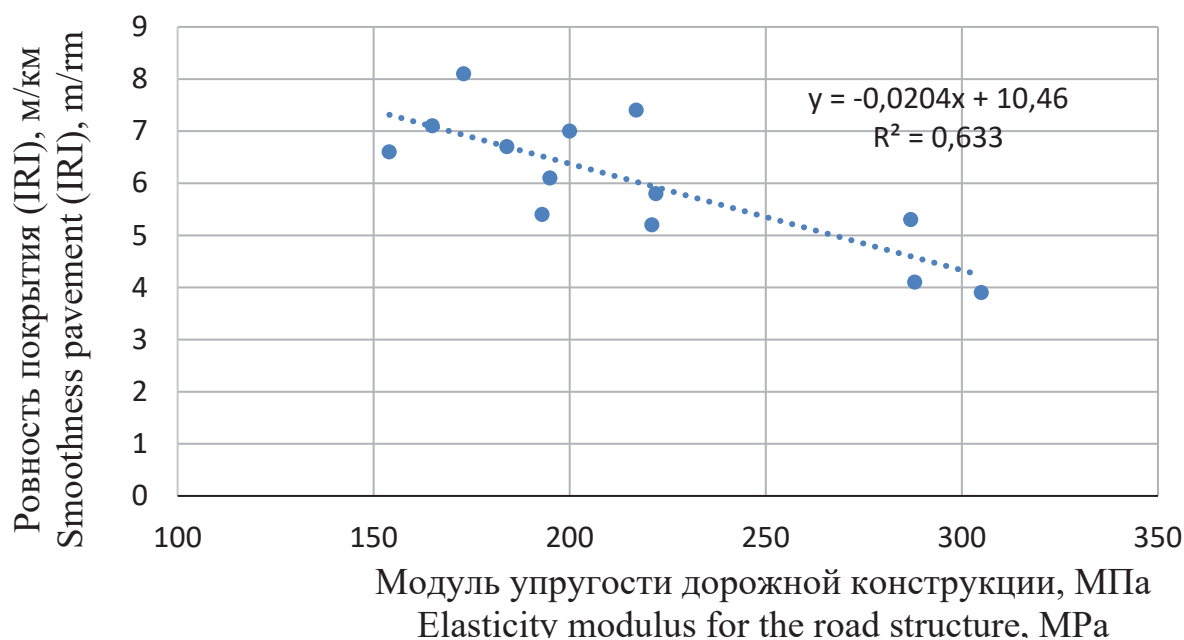


Рисунок 5 – Корреляционная зависимость ровности и модуля упругости дорожной конструкции на опытных участках
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Correlation dependence of the smoothness and elasticity modulus for the road structure in the experimental areas
Source: compiled by the authors.

Для опровержения нулевой гипотезы $H_0: r = 0$, для проверки значимости коэффициента корреляции проверяется условие (14) [18, с. 86]:

$$r > r_{\alpha, n-2}, \quad (15)$$

где r – коэффициент корреляции, полученный по результатам построения модели методом наименьших квадратов;

$r_{\alpha, n-2}$ – табличное значение коэффициента корреляции по таблице Фишера - Иейтса при уровне значимости α и количестве измерений n .

Расчет коэффициента корреляции: $r = \sqrt{R^2} = \sqrt{0,633} = 0,795$. Для уровня значимости $\alpha=0,01$ и количестве измерений 13 значение коэффициента корреляции по таблице Фишера-Иейтса составляет 0,684. Нулевая гипотеза не подтверждается и коэффициент корреляции значим.

Оценка статистической значимости линейной регрессии выполняется при опровержении нулевой гипотезы $H_0: \beta_0=0$, фиксирующей значение наклона линии регрессии с использованием F-критерия Фишера. Линейная связь между ровностью (IRI) и коэффициентом прочности K подтверждается при выполнении неравенства (15) ⁶:

$$F > F_{\alpha, n-2}, \quad (16)$$

где F – фактическое значение F-критерия по (16);

$F_{\alpha, n-2}$ – табличное значение статистики Фишера при уровне значимости α ;

$$F = \frac{r^2 \cdot (n - m - 1)}{(1 - r^2) \cdot m}, \quad (17)$$

где r – коэффициент корреляции;
 n – количество измерений;

⁶ Ивченко Г. И. Введение в математическую статистику: учебник / Г. И. Ивченко, Ю. И. Медведев. М.: Издательство ЛКИ, 2010. 600 с.

m – число степеней свободы, для линейной модели ($m = 1$).

Фактическое значение F-критерия по расчету:

$$F = \frac{0,795^2(13-1-1)}{(1-0,795^2) \times 1} = 18,89$$

Табличное значение статистики Фишера при уровне значимости $\alpha=0,01$ определяется равным 9,650. Условие (15) выполняется, линейная модель значима.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка модели обоснована необходимостью корректировки существующих методик расчетов конструкций дорожных одежд в связи с изменившимися условиями движения и составами транспортных потоков.

Математическая модель зависимости ровности покрытия от прочности дорожных одежд позволит скорректировать затраты для выполнения значительных объемов изысканий при оценке прочности в рамках диагностики. Измерение продольной ровности на дорогах широко выполняется дорожными службами с высокой производительностью применяемых средств измерения. Полученные результаты могут служить основой для оценки прочности дорожных конструкций особенно для дорог невысоких категорий. При выполнении измерений ровности приборами ТЭД-2М, ИПВ и другими, значения ровности допускается приводить к международному индексу ровности по широко рассматриваемым в научном сообществе и в нормативных документах математическим зависимостям. Преимущество представленной модели перед аналогичными заключается в минимизации включенных в модель переменных и получение информации непосредственно по результатам измерений. При применении в расчетах $\sqrt{R^2} = \sqrt{0,633} = 0,795$ начальной и предельно допустимой ровности по выбранному для пользователя интервале модель изменяется, и прогноз выполняется для конкретного участка дороги. Выполненные испытания на опытных участках эксплуатируемых дорог позволяют подтвердить зависимость ухудшения ровности при снижении прочности конструкции с высоким коэффициентом корреляции ($r = 0,795$). На основании полученных расчетов и критериев становится возможным оперативно определить несущую способность дорожной конструкции, обосновать проведение ремонтных мероприятий и сроков их выполнения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Soncim S. P., Oliveira I. C., Santos F. B. Development of probabilistic models for predicting roughness in asphalt pavement // *Road materials and pavement design*. 2017. 19 (6). pp. 1-10.
2. Múčka P. International roughness index specifications around the world / Peter Múčka // *Road materials and pavement design*. 2016. 18(4). pp. 929-965.
3. Тиратурян А. Н. Оценка деградации прочности жестких дорожных конструкций на основе натурных измерений на участке автомобильной дороги М4 "Дон" п.Тарасовский / А. Н. Тиратурян, С. А. Ольховой // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 2. Режим доступа: URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/4160. Дата доступа: 28.05.22.
4. Балабанов В. Б. Определение модуля упругости дорожной одежды по динамическим методам испытаний / В. Б. Балабанов, Фам Ши Куан // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2019. № 1. Т. 9. С. 60-69.
5. Mario De Luca Evaluation of runway bearing capacity using international roughness index // *Transportation Research Procedia*. 2020. № 45. P. 119-126.
6. Буртыль Ю. В. Критерии эксплуатационной надежности автомобильных дорог с жесткими дорожными одеждами / Ю. В. Буртыль // *Автомобильные дороги и мосты*. 2012. № 2. С. 21-31.
7. Степанова Л. В. Параметр поврежденности Ю. Н. Работнова и описание длительного разрушения: результаты, современное состояние, приложение к механике трещин и перспективы / Л. В. Степанова, С. А. Игонин // *Прикладная механика и техническая физика*. 2015. Т.56. № 2. С. 133-145.
8. Стрижиус В. Е. Механизмы накопления усталостного повреждения при сложном программном нагружении слоистых композитов: существующие гипотезы / В. Е. Стрижиус // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2019. № 4. Т. 25. С. 71-82.
9. Углова Е. В. Анализ критериев расчета жестких дорожных одежд в условиях воздействия интенсивного транспортного потока / Е. В. Углова, О. А. Шило // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»* 2018. № 3. Режим доступа: URL: <https://t-s.today/PDF/14SATS318.pdf>. Дата доступа: 28.05.22.
10. Буртыль Ю. В. Прогнозирование ровности дорожных покрытий / Ю. В. Буртыль, М. Г. Солодкая, Я. Н. Ковалев // *Наука и техника*. 2021. № 3. С. 216-223.
11. Смирнов А. В. Расчет дорожных конструкций автомагистралей на прочность и выносливость: монография / А. В. Смирнов: СибАДИ. Омск: СибАДИ, 2012. 116 с.
12. Герцог В. Н. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности дорожных покрытий / В. Н. Герцог, Г. В. Долгих, Н. В. Кузин // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. № 5. С. 45-57.

13. Красиков О. А. Новые математические модели прогнозирования ровности дорожных покрытий / О. А. Красиков // Дороги и мосты. 2016. № 1 (35). С. 12-17.

14. Красиков О. А. Использование показателей дефлектометра для оценки прочности нежестких дорожных одежд / О. А. Красиков, И. Н. Косенко // Дороги и мосты. 2020. № 1 (43). С. 51-64.

15. Ferris J. B. Establishing chassis reliability testing targets based on road roughness / John B. Ferris, Jerry L. Larsen // International Journal of Materials and Product Technology. 2002. Vol. 17. Nos 5/6. pp. 453-461.

16. Рассел, Джесси Обобщенный метод наименьших квадратов / Джесси Рассел. М.: VSD, 2013. 971 с.

17. Корочкин А. В. Прогнозирование требуемой прочности дорожной одежды автомобильных магистралей / А. В. Корочкин // Вестник МАДИ. 2020. № 1 (60). С. 66-71.

18. Теория вероятностей и математическая статистика / Мхитарян В.С. [и др.]; под общ. ред. В.С. Мхитаряна. М.: Московский междун. ин-т эконометрики, информатики, финансов и права. 2003. 130 с.

REFERENCES

1. Soncim S. P., Oliveira I. C., Santos F. B. Development of probabilistic models for predicting roughness in asphalt pavement. *Road materials and pavement design*. 2017; 19 (6): 1-10.

2. Múčka P. International roughness index specifications around the world. *Road materials and pavement design*. 2016; 18 (4): 929-965.

3. Tiraturyan A. N., Tiraturyan S. A. Olhovoi Ocenka degradacii prochnosti nejestkih dorojnih konstrukcii na osnove naturnih izmerenii na uchastke avtomobilnoi dorogi M4 "Don" p. [Assessment of strength degradation of non-rigid road structures based on full-scale measurements on the road section of the Don M4, Tarasovsky settlement]. *Inženierii vestnik Dona*. 2017; 2. Available at: URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/4160. Accessed at: 28.05.22. (In Russ.)

4. Balabanov V. B., Fam Shi Kuan Opredelenie modulya uprugosti dorojnoi odejdi po dinamicheskim metodam ispitanii [Determination of modulus of road pavement elasticity by dynamic test methods/V. B. Balabanov, Pham Shi Quan]. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitelstvo. Nedvijimost*. 2019; 1. T. 9: 60-69. (In Russ.)

5. Mario De Luca Evaluation of runway bearing capacity using international roughness index. *Transportation Research Procedia*. 2020; 45: 119-126.

6. Burtul Yu. V. Kriterii ekspluatacionnoi nadezhnosti avtomobilnih dorog s nejestkimi dorojnimi odejdami [Criteria for operational reliability of motor roads with non-rigid road garments]. *Avtomobilnie dorogi i mosti*. 2012; 2: 21-31. (In Russ.)

7. Stepanova L. V., Igonin S. A. Parametr povrejdennosti Yu. N. Rabotnova i opisanie dlitel'nogo razrusheniya_rezultati_sovremennoe sostoyanie_priloge-

nie k mehanike treschin i perspektivi [Y. N. Rabotnov damage parameter and description of long-term failure: results, current state, application to fracture mechanics and perspectives]. *Prikladnaya mehanika i tekhnicheskaya fizika*. 2015; T.56. no 2: 133-145. (In Russ.)

8. Strijus V. E. Mehanizmi nakopleniya ustalostnogo povrejdeniya pri slojnom programmnom nagrujenii sloistih kompozitov: suschestvuyuschie gipotezi [Mechanisms of fatigue damage accumulation under complex program loading of layered composites: existing hypotheses]. *Nauchno_tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennie i inzhenerne nauki*. 2019; 4. T. 25: 71-82. (In Russ.)

9. Uglova E. V., Shilo O. A. Analiz kriteriev rascheta nejestkih dorojnih odejd v usloviyah vozdeistviya intensivnogo transportnogo potoka [Analysis of criteria for calculation of non-rigid road pavements under conditions of intensive traffic flow]. *Internet-jurnal «Transportnie sooruzheniya»*. 2018; 3. Available at: URL: https://t_s.today/PDF/14SATS318.pdf. 28.05.22. (In Russ.)

10. Burtul Yu. V., Solodkaya M. G., Kovalev Ya. N. Prognozirovaniye rovnosti dorojnih pokritii [Forecasting the evenness of road surfaces]. *Nauka i tekhnika*. 2021; 3: 216-223. (In Russ.)

11. Smirnov A. V. Raschet dorojnih konstrukcii avtomagistralei na prochnost i vinoslivost: monografiya [Calculation of road structures of motorways for strength and endurance: monograph]. SibADI. Omsk: SibADI, 2012. 116 p. (In Russ.)

12. Gercog V. N., Dolgih G. V., Kuzin N. V. Raschet dorojnih odejd po kriteriyam rovnosti. Chast 1. Obosnovanie norm rovnosti dorojnih pokritii [Calculation of road pavements by flatness criteria. Part 1. Justification of Levelness Standards for Road Surfaces]. *Inzhenerno-stroitel'nii jurnal*. 2015; 5: 45-57. (In Russ.)

13. Krasikov O. A. Novie matematicheskie modeli prognozirovaniya rovnosti dorojnih pokritii [New mathematical models for predicting the evenness of road surfaces]. *Dorogi i mosti*. 2016; 1 (35): 12-17. (In Russ.)

14. Krasikov O. A., Kosenko I. N. Ispolzovanie pokazatelei deflektometra dlya ocenki prochnosti nejestkih dorojnih odejd [Use of deflector indicators to assess the strength of non-rigid road pavements]. *Dorogi i mosti*. 2020; 1 (43): 51-64. (In Russ.)

15. Ferris J. B., Larsen Jerry L. Establishing chassis reliability testing targets based on road roughness. *International Journal of Materials and Product Technology*. 2002; Vol. 17. Nos 5/6: 453-461. (In Russ.)

16. Рассел, Дзхесси Обобщенный метод наименьших квадратов [Generalized least squares method]. Moscow, VSD, 2013. 971 p.

17. Korochkin A. V. Prognozirovaniye trebuemoi prochnosti dorojnoi odejdi avtomobilnih magistralei [Prediction of the required road pavement strength of highways]. *Vestnik MADI*. 2020; 1 (60): 66-71. (In Russ.)

18. Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika [Probability Theory and Mathematical Statistics]. pod obsch. red. V. S. Mhitaryana. Moscow: Moskovskii mejdun. in-t ekonometriki, informatiki, finansov i prava. 2003: 130. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Буртыль Ю. В. Разработана математическая модель, проведен эксперимент, получены закономерности и обоснованы выводы,

Капский Д. В. Описаны существующие модели, обозначены направления дальнейшего развития, корректировалось заключение

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Yury V. Burtyl. A mathematical model has been developed, an experiment has been carried out, regularities have been obtained and conclusions have been substantiated.

Denis V. Kapski. Current models are described, directions for further development are indicated, the conclusion was corrected.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Буртыль Юрий Валерьевич – старший преподаватель.

Капский Денис Васильевич – д-р техн. наук, проф., декан автотракторного факультета.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yury V. Burtyl – Senior Lecturer.

Denis V. Kapski – Dr. of Sci., Professor, Dean of the Automotive and Tractor Faculty.