

Научная статья
УДК 681.269

Система платформенного взвешивания автомобилей в движении

Игорь Алексеевич Колчин

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН),
Москва, Россия

ig.ko@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8413-5593>

Аннотация. На сегодняшний день во всем мире большое распространение получили системы WIM. Они устанавливаются на дорогах общего пользования и предназначены для контроля весовых и габаритных характеристик проезжающих автомобилей. Данные системы развиваются и модифицируются в течение продолжительного периода времени, однако до сих пор имеют большое количество недостатков и проблем. Главные проблемы этих систем связаны с их высокой чувствительностью к управляющим воздействиям водителей на взвешиваемое транспортное средство. При изменении параметров движения анализируемого автомобиля данные системы перестают справляться с возложенной на них задачей. В данной работе была предложена принципиально новая архитектура системы WIM, которая основывается на методе платформенного взвешивания автомобилей в движении. Разработанная система полностью лишена недостатков и проблем, используемых на сегодняшний день систем WIM.

Ключевые слова: взвешивание, транспортное средство, движение, система взвешивания, СВГК, WIM, платформенное взвешивание.

Для цитирования: Колчин И.А. Система платформенного взвешивания автомобилей в движении // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 3 (45)

Original article

Platform weighing system for moving vehicles

Igor A. Kolchin

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN),
Moscow, Russia

ig.ko@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8413-5593>

№ 3(45)

сентябрь 2025

Abstract. Today, WIM systems are widely used all over the world. They are installed on public roads and are designed to monitor the weight and dimensions of passing vehicles. These systems have been developed and modified over time, but they still have many drawbacks and issues. The main problems with these systems are related to their high sensitivity to the drivers' control over the vehicle being weighed. When the driving parameters of the vehicle being analyzed change, these systems become unable to perform their intended function. In this work, a fundamentally new architecture of the WIM system was proposed, which is based on the method of platform weighing of vehicles in motion. The developed system is completely free of the shortcomings and problems of the WIM systems currently used.

Keywords: weighing, vehicle, movement, weighing system, WSCS, WIM, platform weighing.

For citation: Kolchin I.A. Platform weighing system for moving vehicles. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. № 3 (45)

Актуальность темы

В настоящее время любая страна обязательно является поставщиком или потребителем определенной номенклатуры товаров. За счет этого экономики стран тесно переплетаются друг с другом, в результате чего между странами возникает симбиоз, при котором каждая из сторон получает определенную выгоду. Из года в год количество товарных связей между странами становится все больше, а ранее существовавшие интеграции наращивают мощность за счет увеличения объема поставляемых и потребляемых товаров.

Товарные потоки между странами и внутри одной страны могут организовываться различными способами. Существует ограниченный набор способов, предназначенных для организации товарных связей:

- автомобильные грузоперевозки;
- железнодорожные грузоперевозки;
- морские и речные грузоперевозки;
- воздушные грузоперевозки;
- трубопроводный транспорт.

Выбор предпочтительного способа для транспортировки грузов является нетривиальной задачей. При ее решении необходимо учитывать ограничивающие факторы и экономические факторы.

К ограничивающим факторам относятся:

- наличие требуемой инфраструктуры (автомобильные дороги, железные дороги, порты, воздушные гавани, линии трубопроводов);
- характеристики транспортируемых товаров (габаритные размеры, масса одной единицы товара, специфические условия транспортировки товара).

К экономическим факторам относятся:

- количество товаров, перевозимых за один рейс;
- время транспортировки товара до конечного заказчика;
- вероятность порчи или утери товара при транспортировке;
- вероятность нарушения сроков доставки товара;
- приведенная стоимость транспортировки единицы товара.

Так для Российской Федерации структура грузоперевозок по видам транспорта приведена на рис. 1 [1]. Для других стран структура грузоперевозок по видам транспорта может немного отличаться. Различия будут обусловлены следующими факторами:

- размер сухопутной территории страны;
- размер водной территории страны;
- размер сухопутной территории страны, на которой преобладает горный рельеф;
- развитость транспортной инфраструктуры;
- количество стран-соседей по морю;
- количество стран-соседей по суше;
- степень экономической зрелости страны;
- степень развития технологий.



Рис. 1. Структура грузоперевозок по видам транспорта в Российской Федерации

Как можно видеть из рис. 1 самым популярным видом грузоперевозок считается автомобильный транспорт. На данный вид грузоперевозок приходится 68% от общего объема перевозимых грузов.

Многие организации, в погоне за прибылью, нередко, комплектуют транспортное средство избыточным количеством грузов, что вызывает перегруз автомобиля. Выполняя перевозку большего количества товаров за один рейс они экономят на заработной плате водителей и на количестве затраченного топлива, а также повышают стоимость реализации партии товаров.

За контролем за весовыми и габаритными характеристиками по всему миру и в Российской Федерации, в частности, устанавливают на дорогах общественного пользования системы WIM. Они позволяют анализировать весовые и габаритные характеристики каждого транспортного средства, проезжающего по заданному участку дороги. Определение всех характеристик автомобиля происходит автоматически без снижения скорости транспортного потока по каждой из полос движения. Однако применяемые на сегодняшний

день системы WIM имеют большое количество недостатков, влияющих на результат их работы [2].

Анализ современного состояния рассматриваемой проблемы

Проведенный анализ иностранных источников [3-19], посвященных системам WIM, позволил сделать вывод о том, что во всех проанализированных работах описываются методы, которые способствуют повышению точности действующих систем, но не решают основных проблем, которые свойственны данным системам.

Обоснование актуальности рассматриваемой проблемы

Современные системы WIM обладают рядом свойственных им проблем:

- проблема определения эквивалентных статических осевых нагрузок автомобиля при его резком ускорении или замедлении;
- проблема определения эквивалентных статических осевых нагрузок автомобиля при воздействии на него бокового ветра;
- проблема определения эквивалентных статических осевых нагрузок автомобиля при его маневрировании;
- проблема определения эквивалентных статических осевых нагрузок автомобиля при его движении с остановками;
- проблема определения межосевых расстояний автомобиля при ухудшении состояния дорожного полотна;
- проблема определения эквивалентных статических осевых нагрузок автомобиля при выпадении осадков.

Опыт использования систем WIM в Российской Федерации показывает, что эти системы очень чувствительны к действиям, предпринимаемым водителями транспортных средств и, как следствие, проблемы, описанные выше являются актуальными. Данный факт подтверждает статистика количества поданных апелляций для обжалования штрафов, сформированных системами WIM [20].

Постановка задачи

Целью данной работы является разработка архитектуры системы платформенного взвешивания автомобилей в движении, которая не имеет проблем, свойственных применяемым на сегодняшний день системам WIM.

Методы решения задачи

Для решения задачи работы использовалась теория решения изобретательских задач (ТРИЗ). При использовании обозначенной выше теории и на основании метода платформенного взвешивания автомобиля в движении были разработаны компонентный состав системы, кинематическая схема весоизмерительного устройства и общая структура пункта платформенного взвешивания автомобилей в движении.

Метод взвешивания автомобиля в движении с его полным заездом на весоизмерительную платформу

Задача динамического взвешивания автомобиля заключается в вычислении для каждого из моментов времени всех значений нагрузок и координат точек их приложения. Определение искомых параметров выполняется с использованием показаний тензометрических датчиков, которые расположены в основании платформы.

Метод состоит из четырех последовательно запускаемых процессов:

1. Определение величин и положений равнодействующих сил, приложенных к платформе, для каждого из моментов времени;
2. Определение положений осей автомобиля на платформе для каждого из моментов времени;
3. Определение расстояний между рядом расположенными осями транспортного средства;
4. Определение величин сил, возникающих под действием осей автомобиля, для каждого из моментов времени.

Перед тем, как приступить к выполнению вышеизложенных процессов, производится получение показаний со всех тензометрических датчиков за период времени, в течение которого анализируемое транспортное средство находилось на весоизмерительной платформе. При этом каждое показание снабжается временной меткой, соответствующей моменту измерения.

Определение величин и положений равнодействующих сил происходит независимо для каждого из рассматриваемых моментов времени. Под равнодействующими силами понимаются силы, приложенные к соответствующим сегментам платформы и оказывающие на нее то же влияние, что и набор сил, возникающих под действием осей автомобиля и приложенных к тем же сегментам. Процесс вычисления значений и координат приложения результирующих сил основывается на применении имитационной модели процесса взвешивания и алгоритме оптимизации, который стремится подобрать такие значения и координаты сил, при которых реакции в опорах модели будут соответствовать показаниям реальных тензометрических датчиков за рассматриваемый момент времени.

На следующем этапе выполняется определение положения осей автомобиля на платформе для каждого из моментов времени. Производимые вычисления основываются на анализе перемещений результирующих сил для каждого из сегментов в течение периода времени пребывания автомобиля на платформе.

Целью третьего процесса является определение линейных расстояний между соседними осями рассматриваемого автомобиля. Для этого по данным из предыдущего процесса строится взвешенный, неориентированный граф, состоящий из вершин и ребер. Вершины графа представляют из себя порядковые номера осей, а ребра графа соответствуют линейным расстояниям между ними.

Заключительный процесс определения величин сил, возникающих под действием осей автомобиля, выполняется независимо для каждого из анализируемых моментов времени. В данном процессе применяется имитационная модель процесса взвешивания и алгоритм оптимизации, который стремится подобрать такие значения осевых нагрузок, при которых показания с виртуальных тензодатчиков, расположенных в основании платформы, будут соответствовать значениям, полученным с реальных тензодатчиков.

В результате применения рассмотренного метода система WIM обладает следующими данными:

- количество осей транспортного средства;
- значения мгновенных скоростей транспортного средства;
- средняя скорость транспортного средства;
- расстояния между всеми осями транспортного средства;
- значения мгновенных ускорений транспортного средства;
- среднее ускорение транспортного средства;
- значения мгновенных осевых нагрузок транспортного средства;
- средние значения осевых нагрузок транспортного средства;
- значение общей массы транспортного средства;
- значения мгновенных нагрузок приходящихся на группы осей транспортного средства;
- средние значения нагрузок приходящихся на группы осей транспортного средства.

Структура пункта платформенного взвешивания автомобилей в движении

Пункт платформенного взвешивания автомобилей в движении состоит из тензометрических датчиков, обзорных камер и индукционных петель. Тензометрические датчики позволяют определять осевые нагрузки,

возникающие между осями автомобиля и поверхностью весоизмерительной платформы, общую массу, межосевые расстояния, мгновенную скорость и мгновенное ускорение транспортного средства. В свою очередь, обзорные камеры позволяют следить за обстановкой на весоизмерительном пункте и фиксировать правонарушения. Индукционные петли выполняют функцию разделения потока автомобилей на отдельные элементы, которые можно анализировать. На рисунке 2 представлена архитектура системы платформенного взвешивания автомобилей в движении для одной полосы дороги.

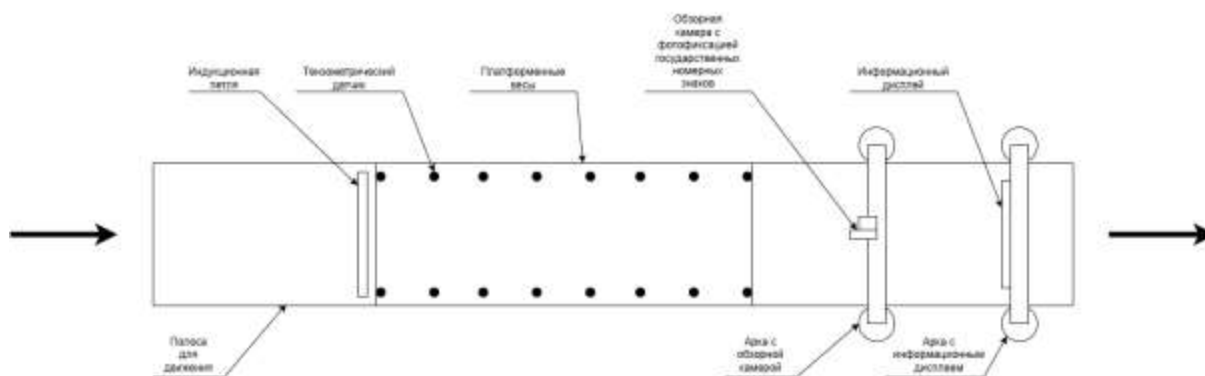


Рис. 2. Архитектура системы платформенного взвешивания автомобилей в движении

На выделенной полосе дороги располагаются:

- индукционная петля;
- набор тензометрических датчиков;
- платформа;
- арка с обзорной камерой;
- обзорная камера;
- арка с информационным дисплеем;
- информационный дисплей.

Полосы, на которых расположены пункты взвешивания, в обязательном порядке должны быть разделены сплошной линией во избежание перестроения автомобиля во время процесса определения весовых характеристик. Транспортные средства, которые пересекли сплошную полосу

или попытались съехать на обочину должны отслеживаться и удаляться из потока автомобилей для проведения статического взвешивания автомобиля.

Процесс взвешивания транспортного средства выполняется в четыре этапа:

1. Автомобиль въезжает на индукционную петлю, которая фиксирует над собой скопление метала и информирует систему о прибытии нового транспортного средства, подлежащего взвешиванию;

2. Автомобиль пересекает границу весоизмерительной платформы и продолжает по ней движение, при этом система подсчитывает количество осей у анализируемого транспортного средства, определяет расстояния между ними, определяет их положение относительно платформы и вычисляет осевые нагрузки, общую массу, значения мгновенных скоростей и ускорений;

3. Автомобиль покидает индукционную петлю, которая перестает фиксировать над собой скопление метала и информирует систему о том, что транспортное средство полностью находится на весоизмерительной платформе;

4. Автомобиль покидает весоизмерительную платформу, при этом система рассчитывает весовые характеристики транспортного средства, при необходимости фиксирует и формирует электронное событие с правонарушением, отображает на дисплее измеренные характеристики с сообщением о рекомендуемом маршруте дальнейшего движения.

Весоизмерительная платформа должна иметь возможность производить взвешивание транспортных средств, которые имеют максимальную допустимую длину. В соответствии с законами Российской Федерации, максимальная длина грузового автомобиля не должна превышать 20 метров. Учитывая данное значение, длина платформы была выбрана равной 24 метрам.

Часть платформы, расположенная между двумя соседствующими тензометрическими датчиками, называется сегментом платформы. Размер

сегмента платформы определяется исходя из требования, что над каждым сегментом платформы в каждый момент времени не должно находиться более двух осей транспортного средства. Учитывая тот факт, что минимальный диаметр колеса грузового автомобиля составляет 684 миллиметра и длина пятна контакта колеса с дорогой не превышает 100 миллиметров, можно определить длину сегмента платформы. Максимальная длина сегмента платформы, которая позволяет удовлетворить условие наличия на платформе в любой из моментов времени не более двух осей, составляет 1268 миллиметров, при условии, что колеса установлены вплотную друг к другу, чего в реальном мире не бывает. На основании полученного значения выбирается фактическая длина сегмента платформы, соответствующая 1200 миллиметрам. На рисунке 3 представлена кинематическая схема весоизмерительной платформы.

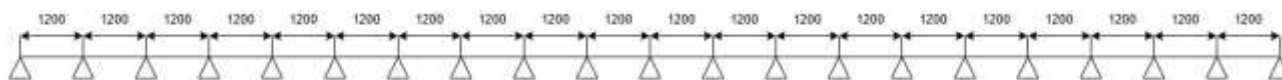


Рис. 3. Кинематическая схема весоизмерительной платформы

В результате весоизмерительная платформа состоит из 20 сегментов и имеет в своем составе 42 тензометрических датчика.

Обсуждение результатов

Предложенная в работе система платформенного взвешивания автомобилей в движении спроектирована для замены существующих систем WIM. Разработанная система лишена проблем, которые свойственны действующим системам WIM. Данная система может использоваться как при динамическом взвешивании автомобилей в движении, так и при статическом взвешивании. Архитектура рассматриваемой системы сильно отличается от архитектуры существующих на сегодняшний день систем WIM. При активном внедрении описанной в работе системы, потребуется техническое

переоснащение весоизмерительных пунктов, которые эксплуатируются на сегодняшний день.

Заключение

В современном мире огромную роль в жизни любого государства и общества играют оптимальные с точки зрения стоимости и времени реализации логистические маршруты. Транспортировка грузов внутри каждой страны реализуется, преимущественно, с использованием грузовых автомобилей. В погоне за прибылью многие компании выполняют рейсы по доставке грузов с использованием перегруженных транспортных средств. Эти действия пагубно влияют на дорожную инфраструктуру страны и увеличивают вероятность возникновения на дорогах общественного пользования дорожно-транспортных происшествий. Для контроля характеристик грузового транспорта в большинстве технологически развитых стран прибегают к использованию систем WIM. Однако, несмотря на историю развития подобных систем, они до сих пор имеют ряд актуальных проблем:

- проблема определения эквивалентных статических осевых нагрузок автомобиля при его резком ускорении или замедлении;
- проблема определения эквивалентных статических осевых нагрузок автомобиля при воздействии на него бокового ветра;
- проблема определения эквивалентных статических осевых нагрузок автомобиля при его маневрировании;
- проблема определения эквивалентных статических осевых нагрузок автомобиля при его движении с остановками;
- проблема определения межосевых расстояний автомобиля при ухудшении состояния дорожного полотна;
- проблема определения эквивалентных статических осевых нагрузок автомобиля при выпадении осадков.

Причины возникновения вышеизложенных проблем связаны с используемым в действующих системах WIM методом взвешивания автомобилей.

Для решения всех вышеизложенных проблем действующих систем WIM в работе была разработана новая система платформенного взвешивания автомобилей в движении. Она позволяет проводить взвешивание транспортных средств с их проездом через весоизмерительную платформу, габариты которой соответствуют габаритам анализируемого автомобиля.

Список источников

1. Транспорт и логистика: переориентация направлений и изменения в структуре. [Электронный ресурс] // Эксперт РА – 2023. – URL: https://raexpert.ru/researches/traffic_2023/ (дата обращения: 14.08.2024).
2. Rocheti, E.O. Weigh-In-Motion Systems Review: Methods for Axle and Gross Vehicle Weight Estimation / E.O. Rocheti, R.M. Bacurau // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12, № 99. – DOI 10.1109/ACCESS.2024.3461653.
3. Kulauzović, B. Portable WIM as a Tool For Realistic Traffic Loading Factors on Macedonian National Road Network / B. Kulauzović, J. Jamnik // ICWIM8. – 2019. – P. 32.
4. Heidari, F. Application of Deep Learning Technique in High Speed Weigh-in-Motion Systems for Direct Enforcement / F. Heidari, M. Pouyan // ICWIM8. – 2019. – P. 126.
5. Masud M.M. Effect of static weight errors on Weigh-in-Motion (WIM) system accuracy / M.M. Masud, S.W. Haider // Measurement. – 2023. – Vol. 206. – P. 112301. – DOI 10.1016/j.measurement.2022.112301.
6. Effects of Sensor Location on Dynamic Load Estimation in Weigh-in-Motion System / T. Qin, M. Lin, M. Cao, K. Fu // Sensors. – 2018. – Vol. 18, №9. – P. 3044. – DOI 10.3390/s18093044.
7. Tran, N.H. Development and Influence of Statewide Axle Load Spectra on Flexible Pavement Performance / N.H. Tran, K.D. Hall // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2007. – Vol. 2037, №1. – P. 106-114.
8. Hazlett D. Use of Weigh-in-motion Data for Pavement, Bridge, Weight Enforcement, and Freight Logistics Applications / D. Hazlett, N. Jiang, L. Loftus-Otway. – Washington, DC: The National Academies Press, 2020. – ISBN 978-0-309-48125-0.

9. Impact of WIM Systematic Bias on Axle Load Spectra-A Case Study / M.M. Masud, S.W. Haider, O. Selezneva, D.J. Wolf // *Advances in Materials and Pavement Performance Prediction II: Contributions to the 2nd International Conference on Advances in Materials and Pavement Performance Prediction (AM3P 2020)*, 27-29 May, 2020, San Antonio, TX, USA. – P. 64.
10. Jacob B. Weigh-in-motion for Direct Enforcement of Overloaded Commercial Vehicles / B. Jacob, L.-M. Cottineau // *Transportation Research Procedia*. – 2016. – Vol. 14. – P. 1413-1422. – DOI 10.1016/j.trpro.2016.05.214.
11. Traffic volume and load data measurement using a portable weigh in motion system: A case study / A.N.M. Faruk, W. Liu, S.I. Lee, B. Naik // *International Journal of Pavement Research and Technology*. – 2016. – Vol. 9, №3. – P. 202-213. – DOI 10.1016/j.ijprt.2016.05.004.
12. Prozzi, J.A. Effect of Traffic Load Measurement Bias on Pavement Life Prediction / J.A. Prozzi, F. Hong, A. Leung // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2008. – Vol. 2087, №2087. – P. 91–98. – DOI 10.3141/2087-10.
13. Farkhideh, N. Evaluation of Accuracy of Weigh-In-Motion Systems in Alberta / N. Farkhideh, S. Nassiri, A. Bayat // *International Journal of Pavement Research and Technology*. – 2014. – Vol. 7, №3. – P. 169–177. – DOI 10.6135/ijprt.org.tw/2014.7(3).169.
14. Wang, Y. Axle Load Distribution for Mechanistic–Empirical Pavement Design / Y. Wang, D.E. Hancher, K. Mahboub // *Journal of Transportation Engineering*. – 2007. – Vol. 133, №8. – P. 469–479. – DOI 10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:8(469).
15. Ahmed, A.W. Characterisation of heavy traffic axle load spectra for mechanistic-empirical pavement design applications / A.W. Ahmed, S. Erlingsson // *International Journal of Pavement Engineering*. – 2014. – Vol. 16, №6. – P. 488–501. – DOI 10.1080/10298436.2014.943131.
16. Investigation of the effects of air temperature and speed on performance of piezoelectric weigh-in-motion systems / S. Hashemi Vaziri, C.T. Haas, L. Rothenburg, Ralph C. Haas // *Canadian Journal of Civil Engineering*. – 2013. – Vol. 40, №10. – P. 935–944. – DOI 10.1139/cjce-2012-0227.
17. Assessment of Factors Affecting Measurement Accuracy for High-Quality Weigh-in-Motion Sites in the Long-Term Pavement Performance Database / S.W. Haider, M.M. Masud, O. Selezneva, D.J. Wolf // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2020. – Vol. 2674, №4. – P. 269–284. – DOI 10.1177/0361198120937977.
18. Suangga, M. Simple Span Bridge Loading Based on Weight in Motion Data / M. Suangga, Mahathir // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 794, №1. – P. 012064. – DOI 10.1088/1755-1315/794/1/012064.

19. Socha, A. Strain Gauge Calibration for High Speed Weight-in-Motion Station / A. Socha, Ja. Izydorczyk // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24, №15. – P. 4845. – DOI 10.3390/s24154845.
20. Опыт метрологического обеспечения разработки и эксплуатации АПВГК. [Электронный ресурс] // Тензо М. – 2024. – URL: <https://www.tenso-m.ru/publications/417/> (дата обращения: 14.06.2025).

References

1. Transport i logistika: pereoriyentatsiya napravleniy i izmeneniya v structure, Ekspert RA, 2023, available at: https://raexpert.ru/researches/traffic_2023/ (04.08.2025).
2. Rocheti E.O., Bacurau R.M. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, no. 99.
3. Kulauzović B., Jamnik J. *ICWIM8*, 2019, p. 32.
4. Heidari. *ICWIM8*, 2019, p. 126.
5. Masud M.M., Haider S.W. *Measurement*, 2023, vol. 206, pp. 112301.
6. Qin T., Lin M., Cao M., Fu K. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 9, pp. 3044.
7. Tran N.H., Hall K.D. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2007, vol. 2037, no. 1, pp. 106-114.
8. Hazlett D., Jiang N., Loftus-Otway L. Use of Weigh-in-motion Data for Pavement, Bridge, Weight Enforcement, and Freight Logistics Applications Washington, DC, The National Academies Press, 2020.
9. Masud M.M., Haider S.W., Selezneva O., Wolf D.J. Advances in Materials and Pavement Performance Prediction II: Contributions to the 2nd International Conference on Advances in Materials and Pavement Performance Prediction (AM3P 2020), San Antonio, TX, USA, 2020, pp. 64.
10. Jacob B., Cottineau L.-M. *Transportation Research Procedia*, 2016, vol. 14, pp. 1413-1422.
11. Faruk A.N.M., Liu W., Lee S.I., Naik B. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 202–213.
12. Prozzi J.A., Hong F., Leung A. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2008, vol. 2087, no. 2087, pp. 91–98.
13. Farkhideh N., Nassiri S., Bayat A. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 169–177.
14. Wang Y., Hancher D.E., Mahboub K. *Journal of Transportation Engineering*, 2007, vol. 133, no. 8, pp. 469–479.
15. Ahmed A.W., Erlingsson S. *International Journal of Pavement Engineering*, 2014, vol. 16, no. 6, pp. 488–501.

16. Hashemi Vaziri S., Haas C.T., Rothenburg L., Haas Ralph C. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2013, vol. 40, no. 10, pp. 935–944.
17. Haider S.W. Masud M.M., Selezneva O., Wolf D.J. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2020, vol. 2674, no. 4, pp. 269–284.
18. Suangga M., Mahathir. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 794, no. 1, pp. 012064.
19. Socha A., Izydorczyk Ja. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 15, pp. 4845.
20. Tenso M. Опыт метрологического обеспечения разработки и эксплуатации APVGK, available at: <https://www.tenso-m.ru/publications/417/> (14.06.2025).

Рецензент: В.Н. Зузов, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана

Информация об авторе

Колчин Игорь Алексеевич, аспирант, ИМАШ РАН.

Information about the author

Igor A. Kolchin., postgraduate, IMASH RAN.

Статья поступила в редакцию 04.09.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 25.09.2025.

The article was submitted 04.09.2025; approved after reviewing 17.09.2025; accepted for publication 25.09.2025.