

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7823

УДК 625.042

Статья

Анализ факторов, влияющих на несущую способность автомобильной дороги с покрытием капитального типа

Мохирев Александр Петрович

*доктор технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет
(Российская Федерация), ale-mokhirev@yandex.ru*

Серватинский Вадим Вячеславович

*кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет
(Российская Федерация), VServatinsky@sfu-kras.ru*

Дудин Павел Олегович

*аспирант, Сибирский федеральный университет (Российская Федерация),
pahadd2@gmail.com*

Сорокина Мария Николаевна

*заведующая лабораторией, Сибирский федеральный университет
(Российская Федерация), msorokina@sfu-kras.ru*

Мохирев Иван Александрович

*студент, Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
(Российская Федерация), mohirevivan@yandex.ru*

Соколова Анжела Романовна

*студентка, Сибирский федеральный университет (Российская Федерация),
anzhela_sokolova_2003@mail.ru*

Получена: 17 марта 2024 / Принята: 25 июня 2024 / Опубликовано: 27 июня 2024

Аннотация: Несущая способность автомобильной дороги является одним из важнейших показателей для эффективной её эксплуатации. При снижении данного показателя значительно снижается пропускная способность дороги. Особенно это актуально при сезонной вывозке древесины по лесовозным дорогам. Для сохранения несущей способности автомобильной дороги её следует правильно эксплуатировать, учитывая все негативные факторы. В настоящее

время изучено множество зависимостей и предложены мероприятия по снижению отрицательного воздействия на автодорогу. Однако в сложных автодорожных процессах уже необходимо использовать многофакторное моделирование. Целью настоящего исследования является определение факторов, влияющих на несущую способность автомобильной дороги с покрытием капитального типа, а также их значимость. Для исследования, по результатам литературного анализа, определены 35 факторов. Условно каждый фактор отнесён к одной из групп: природно-климатическая, технологическая, эксплуатационная. Анализ факторов проводился по результатам экспертных оценок. Экспертами являлись инженерно-технические работники автодорожных предприятий, сотрудники Министерства транспорта Красноярского края и представители кафедры автомобильных дорог и городских сооружений Сибирского федерального университета. Всего в оценке участвовало 18 человек. При анализе оценок определены весомости каждого фактора. Наибольшая весомость с суммой 9,2 % у показателей «Влажность грунта» и «Материал дорожной одежды». Также можно выделить факторы с весомостью более 0,04. Количество таких показателей равно 6, именно на них следует воздействовать, в первую очередь, при управлении несущей способностью. Кроме того, были определены 17 из 35 факторов с показателем весомости менее 0,025, их оценки незначительные. При оценке дисперсии и вариации согласованность мнений экспертов определена как удовлетворительная. В целом результаты исследований согласуются с ранее полученными данными, представленными в авторитетных научных изданиях. В дальнейших исследованиях, при проведении лабораторных испытаний необходимо учитывать 6 наиболее значимых факторов: влажность грунта; материал дорожной одежды; температура воздуха и солнечная радиация; величина нагрузки на ось транспортного средства и показатель давления в автомобильных шинах; количество повторений приложения тяжёлой нагрузки и интервал между этими приложениями; плотность слоёв дорожной одежды и земляного полотна.

Ключевые слова: весомость факторов; экспертная оценка; несущая способность; природно-климатические факторы; технологические факторы; эксплуатационные факторы

DOI: 10.15393/j2.art.2024.7823

Article

Analysis of factors affecting the bearing capacity of a principal-type paved highway

Aleksander Mokhirev

D. Sc. in engineering, assistant professor, Siberian Federal University (Russian Federation), ale-mokhirev@yandex.ru

Vadim Servatinsky

Ph. D. in engineering, assistant professor, Siberian Federal University (Russian Federation), VServatinsky@sfu-kras.ru

Pavel Dudin

Ph. D. student, Siberian Federal University (Russian Federation), pahadd2@gmail.com

Maria Sorokina

Head of the laboratory Siberian Federal University (Russian Federation), msorokina@sfu-kras.ru

Ivan Mokhirev

Student, Bauman Moscow State Technical University (Russian Federation), mokhirevivan@yandex.ru

Anzhela Sokolova

Student, Siberian Federal University (Russian Federation), anzhela_sokolova_2003@mail.ru

Received: 17 March 2024 / Accepted: 25 June 2024 / Published: 27 June 2024

Abstract: The holding power of a highway is one of the most important indicators for its effective operation. The traffic capacity of the road reduces significantly when this indicator decreases. This is especially true for seasonal highway haul. To preserve the holding power of the highway, it should be properly operated with all negative factors taken into account. Currently, many characteristics have been studied and measures have been proposed to reduce the negative impact on the highway. However, multifactorial modeling should be used in complex road processes. The purpose of this study is to determine the factors affecting the holding power of a principle-type paved highway, as well as their significance. According to

the results of the literary analysis, 35 factors were identified for the study. Tentatively each factor was placed into one of the groups: natural-climatic, technological, and operational. The analysis of the factors was based on the results of expert assessments. The experts were engineering and technical workers of road enterprises, employees of the Ministry of Transport of the Krasnoyarsk Territory and representatives of the Department of Highways and Urban Structures of the Siberian Federal University, Russia. A total of 18 people participated in the assessment. When analyzing the estimates, the weighting of each factor was determined. The indicators «Soil moisture» and «Pavement material» had the greatest weight of 9.2 %. It was also possible to identify factors with a weight of more than 0.04. The number of such indicators was six. These factors should be the first ones to take into account when controlling the highway holding power. Besides, 17 out of 35 factors with a weighting index of less than 0.025 were assumed insignificant. In assessing the variance and variation, the consistency of expert opinions was determined to be satisfactory. In general, the research results are consistent with those previously obtained and presented in reputable scientific publications. For further laboratory tests it is necessary to take into account the six most significant factors: soil moisture, pavement material, air temperature and solar radiation, the magnitude of the load on the axle of the vehicle and the tire pressure indicator, the number of repetitions of heavy load application and the interval between these applications, the density of layers of pavement and roadbed.

Keywords: weighting of factors; expert assessment; holding power; natural and climatic factors; technological factors; operational factors

1. Введение

От несущей способности дороги зависит её пропускная способность, а значит, эффективность транспортной системы внутри региона или между регионами. Деформации различного типа значительно снижают несущую способность. Стоит уточнить, что могут быть деформации земляного полотна, дорожной одежды или других элементов автомобильной дороги [1], [2]. В большей степени разрушения происходят на лесотранспортных дорогах, при этом значительно снижается работоспособность и пропускная способность лесотранспортного пути.

Разрушения могут быть вызваны низким качеством выполнения работ, недостаточным или неправильным учётом гидрогеологических условий, применением материалов низкого качества или неправильной эксплуатацией автомобильной дороги. Большое значение в обеспечении устойчивости дорожной одежды имеет своевременный ремонт разрушенных участков дорожного покрытия. Появление остаточных (необратимых) деформаций, своевременно не ликвидированных, приводит к значительным разрушениям, как под действием движения автомобилей, так и под влиянием природно-климатических факторов. Для снижения значения природно-климатических условий на несущую способность дороги в регионах России предусмотрен запрет движения большегрузных автотранспортных средств с целью сохранности трасс в период половодья и распутицы. Вопрос вида транспорта, сроков запрета и на каких дорогах решается в каждом регионе самостоятельно. Заранее, обычно за несколько недель или месяц, власти субъекта выпускают соответствующий документ, которым вводят сезонные ограничения, устанавливают сроки его действия, определяют допустимые осевые нагрузки или допустимую общую массу для беспрепятственного проезда транспортных средств в это время и утверждают перевозки-исключения, которых данные меры не касаются. При этом время запрета снижает пропускную способность автодорог, что влияет на экономику региона. Подробное изучение факторов, влияющих на несущую способность автомобильной дороги, позволит обосновать и определить общие и локальные мероприятия, а также их местоположения, направленные на снижение их влияния.

Проблемой увеличения несущей способности автомобильных дорог и снижения значимости на неё негативных факторов занимались и занимаются многие учёные и производственные работники автодорожной сферы в России и за рубежом. Так, например, в работе С. А. Качанова, Г. М. Нигметова исследуются факторы, влияющие на потерю несущей способности грунтового полотна из-за геологических опасностей (суффозии, карсты, землетрясения, разжижение грунтов), которые могут привести к катастрофам массового характера. Геологические опасности могут возникнуть как вторичные из-за техногенных причин, например, аварий на коммунально-энергетических сетях. Кроме того, могут быть аварии, связанные с потерей устойчивости конструктивных систем мостов, туннелей, эстакад. Потеря устойчивости конструктивных систем может наступить от интенсивного старения материалов конструкций, из-за токсичного воздействия выхлопных газов в сочетании с влиянием вибрации от динамического воздействия

автомобильных колёс [3]. В работе рассматриваются факторы, влияющие на конструктивные системы автомобильных дорог, но они направлены только на результаты, приводящие к катастрофе.

Ряд работ, отражающих разработанные мероприятия по снижению причиняемого вреда автомобильной дороге от перемещения по ней тяжеловесных грузов, опубликованы научными сотрудниками Санкт-Петербургского архитектурно-строительного университета под руководством Р. Р. Сафиуллина [4—6]. Авторами на основе выявленных факторов предлагается методика оптимизации транспортного процесса, учитывающая несущую способность и износ покрытий автомобильных дорог. В исследованиях сделан упор на движение тяжеловесных грузов без учёта природно-климатических условий и сезонного характера местности.

Более глубоко исследованы физико-механические процессы в сезонно-мёрзлых грунтах конструкций автомобильных дорог, которые рассмотрены в работе [7]. Представлены результаты изменения температуры в структуре дороги в зависимости от времени года и осадков с использованием тепловизионной инфракрасной камеры. Установлено, что амплитуда колебаний температуры нелинейно зависит от глубины. Данные исследования возможно применить при определении сезонного использования транспортных средств на различных грунтах в разные периоды года.

Подробный факторный анализ пропускной способности дорог с учётом сезонности их эксплуатации представлен в работе [8]. По результатам исследований выделены наиболее значимые неуправляемые факторы: грунтово-почвенные условия, рельеф местности и наличие водных преград. Однако исследования направлены на эксплуатацию лесовозных дорог и не учитывают подробные факторы, влияющие на несущую способность транспортного пути.

2. Материалы и методы

Целью настоящей работы является определение факторов, влияющих на несущую способность автомобильной дороги с покрытием капитального типа, а также их значимости.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- По литературному обзору определить показатели, влияющие на несущую способность автомобильной дороги, и разделить их на группы факторов.
- Провести опрос экспертов по оценке значимости каждого фактора на несущую способность дороги.
- Определить весомость каждого фактора.
- Определить разброс мнений экспертов, дисперсию и коэффициент вариации.

Факторный анализ проведён экспертной оценкой [9]. Экспертами в данном исследовании выступили специалисты разного уровня предприятий по строительству, ремонту дорог, управлению движением, Министерства транспорта Красноярского края, а также научные работники кафедры автомобильных дорог и городских сооружений Сибирского

федерального университета. В исследовании принимали участие 18 экспертов. Их задача состояла в оценке факторов, влияющих на эффективность технологической цепочки. Набор факторов определялся путём литературного обзора без предварительной оценки их значимости. Экспертам было предложено оценить значимость 35 факторов, влияющих на несущую способность автомобильной дороги с покрытием капитального типа. Оценки предлагалось поставить от 1 до 10, где 10 — значимость сильная, 1 — значимости нет.

Согласно методике, по результатам оценок экспертов определяются весомость каждого фактора, разброс мнения эксперта, дисперсия, коэффициенты вариации и конкордации (по критериям согласия Пирсона).

3. Результаты

Экспертами проведена оценка факторов. Факторы, сумма баллов всех экспертов, а также весомость представлены в таблице. Условно все факторы можно разделить на три группы: природно-климатические (ПК), технологические (Т), эксплуатационные (Э). Факторы, относящиеся к природно-климатической группе, принято считать неуправляемыми. Однако некоторыми показателями (влажность грунта, температура на поверхности покрытия, температура грунта земляного полотна) можно частично управлять. Например, проводить мероприятия, направленные на снижение влаги грунта, или влиять на температуру поверхности её цветом. Технологические показатели закладываются при строительстве автомобильной дороги, поэтому после запуска дороги также являются не управляемыми. Эксплуатационные факторы являются управляемыми.

По результатам экспертных оценок весомость каждого фактора определялась по формуле

$$B_i = \frac{\sum_{j=1}^m w_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij}}, \quad (1)$$

где B_i — значимость объекта, рассчитанная на основе оценок экспертов; w_{ij} — оценка (в баллах), данная объекту i , экспертом j ; m — число экспертов; n — количество факторов.

Из таблицы видно, что к природно-климатической группе относятся 15 факторов, технологической — 10 факторов, эксплуатационной — 10 факторов. Средняя оценка составила 5,7. Наивысшее значение весомости у влажности грунта 0,0467, со средней оценкой 9,3 балла; 11 экспертов поставили наивысшее значение. Самый низкий балл у данного показателя 7; эту оценку поставили 2 эксперта.

По дисперсии и вариации можно характеризовать разброс мнений экспертов. При вариации менее 0,5 согласованность считается удовлетворительной, при менее 0,3 — хорошей. Из рассчитанных коэффициентов следует, что согласованность удовлетворительная. Низкая согласованность объясняется присутствием экспертов разного уровня и организаций различных дорожных направлений.

Таблица. Результаты экспертной оценки. *Источник:* составлено авторами

Table. Results of the expert assessment. *Source:* compiled by the authors

№	Фактор	Группа	Сумма баллов	Усреднённая оценка	Весомость фактора	Дисперсия	Вариация
1	Влажность грунта	ПК	168	9,3	0,0467	1,059	0,06
2	Влажность окружающего воздуха	ПК	52	2,9	0,0145	3,882	0,65
3	Ветер	ПК	36	2,0	0,0100	2,536	0,57
4	Материал дорожной одежды	Т	162	9,0	0,0451	3,412	0,19
5	Солнечная радиация	ПК	47	2,6	0,0131	2,810	0,49
6	Время после капитального ремонта	Э	138	7,7	0,0384	5,765	0,38
7	Срок службы дороги	Э	132	7,3	0,0367	4,941	0,34
8	Тип земляного полотна (насыпь/выемка)	Т	67	3,7	0,0186	8,000	1,00
9	Величина рабочей отметки: насыпь	Т	76	4,2	0,0211	5,529	0,64
10	выемка	Т	71	3,9	0,0197	8,222	1,00
11	Поперечный уклон дороги	Т	77	4,3	0,0214	7,647	0,88
12	Продольный уклон дороги	Т	86	4,8	0,0239	7,007	0,73
13	Плотность слоёв дорожной одежды и земляного полотна	Т	145	8,1	0,0403	3,350	0,21
14	Равномерность износа (истирания) дорожного покрытия под действием колёс автомобилей	Э	131	7,3	0,0364	4,095	0,28
15	Образование пластических деформаций	Э	141	7,8	0,0392	3,441	0,22
16	Накопление остаточных деформаций и появление структурных разрушений в слоях дорожного покрытия и/или основания	Э	141	7,8	0,0392	3,794	0,24
17	Накопление остаточных деформаций в грунте земляного полотна под действием нагрузки от тяжёлых грузовых автомобилей	Э	142	7,9	0,0395	3,634	0,23
18	Величина нагрузки на ось транспортного средства и показатель	Э	148	8,2	0,0412	3,477	0,21

	давления в автомобильных шинах						
19	Количество повторений приложения тяжёлой нагрузки и интервал между этими приложениями	Э	147	8,2	0,0409	2,971	0,18
20	Продолжительность приложения каждой нагрузки и суммарная продолжительность	Э	132	7,3	0,0367	3,765	0,26
21	Температура воздуха и солнечная радиация	ПК	95	5,3	0,0415	7,271	0,69
22	Состояние системы водоотвода или водопонижения	Э	140	7,8	0,0389	3,948	0,25
23	Тип грунта земляного полотна	Т	124	6,9	0,0345	5,634	0,41
24	Равномерность уплотнения в поперечном направлении слоёв нежестких дорожных одежд	Т	127	7,1	0,0353	5,938	0,42
25	Равномерность уплотнения в продольном направлении слоёв земляного полотна	Т	127	7,1	0,0353	6,056	0,43
26	Тип местности по характеру увлажнения	ПК	114	6,3	0,0317	5,647	0,45
27	Экспозиция склона	ПК	76	4,2	0,0211	5,359	0,63
28	Тип растительного покрова (лес) на границе полосы отвода	ПК	48	2,7	0,0133	4,212	0,77
29	Высота дороги над уровнем моря	ПК	34	1,9	0,0095	3,046	0,81
30	Температура на поверхности покрытия	ПК	88	4,9	0,0245	4,575	0,47
31	Температура грунта земляного полотна	ПК	84	4,7	0,0234	5,036	0,53
32	Осадки: жидкие	ПК	90	5,0	0,0250	6,644	0,66
33	твёрдые	ПК	54	3,0	0,0150	4,879	0,80
34	количество	ПК	83	4,6	0,0231	8,565	0,91
35	интенсивность	ПК	73	4,1	0,0203	7,912	0,95
	Итого		3596	199,8	1,0000		

Проранжированные в порядке убывания факторы представлены на диаграмме (рисунок 1).

Из анализа факторов видно, что наибольшая весомость у показателей «Влажность грунта» и «Материал дорожной одежды». В сумме они составляют 9,2 %. Также можно выделить факторы с весомостью более 0,04. Количество таких показателей равно 6. Именно на них

следует воздействовать, в первую очередь, при управлении несущей способностью; 17 из 35 факторов с показателем весомости менее 0,025, оценки их незначительные, их влияние низкое и в дальнейших исследованиях учитываться не должны.

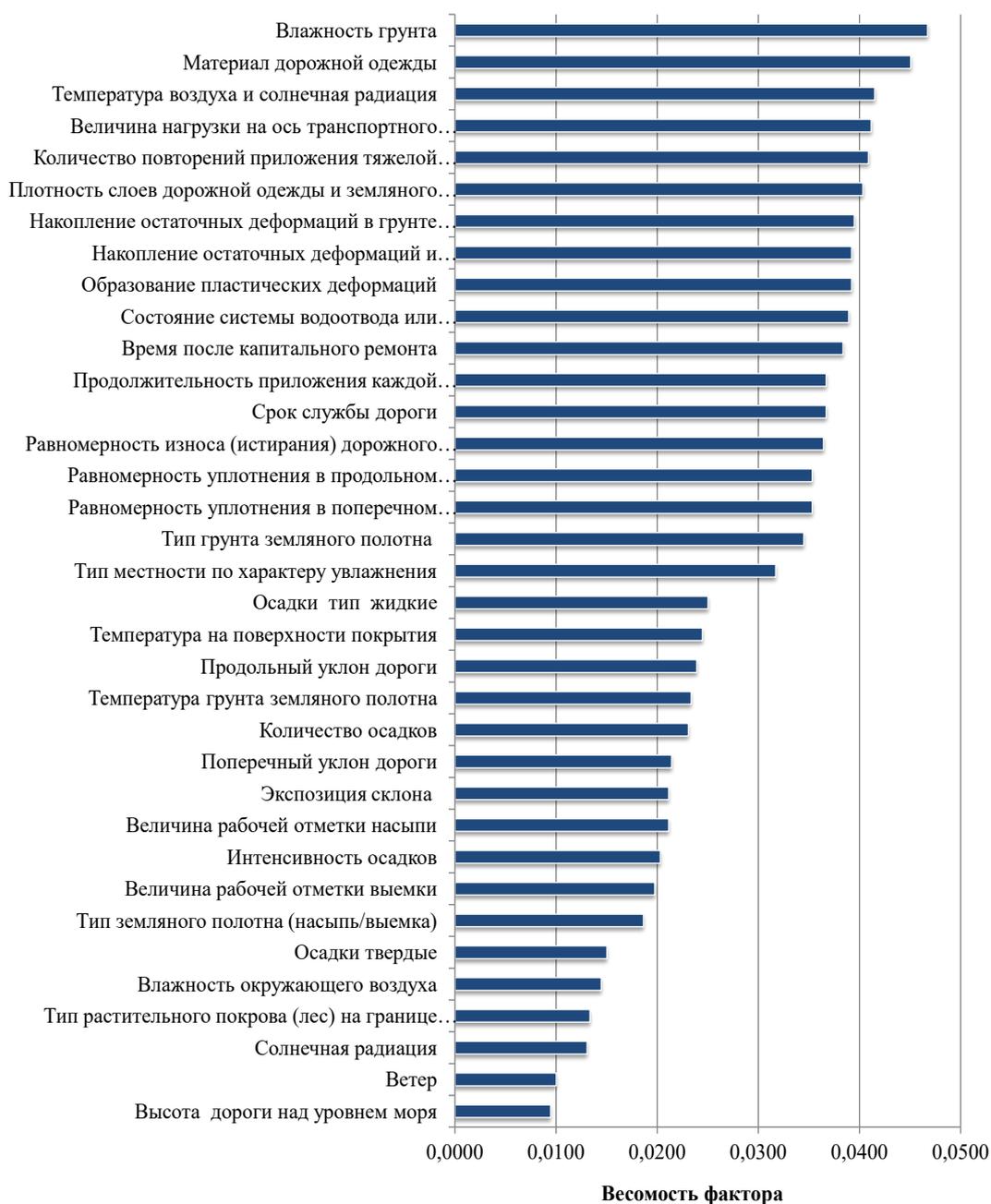


Рисунок 1. Весомость анализируемых факторов [рисунок авторов]

Figure 1. The weight of the analyzed factors

Распределение весомости факторов по группам представлено на диаграммах (рисунок 2).



Рисунок 2. Распределение весомости факторов по группам: А — все факторы; В — факторы с весомостью более 0,038; С — факторы с весомостью более 0,040 [рисунок авторов]

Figure 2. Distribution of weighting factors by groups: (A) all factors; (B) factors with a weighting of more than 0.038; (C) factors with a weighting of more than 0.040

По группам факторов распределение весовых коэффициентов примерно одинаковое (рисунок 2А). Однако по наиболее весомым 11 показателям со значениями более 0,038 эксплуатационная группа составила 61 % (рисунок 2В.). По количеству показателей, вошедших в первую шестёрку значений, распределение факторов равномерно, с каждой группы по 2. По сумме их весомости распределение также примерно равномерно (рисунок 2С). По результатам анализа определены наиболее значимые показатели, а также параметры, характеризующие оценку согласованности мнений экспертов как удовлетворительную.

4. Обсуждение

В классической литературе, посвящённой дорожному строительству, главным показателем, влияющим на несущую способность и надёжность автомобильной дороги, определяется влажность используемого грунта [10], [11]. Это заключение полностью согласуется с результатами представленных исследований.

Эксперты незначительно выделяют факторы, характеризующие геометрические характеристики автодороги и место её расположения, что несколько отличается от мнения других исследователей. Однако эти факторы можно расценивать как влияющие на влажность грунта, а значит, не имеющие прямой зависимости.

В целом, результаты исследований согласуются с ранее полученными данными, представленными в авторитетных научных изданиях. Так, в работе авторов W. Xu, X. Huang, Z. Yang, J. Huang [12] анализируются технологические параметры, формируемые при строительстве автомобильной дороги. Методом конечных элементов определяется несущая способность грунта при строительстве автомобильных дорог и выделяются наиболее значимые факторы, на неё влияющие. Как и в настоящих исследованиях, авторами

определены наиболее значимые факторы: строительный материал и плотность слоёв земляного полотна.

Исследователи В. К. Ghalehjough, S. Çelik, S. Akbulut в своей работе [13] представляют результаты влияния характеристик грунта на несущую способность. При этом уделяется внимание типу грунта, доказываемая, что этот параметр оказывает существенное значение на несущую способность земляного полотна. Стоит заметить, что объектом исследований было именно земляное полотно, в нашем же случае рассматривается дорога в целом. Поэтому такой параметр, как тип грунта земляного полотна, по результатам ранжирования на 17-м месте. Однако рассматриваемые характеристики грунта имеют влияние на более значимые факторы.

Авторами А. Sarsembayeva, P. E. F. Collins публикации [14] представлены результаты влияния движения влаги в грунте автомобильной дороги на образование дефектов в виде морозного пучения и дальнейшую несущую способность. Исследования проведены методом лабораторного моделирования и доказывают значимость параметров влажности грунта и влияющих на неё характеристик при определении несущей способности дорог капитального типа, что подтверждается результатами, полученными в представленном исследовании. Таким образом, можно отметить, что полученные в настоящем изыскании результаты в целом не противоречат данным, опубликованным ранее в вышеприведённых исследованиях.

5. Заключение

По результатам исследований можно выделить факторы, имеющие наибольшее влияние на несущую способность автомобильной дороги с покрытием капитального типа. При дальнейшем рассмотрении и проведении лабораторных испытаний необходимо учитывать 6 наиболее значимых факторов: влажность грунта; материал дорожной одежды; температура воздуха и солнечная радиация; величина нагрузки на ось транспортного средства и показатель давления в автомобильных шинах; количество повторений приложения тяжёлой нагрузки и интервал между этими приложениями; плотность слоёв дорожной одежды и земляного полотна. При более подробном исследовании можно добавить ещё пять показателей, располагающихся далее по рейтингу: накопление остаточных деформаций в грунте земляного полотна под действием нагрузки от тяжёлых грузовых автомобилей; накопление остаточных деформаций и появление структурных разрушений в слоях дорожного покрытия и/или основания; образование пластических деформаций; состояние системы водоотвода или водопонижения; время после капитального ремонта. Остальные факторы для дальнейших исследований использовать не целесообразно.

Результаты расчёта дисперсии и вариации показывают удовлетворительную согласованность экспертов в оценке факторов.

При управлении сложной системой строительства и эксплуатации автодороги, не снижающей её важные характеристики, следует применять многофакторное

моделирование. При этом увеличение факторов несёт за собой усложнение моделирования и дальнейшее управление системой. Результаты настоящих изысканий позволяют определить факторы, на которые следует воздействовать при дальнейших исследованиях. Рассчитанная весомость значимости влияния факторов позволит построить программу экспериментов, направленных на определение фактических значений несущей способности автомобильной дороги в различных условиях, и дальнейшего моделирования данных процессов. Результаты можно использовать в теоретических и практических исследованиях. Новизной, отличающей представленные изыскания, является обработка большого количества факторов и сравнение их по значимости.

Исследование проводилось при поддержке ООО «Модульные Системы Управления».

Список литературы

1. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement / V. G. Kozlov, A. V. Skrypnikov, S. I. Sushkov [et al.] // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. Vol. 25, no. 3. P. 678—694.
2. Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical modeling / A. Y. Manukovsky, I. V. Grigorev, V. A. Ivanov [et al.] // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2018. Vol. 41, no. 2. P. 35—41. DOI: 10.26480/jmerd.02.2018.36.42.
3. Качанов С. А., Нугметов Г. М. Диагностика и мониторинг конструктивных систем автомобильных дорог // Технологии гражданской безопасности. 2009. Т. 6, № 1-2 (19-20). С. 82—87.
4. Сафиуллин Р. Р. К вопросу о методике расчёта размера вреда, причиняемого дорожному полотну при транспортировании тяжеловесных грузов автомобильным транспортом в РФ // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. № 5-1. С. 111—117.
5. Сафиуллин Р. Р., Горев А. Э. К вопросу оптимизации планирования перевозочного процесса тяжеловесных грузов автомобильным транспортом // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 5 (70). С. 190—195. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-5-190-195.
6. Safiullin R. N., Reznichenko V. V., Safiullin R. R. The software adaptive system for managing the heavy cargo transportation process based on the automated vehicle weight and size control system // Journal of Physics: Conference Series, Saint Petersburg, 23—24 April, 2020. Saint Petersburg, 2021. P. 012063. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012063.
7. Burgonutdinov A. M., Istomina K. R., Kleveko V. I. Experimental studies of physical and mechanical processes in seasonally frozen soils of constructions of automobile roads // Construction and Geotechnics. 2022. Vol. 13, no. 3. P. 98—106. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.3.09.
8. Мохирев А. П., Медведев С. О., Смолина О. Н. Факторы, влияющие на пропускную способность лесовозных дорог // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 3 (35). С. 103—113. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/10.
9. Пузырева О. К., Мохирев А. П. Экспертная оценка факторов, влияющих на качество щепы // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. № 9-2 (20-2). С. 245—249.
10. Алаторцев Д. А., Алексиков С. В. Обоснование расчётных характеристик грунтов земляного полотна // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-

строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2005. № 5. С. 73—79.

11. Каменчуков А. В. Влияние влажности основания дорожной одежды на несущую способность дороги // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства: Междунар. научно-практич. конф., Красноярск, 7—8 апреля 2016 года: Сб. науч. тр.: В 2 ч. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. Ч. 1. С. 183—187.
12. Structural analysis of the roadbed with backfill on a foundation with a lower bearing capacity using the finite element method / U. Xu, H. Huang, Z. Yang [et al.] // *Achievements of civil engineering*. 2021. P. 1690168. DOI: 10.1155/2021/1690168.
13. Galehdzhou B. K., Chelik S., Akbulut S. Experimental and numerical study of the bearing capacity of granular soil, which is affected by the roundness of particles // *IJGS*. 2017. No. 46 (10), P. 2137—2145.
14. Sarsembayeva A., Collins P. E. F. Assessment of frost resistance and mechanisms of moisture/chemical migration in the soil of highways using the method of laboratory modeling // *Science and Technology of cold regions*. 2017. Vol. 133. P. 26—35. DOI: 10.1016/J.coldregions.2016.10.003.

References

1. Kozlov V. G., Skrypnikov A. V., Sushkov S. I., Kruchinin I. N., Grigorev I. V., Nikiforov A. A., Pilnik Y. N., Teppoev A. V., Lavrov M., Timokhova O. M. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 678—694.
2. Manukovsky A. Y., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Gasparyan G. D., Lapshina M. L., Makarova Yu. A., Chetverikova I. V., Yakovlev K. A., Afonichev D. N., Kunitskaya O. A. Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical modeling. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 35—41. doi: 10.26480/jmerd.02.2018.36.42.
3. Kachanov S. A., Nigmatov G. M. Diagnostics and monitoring of roads construction systems. *Civil Securiti Technology*, 2009, vol. 6, no. 1-2 (19-20), pp. 82—87. (In Russ.)
4. Safiullin R. R. On the issue of the methodology for calculating the amount of damage caused to the roadway during the transportation of heavy goods by road in the Russian Federation, *Izvestiya TulSU. Technical sciences*, 2015, no. 5 (1), pp. 111—117. (In Russ.)
5. Safiullin R. R., Gorev A. E. On the issue of optimizing the planning of the transportation process of heavy loads by road. *Bulletin of Civil Engineer*, 2018, no. 5 (70), pp. 190—195. doi: 10.23968/1999-5571-2018-15-5-190-195. (In Russ.)
6. Safiullin R. N., Reznichenko V. V., Safiullin R. R. Software-adaptive control system for the process of heavy cargo transportation based on an automated control system for the mass and dimensions of the vehicle. *Journal of Physics: Conference Series, Saint Petersburg, 23—24 April, 2020*. Saint Petersburg, 2021, p. 012063. doi: 10.1088/1742-6596/1753/1/012063.
7. Burgonutdinov A. M., Istomina K. R., Kleveko V. I. Experimental studies of physico-mechanical processes in seasonally frozen soils of road structures. *Construction and geotechnics*, 2022, vol. 13, no. 3, pp. 98—106. doi: 10.15593/2224-9826/2022.3.09.
8. Mokhirev A. P., Medvedev S. O., Smolina O. N. Factors affecting the capacity of logging roads. *Forestry Journal*, 2019, vol. 9, no. 3 (35), pp. 103—113. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/10. (In Russ.)
9. Puzyreva O. K., Mokhirev A. P. Expert assessment of factors affecting the quality of wood chips. *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2015,

- no. 9 (20-2), pp. 245—249. (In Russ.)
10. Alatorcev D. A., Aleksikov S. V. Substantiation of the calculated characteristics of the soil of the roadbed. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*, 2005, no. 5, pp. 73—79. (In Russ.)
 11. Kamenchukov A. V. Influence of the moisture content of the pavement base on the bearing capacity of the road. *Transport systems of Siberia. Development of the transport system as a catalyst for the growth of the state economy: International Scientific and Practical Conference, 7—8 April 2016: Collection of scientific articles: In 2 parts*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2016, part 1, pp. 183—187. (In Russ.)
 12. Xu U., Huang H., Yang Z., Huang J. Structural analysis of the roadbed with backfill on a foundation with a lower bearing capacity using the finite element method. *Achievements of civil engineering*, 2021, p. 1690168. doi: 10.1155/2021/1690168.
 13. Galehdzhou B. K., Chelik S., Akbulut S. Experimental and numerical study of the bearing capacity of granular soil, which is affected by the roundness of particles. *IJGS*, 2017, no. 46 (10), pp. 2137—2145.
 14. Sarsembayeva A., Collins P. E. F. Assessment of frost resistance and mechanisms of moisture/chemical migration in the soil of highways using the method of laboratory modeling. *Science and Technology of cold regions*, 2017, vol. 133, pp. 26—35. doi: 10.1016/J.coldregions.2016.10.003.

© Мохирев А. П., Серватинский В. В., Дудин П. О., Сорокина М. Н.,
Мохирев И. А., Соколова А. Р., 2024