

Контроль и испытания

Controlling and testing

Научная статья
УДК 629.33.004 + 519.24
DOI: 10.14529/engin260206

ПРОВЕДЕНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАВИСИМОСТИ ОБОБЩЕННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ-САМОСВАЛОВ

С.С. Сайдуллозода¹, saivali.saidullo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9663-2453>
К.В. Гаврилов², gavrilovkv@susu.ru
И.К. Умурзаков², asp22uik733@susu.ru

¹ Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, Душанбе, Республика
Таджикистан

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются основные этапы планирования и последующей статистической обработки данных многофакторного эксперимента, направленного на определение обобщенного динамического коэффициента как функции эксплуатационных условий. В качестве ключевых факторов исследованы показатели состояния дорожного покрытия, интенсивность и характер маневрирования, а также параметры скоростного режима. Основной задачей проведенного эксперимента являлось построение адекватной математической модели в виде регрессионного уравнения, устанавливающей количественную взаимосвязь между обобщенным динамическим коэффициентом и указанными эксплуатационными параметрами. В исследовании использовался метод многомерного экспериментального планирования с вариациями ключевых эксплуатационных параметров, включая нагрузку, скорость движения и состояние дорожного покрытия. Полученные результаты были проанализированы с использованием математического моделирования, регрессионного анализа и дисперсионного анализа, что позволило установить достоверность полученных зависимостей и статистическую значимость факторов. В результате разработана математическая модель, позволяющая определить количественное влияние исследуемых параметров и представить их в виде обобщенного динамического коэффициента. Выявлены наиболее значимые эксплуатационные факторы, существенно влияющие на динамические характеристики автомобилей-самосвалов. Определены ключевые эксплуатационные параметры, оказывающие наибольшее влияние на динамические характеристики автомобилей-самосвалов. Полученные результаты могут служить основой для совершенствования существующих методов расчёта эксплуатационных показателей, а также для повышения эффективности функционирования самосвалов при работе в разнообразных дорожных условиях.

Ключевые слова: планирование многофакторного эксперимента, коэффициент регрессии, уравнение регрессии, качество дороги, манёвренность, высота над уровнем моря

Для цитирования: Сайдуллозода С.С., Гаврилов К.В., Умурзаков И.К. Проведение многофакторного эксперимента для оценки зависимости обобщенного динамического коэффициента от условий эксплуатации автомобилей-самосвалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2026. Т. 26, № 2. С. 68–78. DOI: 10.14529/engin260206

Original article

DOI: 10.14529/engin260206

CONDUCTING A MULTIFACTOR EXPERIMENT TO ASSESS THE DEPENDENCE OF THE GENERALIZED DYNAMIC COEFFICIENT ON THE OPERATING CONDITIONS OF DUMP TRUCKS

S.S. Saydullozoda¹, saivali.saidullo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9663-2453>

K.V. Gavrilov², gavrilovkv@susu.ru

I.K. Umurzakov², asp22uik733@susu.ru

¹ Tajik Technical University named after academician M. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. This paper examines the key stages of planning and subsequent statistical processing of data from a multivariate experiment aimed at determining the generalized dynamic coefficient as a function of operating conditions. Key factors examined included road surface conditions, maneuvering intensity and nature, and speed parameters. The primary objective of the experiment was to construct an adequate mathematical model in the form of a regression equation establishing a quantitative relationship between the generalized dynamic coefficient and the specified operating parameters. The study used a multivariate experimental design method with variations in key operating parameters including load, driving speed and road surface conditions. The results were analyzed using mathematical modeling, regression, and variance analysis, allowing assessment of the reliability of the dependencies and the statistical significance of the factors. As a result, a mathematical model was developed that makes it possible to determine the quantitative influence of the studied parameters and present them in the form of a generalized dynamic coefficient. The most significant operational factors that significantly affect the dynamic characteristics of dump trucks have been identified. Key performance parameters that have the greatest impact on the dynamic performance of dump trucks have been identified. The results obtained can serve as a basis for improving existing methods for calculating performance indicators, as well as for increasing the efficiency of dump trucks operating in a variety of road conditions.

Keywords: planning a multivariate experiment, regression coefficient, regression equation, road quality, maneuverability, altitude above sea level

For citation: Saydullozoda S.S., Gavrilov K.V., Umurzakov I.K. Conducting a multifactor experiment to assess the dependence of the generalized dynamic coefficient on the operating conditions of dump trucks. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2026;26(2):68–78. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin260206

Введение

Эксплуатация автомобилей-самосвалов в карьерных условиях строительства Рогунской ГЭС имеет свои особенности и в этой связи представляют научный и практический интерес вопросы изучения влияния конструктивных, эксплуатационных и природно-климатических факторов на надежность данных видов транспортных средств [1–11]. Нами в качестве параметра планирования многофакторного эксперимента (МФЭ) был выбран обобщенный динамический коэффициент (ОДК).

На первом этапе проводился МФЭ с целью определения диапазона изменения и влияния каждого фактора на ОДК.

На втором этапе на основе статистической обработки МФЭ была проведена проверка адекватности уравнения регрессии, предложена математическая модель в натуральном масштабе, проведены проверочные опыты.

План эксперимента был расширен до второго порядка. Обработка полученных данных позволила сформировать математическую модель в натуральных единицах измерения, которая более адекватно отражает зависимость ОДК от показателей качества дорожного покрытия, частоты и характера манёвров, а также скоростного режима движения.

Проведение многофакторного эксперимента

Одним из эффективных способов оценки эффективности функционирования системы ВАДС в горных условиях эксплуатации является изучение линейного расхода топлива. В данном случае такие параметры, как масса перевозимого груза M_{cp} (т), коэффициент качения k_k , сложность условий эксплуатации в горах, которая учитывается динамическим коэффициентом k_d или обобщается динамическим коэффициентом k_D , являются наиболее значимыми факторами [1–8].

Расчёт обобщённого динамического коэффициента k_d для маршрута производится по формуле

$$k_{di} = P_{oi} / P_{on}, \quad (1)$$

где P_{oi} – обобщённая оценка качества i -го участка дороги (м/км), P_{on} – принятое стандартное значение обобщённого показателя качества дороги (м/км).

Значение показателя P_{oi} [3–6] вычисляется по формуле

$$P_{oi} = KP_{oi} \cdot K_{obi} \cdot K_{zi}, \quad (2)$$

где KP_{oi} – обобщённый (комплексный) показатель, отражающий совокупность транспортно-эксплуатационных характеристик автомобильной дороги V категории, функционирующей в горных условиях [3–6]; K_{obi} – коэффициент, характеризующий степень технической оснащённости участка дороги (принимается $K_{obi} = 1$); K_{zi} – коэффициент, оценивающий уровень эксплуатации и поддержание дорожного покрытия (принимается $K_{zi} = 1$).

С целью анализа влияния отдельных параметров и характеристик дорожных условий на величину комплексного показателя качества KP_{oi} для каждого типового участка дороги рассчитываются частные коэффициенты, обеспечивающие достижение расчётной скорости движения.

Комплексный показатель KP_{oi} , применяемый в выражении (2), определяется следующим образом:

$$KP_{oi} = \sum_{i=1}^n K_{pci}^{umoz} \cdot l_i / L, \quad (3)$$

где K_{pci}^{umoz} – коэффициент, учитывающий сложность условий дорожного движения. Его величина формируется с учётом геометрических характеристик трассы (продольный профиль, уклоны, радиусы кривых, ширина обочин), состояния дорожных элементов, интенсивности транспортного потока, условий видимости, а также прочностных характеристик покрытия; l_i – протяжённость участка, для которого определялся коэффициент расчётной скорости, км; L – суммарная длина исследуемого маршрута, км.

Общий динамический коэффициент для данной дороги определяется по формуле

$$k_D = 1 - k_d. \quad (4)$$

Количественные значения показателей качества дорожного покрытия и соответствующего обобщённого динамического коэффициента, рассчитанные как в результате теоретических расчётов, так и в ходе экспериментальных исследований, выполненных при анализе условий эксплуатации карьерной техники на горных автодорогах, задействованных при строительстве Рогунской ГЭС, представлены в табл. 1.

Согласно рисунку, обобщённый динамический коэффициент, служащий мерой сложности эксплуатации, напрямую зависит от геометрических параметров дороги (продольный профиль, величина уклона, радиусы кривых, ширина обочины), состояния дорожных элементов (покрытие, обочины), параметров транспортного потока (интенсивность, скорость, маневренность, условия видимости) и высоты объекта над уровнем моря.

На основании результатов экспериментальных и теоретических исследований, выполненных с учётом специфики строительства Рогунской ГЭС, установлено, что обобщённый динамический коэффициент k_D , отражающий совокупную сложность эксплуатации техники в условиях горного карьера, изменяется в пределах 0,12–0,13 [12–16].

В условиях эксплуатации автомобилей-самосвалов на Рогунской ГЭС установлено, что значение обобщённого динамического коэффициента (ОДК) определяется совокупным влиянием трех основных факторов: средней скорости автомобилей-самосвалов за поездку V_{cp} (км/ч); шеро-

ховатости (неровность) дорожного покрытия N_δ (м/км); а также количества маневров, происходящих на 1 км пути n_m (шт/км).

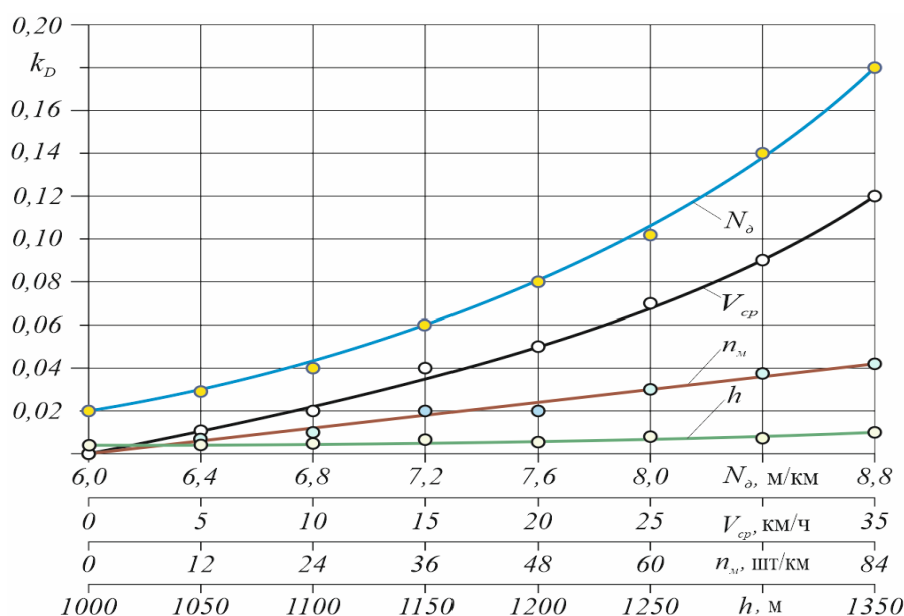
Таблица 1

Результаты аналитических расчётов и экспериментальных исследований показателей качества дорожного покрытия и обобщённого динамического коэффициента

Table 1

Results of analytical calculations and experimental studies of road surface quality indicators and the generalized dynamic coefficient

№ эксперимента	Параметр			
	$\Pi_{\delta n}$	$\Pi_{\delta i}$	k_d	k_D
1	0,250	0,230	0,882	0,12
2	0,250	0,226	0,871	0,13
3	0,250	0,228	0,882	0,12
4	0,250	0,227	0,871	0,13



Вариация коэффициента k_D при различных условиях эксплуатации
Variation of the coefficient k_D under different operating conditions

Сокращение количества необходимых опытов при определении ОДК было достигнуто за счет замены серии однофакторных экспериментов единым многофакторным экспериментом, в котором все факторы варьируются одновременно. В качестве наглядного примера реализации рассматриваемого подхода используется полный факторный эксперимент (ПФЭ), представляющий собой совокупность опытов, включающих все возможные уникальные сочетания уровней варьируемых факторов.

Процессы планирования эксперимента и последующей обработки полученных данных, как правило, осуществляются последовательно, в несколько этапов [12–17].

Расчет факторного кодирования

Поскольку исследуемые факторы могут иметь различные размерности и существенно отличаться по порядку величин, при обработке результатов многофакторного эксперимента возникает необходимость их приведения к унифицированному виду. Для этого применяется процедура кодирования (нормализации факторов).

Суть данной процедуры заключается в преобразовании натуральных (фактических) значений факторов в безразмерные кодированные величины, для которых диапазон изменения ограничивается интервалом от -1 до $+1$.

Кодированное значение фактора x_i определяется по выражению

$$X_i = \frac{X_{nat} - X_o}{I}, \quad (5)$$

где X_{nat} – натуральное значение фактора; X_o – исходный уровень фактора; I – интервал изменения фактора.

Основной уровень фактора определяется как середина интервала его изменения, то есть среднее арифметическое крайних значений:

$$X_o = \frac{X_{max} + X_{min}}{2}, \quad (6)$$

где X_{max} , X_{min} – соответственно верхний и нижний пределы фактора.

Половина разницы между максимальным и минимальным значениями фактора задаёт интервал его варьирования.

$$I = \frac{X_{max} - X_{min}}{2}. \quad (7)$$

Из соотношения (5) следует, что в кодированной системе координат нижний уровень фактора соответствует значению « -1 », основной – « 0 », а верхний « ± 1 ».

На стадии планирования эксперимента для установления соответствия между натуральными и кодированными значениями факторов формируется рабочая матрица планирования.

Пример такой матрицы для рассматриваемого многофакторного эксперимента приведён в табл. 2. Целью данного исследования являлось получение математической зависимости обобщённого динамического коэффициента (ОДК) от основных эксплуатационных параметров: средней скорости движения транспортного средства, неровности дорожного покрытия и интенсивности маневрирования.

Эксперимент проводился в следующих диапазонах изменения факторов:

- $V_{cp} = 14 \dots 20$ км/ч;
- $N_o = 7,4 \dots 8,2$ м/км;
- $n_m = 70 \dots 90$ шт/км.

В табл. 2 приведены ключевые уровни факторов и их диапазоны изменения.

Основные уровни факторов и значения интервалов вариации

Таблица 2

Table 2

Basic levels of factors and values of variation intervals

Уровень варьируемых факторов	Обозначение кодовое	V_{cp} , км/ч	N_o , м/км	n_m , шт./км
		X_1	X_2	X_3
Основной	0	15	7,2	60
Интервал варьирования	Δx_i	5	1,0	20
Верхний	+1	20	8,2	80
Нижний	-1	10	6,2	40

Построение плана классического многофакторного эксперимента. Классический МФЭ основан на идее варьирования каждого фактора только на двух граничных уровнях – нижнем (–) и верхнем (+). Это позволяет количеству экспериментальных точек (исключая повторения) полностью соответствовать количеству всех возможных уникальных комбинаций уровней факторов и рассчитывается как 2 в степени числа факторов. Таким образом, для двух факторов требуется 4 опыта, для трех – 8, для четырех – 16 и так далее (по принципу 2^k , где k – число факторов).

В рамках данного исследования реализован трёхфакторный эксперимент, проводимый в угловых точках факторного пространства, координаты которых задаются различными комбинациями знаков «+» и «-». Соответствующий план эксперимента, представленный в виде матрицы планирования, приведён в табл. 3, где для упрощения записи единичные значения опущены и указаны только знаковые обозначения факторов.

Матрица планирования и результатов МФЭ
Matrix of planning and results of a multivariate experiment

Таблица 3

Table 3

Номер опыта	План								Результаты реализации опытов			
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_{12}	X_{13}	X_{23}	X_{123}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_i
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,123	0,124	0,122	0,123
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,131	0,130	0,129	0,130
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,120	0,124	0,122	0,122
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,128	0,126	0,127	0,127
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,121	0,120	0,119	0,120
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,122	0,124	0,126	0,124
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,128	0,126	0,124	0,126
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,129	0,128	0,127	0,128

Коэффициенты регрессии многофакторного эксперимента

Вычисление коэффициентов регрессии в многофакторном эксперименте осуществляется путем нахождения среднего арифметического произведений результатов опытов на знак соответствующего фактора в матрице планирования:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i Y_i = \sum_{i=1}^N X_i Y_i / N ;$$

$$b_0 = \frac{0,123+0,130+0,122+0,127+0,120+0,124+0,126+0,123}{8} = 0,125 ;$$

$$b_1 = \frac{-0,123+0,130-0,122+0,127-0,120+0,124-0,126+0,123}{8} = 0,0023 ;$$

$$b_2 = \frac{-0,123-0,130+0,122+0,127-0,120-0,124+0,126+0,123}{8} = 0,0008 ;$$

$$b_3 = \frac{-0,123-0,130-0,122-0,127+0,120+0,124+0,126+0,123}{8} = -0,0005 ;$$

$$b_{12} = \frac{0,123-0,130-0,122+0,127+0,120-0,124-0,126+0,123}{8} = -0,0005 ;$$

$$b_{13} = \frac{0,123-0,130+0,122-0,127-0,120+0,124-0,126+0,123}{8} = -0,0008 ;$$

$$b_{23} = \frac{0,123+0,130-0,122-0,127-0,120-0,124+0,126+0,123}{8} = 0,0018 ;$$

$$b_{123} = \frac{-0,123+0,130+0,122-0,127+0,120-0,124-0,126+0,123}{8} = 0,000 .$$

Определяем дисперсию параллельных опытов для первого опыта:

$$S_{\text{воспр.}i}^2 = \frac{1}{m_i - 1} \sum_{j=1}^{m_i} (Y_{ij} - Y_i)$$

Выполняется суммирование значений дисперсии воспроизводимости, полученных в каждом опыте:

$$\sum_{i=1}^8 S_{\text{воспр.}i}^2 = 0,000025.$$

Анализ результатов показал, что в опыте № 8 наблюдается существенно более высокая величина дисперсии по сравнению с остальными экспериментами. В связи с этим для проверки однородности дисперсий был применён критерий Кохрена с условием $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл.}}$:

$$G_{\text{расч}} = S_{\text{max}}^2 / \sum_{i=1}^8 S_{\text{воспр.}i}^2.$$

Поскольку расчётное значение критерия $G_{\text{расч}} = 0,4$ оказалось ниже табличного значения $G_{\text{табл.}} = 0,5157$ (при $N = 8, f = 2$), гипотеза об однородности дисперсий признаётся справедливой.

На основании этого производится определение дисперсии воспроизводимости для всей совокупности проведённых экспериментов. После её вычисления становится возможной оценка общей погрешности эксперимента:

$$S_{\text{воспр}}^2 = S_{(y)}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{\text{воспр.}i}^2.$$

После определения дисперсии воспроизводимости можно приступить к оценке суммарной погрешности эксперимента:

$$S_{(y)} = \sqrt{S_{(y)}^2}.$$

Определение статистической значимости коэффициентов регрессии

Статистическая значимость коэффициентов регрессии проверяется с помощью t-критерия Стьюдента. В полном факторном эксперименте погрешности определения всех коэффициентов одинаковы. Для вычисления среднеквадратического отклонения коэффициента $S(b_i)$ используется следующее выражение:

$$S(b_i) = S_{(y)} / \sqrt{N_m}.$$

С целью проверки значимости коэффициентов регрессии применяются доверительные интервалы [18–20], на основе которых определяется величина Δb_i . При этом $t_{\text{табл.}}$ соответствует табличному значению критерия Стьюдента, а $S(b_i)$ – стандартной ошибке i -го коэффициента регрессии:

$$\Delta b_i = \pm t_{\text{табл.}} \cdot S(b_i).$$

По итогам статистической обработки результатов многофакторного эксперимента и выделения значимых коэффициентов формируется нелинейная математическая модель исследуемого процесса, представленная в виде выражения

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_{23} X_2 X_3. \quad (8)$$

Следует отметить, что прямое применение регрессионных уравнений в кодированной форме не всегда удобно, поэтому сначала факторы преобразуют в кодированные значения, а затем вычисляют отклик по уравнению регрессии. Обратное преобразование (декодирование) осуществляется с использованием зависимостей (5). Для рассматриваемого полного факторного эксперимента (матрица планирования приведена в табл. 2) соответствующие формулы декодирования имеют следующий вид:

$$X_1 = \frac{V_{cp} - 17}{3} = \frac{V_{cp}}{3} - \frac{17}{3} = \frac{1}{3} \cdot V_{cp} - \frac{17}{3} = 0,33 \cdot V_{cp} - 5,6,$$

$$X_2 = \frac{N_o - 7,8}{0,4} = \frac{N_o}{0,4} - \frac{7,8}{0,4} = \frac{1}{0,4} \cdot N_o - \frac{7,8}{0,4} = 2,5 \cdot N_o - 19,5,$$

$$X_3 = \frac{n_m - 80}{10} = \frac{n_m}{10} - \frac{80}{10} = \frac{1}{10} \cdot n_m - \frac{80}{10} = 0,1 \cdot n_m - 8.$$

Окончательные результаты расчетов

- Дисперсия воспроизводимости: $S_{воспр}^2 = 0,000003$.
- Дисперсия коэффициента регрессии: $S(b_i) = 0,0006$.
- Ошибка коэффициента регрессии: $S_{(y)} = 0,0017$.
- Доверительный интервал коэффициента регрессии: $\Delta b_i = \pm 0,0003$.

На основании проверки адекватности регрессионного уравнения (8) получена математическая модель в натуральных переменных, описывающая обобщенный динамический коэффициент. Окончательное выражение модели представлено формулой

$$k_D = 0,393 + 0,00076 \cdot V_{cp} - 0,036 \cdot N_o - 0,0035 \cdot n_m + 0,00045 \cdot N_o \cdot n_m. \quad (9)$$

Результаты расчета по модели (9) представлены в табл. 4.

Результаты, полученные в ходе вычислений по математической модели

Таблица 4

Results obtained from calculations using the mathematical model

Table 4

№	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{23}	X_1	X_2	X_3	k_D
						V_{cp}	N_o	n_m	
1	0,393	0,00076	0,036	0,0035	0,0005	14	7,4	70	0,125
2	0,393	0,00076	0,036	0,0035	0,0005	20	8,2	90	0,130
3	0,393	0,00076	0,036	0,0035	0,0005	17	7,8	80	0,126

Выводы

1. В ходе выполнения работы были реализованы основные этапы планирования эксперимента и выполнена статистическая обработка результатов многофакторного анализа. Это позволило получить зависимость обобщенного динамического коэффициента от ключевых эксплуатационных факторов: состояния дорожного покрытия, параметров маневрирования (частоты и характера) и скорости движения самосвалов.

2. Получена математическая модель для обобщенного динамического коэффициента на примере эксплуатации автомобилей-самосвалов в условиях строительства Рогунской ГЭС.

3. Проведена оценка адекватности предложенной математической модели.

Список литературы

1. Сайдуллозода С.С., Гаврилов К.В. Теоретические и практические аспекты оценки энергетических затрат автомобилей-самосвалов и модели их функционирования в карьерных условиях: монография. Душанбе: Ирфон, 2025. 164 с.

2. Сайдуллозода С.С. Оценка энергетических затрат автомобилей-самосвалов на основе модели их функционирования в горных условиях Республики Таджикистан: специальность 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины»: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2022. 174 с.

3. Воронков А.Г., Андрианов К.А. Оценка транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги: метод. указания. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2008. 24 с.

4. Pathak D. K., Thakur L. S., Rahman S. Performance evaluation framework for sustainable freight transportation systems // *International Journal of Production Research*. 2019. Vol. 57, no. 19. P. 6202–6222.
5. Жуковец А.Г., Бандюк Н.В. Содержание и ремонт автомобильных дорог: учебно-методическое пособие для выполнения курсового и дипломного проектирования. Гомель: БелГУТ, 2016. 61 с.
6. Road Safety Review update by using innovative technologies to investigate driver behavior / G. Navid, A. Ennia, V. Valeria et al. // *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 45. P. 368–375.
7. Александров В.И., Васильева М.А., Коптев В.Ю. Эффективная мощность и скорость движения карьерных автосамосвалов в режиме топливной экономичности // *Записки Горного института*. 2019. Т. 239. С. 556–563.
8. Energy-efficiency models of sustainable urban transportation structure optimization / Y. Qiang, G. Tian, Y. Liu, Z. Li // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 18192–18199.
9. К вопросу оценки качества карьерных автодорог/ Ю.И. Лель, С.А. Арефьев, А.В. Глебов, Д.Х. Ильбульдин // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2016. № 3. С. 70–73.
10. Koptev V.Y., Kopteva A.V. Structure of energy consumption and improving open-pit dump truck efficiency // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 87, Iss. 2, no. 022010.
11. Haque M.O., Haque T.H. Evaluating the effects of the road safety system approach in Brunei // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2018. Vol. 118. P. 594–607.
12. Troyanovskaya I. Influence of mountain conditions on road fuel consumption (example of the Republic of Tajikistan) // *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 61. P. 273–279.
13. How does on road fuel economy vary with vehicle cumulative mileage and daily use? / L.G. David, L. Jun, J.K. Asad et al. // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2017. Vol. 55. P. 142–161.
14. Jamous W., Balijepalli C. Assessing travel time reliability implications due to roadworks on private vehicles and public transport services in urban road networks // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2018. Vol. 5, iss. 4. P. 296–308.
15. Зайцев А.В. Обработка результатов полного факторного эксперимента: методические указания к выполнению практической работы. Курган: КГУ, 2016. 23 с.
16. Зайцев А.В., Сеницын С.Н., Фролов В.А. Планирование и обработка эксперимента при диффузионном хромировании деталей из серого чугуна // *Вестник КГУ. Серия «Технические науки»*. 2011. Вып. 6, № 1 (20). С. 83–85.
17. Некрасов В.И. Многофакторный эксперимент. Планирование и обработка результатов: учебное пособие. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 1998. 146 с.
18. Рахимов Я.А., Этинген Л.Е., Белкин В.Ш. Человек и высокогорье. Душанбе: Ирфон, 1982. 96 с.
19. Wiese F., Baldini M. Conceptual model of the industry sector in an energy system model: a case study for Denmark // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 203. P. 427–443.
20. Van Wee B., Van Den Brink R., Nijland H. Environmental impacts of high-speed rail links in cost-benefit analyses: a case study of the Dutch Zuider Zee line // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2003. Vol. 8, no. 4. P. 299–314.

References

1. Saidullozoda S.S., Gavrilov K.V. *Teoreticheskie i prakticheskie aspekty otsenki energeticheskikh zatrat avtomobiley-samosvalov i modeli ikh funktsionirovaniya v kar'ernykh usloviyakh* [Theoretical and practical aspects of assessing energy consumption of dump trucks and models of their operation in quarry conditions]. Dushanbe: Irфон, 2025. 164 p.
2. Saidullozoda S. S. *Otsenka energeticheskikh zatrat avtomobiley-samosvalov na osnove modeli ikh funktsionirovaniya v gornykh usloviyakh Respubliki Tadzhikistan* [Assessment of energy consumption of dump trucks based on the model of their operation in mountainous conditions of the Republic of Tajikistan]: Cand. Sci. (Eng.) diss. Chelyabinsk, 2022. 174 p.

3. Voronkov A.G., Andrianov K.A. *Otsenka transportno ekspluatatsionnogo sostoyaniya avtomobil'noi dorogi* [Assessment of the transport and operational condition of a road]. Tambov, 2008. 24 p.
4. Pathak D.K., Thakur L.S., Rahman S. Performance evaluation framework for sustainable freight transportation systems. *International Journal of Production Research*, 2019, vol. 57, no. 19, pp. 6202–6222.
5. Zhukovets A.G., Bandyuk N.V. *Soderzhanie i remont avtomobil'nykh dorog* [Maintenance and repair of roads]: study and methodical manual for course and diploma design. Gomel, 2016. 61 p.
6. Navid G., Ennia A., Valeria V., Claudio L., Andrea S., Hocine I. Road Safety Review update by using innovative technologies to investigate driver behavior. *Transportation Research Procedia*, 2020, vol. 45, pp. 368–375.
7. Aleksandrov V.I., Vasil'eva M.A., Koptev V.Yu. [Effective power and speed of quarry dump trucks in fuel efficient mode]. *Proceedings of the Mining Institute*, 2019, vol. 239, pp. 556–563. (In Russ.)
8. Qiang Y., Tian G., Liu Y., Li Z. Energy efficiency models of sustainable urban transportation structure optimization. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 18192–18199.
9. Lel' Yu.I., Aref'ev S.A., Glebov A.V., Il'bul'din D.Kh. On the issue of assessing the quality of quarry roads. *News of the Ural State Mining University*, 2016, no. 3, pp. 70–73. (In Russ.)
10. Koptev V.Y., Kopteva A.V. Structure of energy consumption and improving open pit dump truck efficiency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87, iss. 2, no. 022010.
11. Haque M.O., Haque T.H. Evaluating the effects of the road safety system approach in Brunei. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, vol. 118, pp. 594–607.
12. Troyanovskaya I. Influence of mountain conditions on road fuel consumption (example of the Republic of Tajikistan). *Transportation Research Procedia*, 2022, vol. 61, pp. 273–279.
13. David L.G., Jun L., Asad J.K., Behram W., Janet L.H., Richard G. How does on road fuel economy vary with vehicle cumulative mileage and daily use? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, vol. 55, pp. 142–161.
14. Jamous W., Balijepalli C. Assessing travel time reliability implications due to roadworks on private vehicles and public transport services in urban road networks. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2018, vol. 5, iss. 4, pp. 296–308.
15. Zaitsev A.V. *Obrabotka rezul'tatov polnogo faktornogo eksperimenta* [Processing the results of a full factorial experiment]. Kurgan, 2016. 23 p.
16. Zaitsev A.V., Sinitsyn S.N., Frolov V.A. Planning and processing of the experiment in diffusion chromium plating of grey cast iron parts. *Bulletin of KSU. Series "Technical Sciences"*, 2011, iss. 6, no. 1 (20), pp. 83–85. (In Russ.)
17. Nekrasov V.I. *Mnogofaktorny eksperiment. Planirovanie i obrabotka rezul'tatov* [Multifactor experiment. Planning and result processing]. Kurgan, 1998. 146 p.
18. Rakhimov Ya.A., Etingen L.E., Belkin V.Sh. *Chelovek i vysokogor'e* [Man and highlands]. Dushanbe, 1982. 96 p.
19. Wiese F., Baldini M. Conceptual model of the industry sector in an energy system model: a case study for Denmark. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 203, pp. 427–443.
20. Van Wee B., Van Den Brink R., Nijland H. Environmental impacts of high speed rail links in cost-benefit analyses: a case study of the Dutch Zuider Zee line. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2003, vol. 8, no. 4, pp. 299–314.

Информация об авторах

Сайдуллозода Сайвали Сайдулло, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта», Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан; saivali.saidullo@mail.ru

Гаврилов Константин Владимирович, доктор технических наук, профессор Передовой инженерной школы двигателестроения и спецтехники «Сердце Урала», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; gavrilovkv@susu.ru

Умурзаков Ильдар Канымжанович, аспирант Передовой инженерной школы двигателестроения и спецтехники «Сердце Урала», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; asp22uik733@susu.ru

Information about the authors

Sayvali S. Saydullozoda, candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of “Operation of road transport”, Tajik Technical University named after academician M. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan, saivali.saidullo@mail.ru

Konstantin V. Gavrilov, doctor of Technical Sciences, Professor of the Advanced Engineering School of Engine Building and Special Equipment “Heart of the Urals”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; gavrilovkv@susu.ru

Ildar K. Umurzakov, graduate student at the Advanced Engineering School of Engine Building and Specialized Equipment “Heart of the Urals”, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; asp22uik733@susu.ru

Статья поступила в редакцию 17.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.
The article was submitted 17.03.2026; accepted for publication 01.04.2026.