

Научная статья
УДК 625.084
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-346-355>
EDN: YMZNVТ



ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УПРУГОДЕФОРМИРУЕМОЙ ЛЕНТЫ В КОМБИНИРОВАННОМ УПЛОТНЯЮЩЕМ ОБОРУДОВАНИИ ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

О.Ю. Казаков¹ ✉, А.Г. Савельев²

¹Конструкторское бюро точного машиностроения им. А.Э. Нудельмана,
г. Москва, Россия

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия

✉ ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Процесс уплотнения асфальтобетона является одним из важнейших при строительстве дорожного покрытия. Традиционные методы уплотнения включают в себя воздействие со стороны отряда катков с гладкими или вибрационными вальцами. Как альтернатива предложен вариант для непрерывного уплотнения в виде комбинированного уплотняющего оборудования. Основным рабочим органом является валец со смещённой осью вращения, оказывающий многократное воздействие на уплотняемый материал. Этот процесс является комплексным, поэтому в статье рассматривается гипотеза обоснования целесообразности использования упругодеформируемой ленты в комбинированном уплотняющем оборудовании для асфальтобетонных смесей.

Материалы и методы. Для проведения экспериментальных исследований сконструирован лабораторный стенд, составлена методика проведения экспериментов, показывающих влияние наличия упругодеформируемого ленточного элемента на качество готового покрытия. В качестве показателя выбрана величина призмы выброса материала перед рабочим органом, значение которой влияет на равномерность уплотнения и целостность структуры материала.

Результаты. Полученные в процессе экспериментов данные были зафиксированы, систематизированы и проанализированы для последующего анализа, показавшего следующее: в случае наличия прослойки между рабочим органом и уплотняемым материалом упругодеформируемого ленточного элемента заметно уменьшается величина призмы материала перед вальцом, что повышает качество готового покрытия.

Заключение. В результате исследования была доказана гипотеза о необходимости наличия упругодеформируемого ленточного элемента в конструкции комбинированного уплотняющего оборудования для повышения качества готового дорожного покрытия из асфальтобетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: уплотнение, асфальтобетонная смесь, асфальтобетонное покрытие, дорожное полотно, лабораторный стенд, исследование, эксперимент, упругодеформируемый ленточный элемент

БЛАГОДАРНОСТИ: Кустареву Геннадию Владимировичу за ценный вклад в предложение к реализации конструкции комбинированного уплотняющего оборудования и идею к эксперименту. Пахомовой Наталье Константиновне за поддержку в популяризации научных исследований и помощь в редактировании материалов статьи. Анонимным рецензентам и редакции Вестника СибАДИ за труд над данной статьёй.

Статья поступила в редакцию 20.04.2025; одобрена после рецензирования 03.06.2025; принята к публикации 16.06.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Казаков О.Ю., Савельев А.Г. Обоснование использования упругодеформируемой ленты в комбинированном уплотняющем оборудовании для асфальтобетонных смесей // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 346-355. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-346-355>

© Казаков О.Ю., Савельев А.Г., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-346-355>
EDN: YMZNVT

JUSTIFICATION OF THE USE OF ELASTICALLY DEFORMABLE BELT IN COMBINED COMPACTION EQUIPMENT FOR ASPHALT CONCRETE MIXTURES

Oleg Y. Kazakov¹ ✉, Andrey G. Savelyev²

¹A.E. Nudelman Precision Engineering Design Bureau,
Moscow, Russian

²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)
Moscow, Russian

✉ corresponding author
4informatika@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The process of asphalt concrete compaction is one of the most important in the construction of road surfaces. Traditional compaction methods include the impact of a row of rollers with smooth or vibrating drums. As an alternative, a variant for continuous compaction in the form of combined compaction equipment is proposed. The main working element of which is a drum with an offset axis of rotation, which has a multiple effect on the compacted material. This process is a complex, therefore, the article considers the hypothesis of substantiating the feasibility of using an elastic-deformable belt in combined compaction equipment for asphalt concrete mixtures.

Materials and methods. A laboratory stand was designed to conduct experimental studies, and a methodology for carrying out experiments demonstrating the effect of the presence of an elastically deformable belt element on the quality of the finished coating was developed. The size of the prism of the material ejection in front of the working element was chosen as a quality indicator, the value of which affects the uniformity of compaction and the integrity of the material structure.

Results. The data obtained by the experiments were recorded, systematized and analyzed for subsequent study, which showed the following: in the case of the presence of a layer between the working element and the compacted material - elastically deformable belt element, the size of the material prism in front of the roller is noticeably reduced, which shows an increase in the quality of the finished coating. **Conclusion.** As a result of the survey, the hypothesis about the necessity of the elastically deformable belt element in the design of combined compaction equipment for improving the quality of the finished asphalt concrete road surface was proven.

KEYWORDS: compaction; asphalt concrete mixture; asphalt concrete pavement; road surface; laboratory stand; research; experiment; elastically deformable belt element

ACKNOWLEDGMENTS: The authors express their gratitude to Gennadiy Vladimirovich Kustarev for his valuable contribution to the development of the design of combined compaction equipment and the idea for the experiment. The authors are very grateful to Pakhomova Natal'ya Konstantinovna for her support in popularization of scientific researches and her help in editing article materials. The authors would like to thank anonymous reviewers and the editorial board of the SibADI Bulletin for their work on this article.

The article was submitted: April 20, 2025; approved after reviewing: June 18, 2025; accepted for publication: June 16, 2025.

All 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. Kazakov O.Yu., Savelyev A.G. Justification of the use of elastically deformable belt in combined compaction equipment for asphalt concrete mixtures. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 346-355. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-346-355>

© Kazakov O.Yu., Savelyev A.G., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

Уплотнение асфальтобетонных смесей при помощи катков является важным процессом устройства покрытия дорожной сети [1, 2]. Классический метод повышения плотности асфальтобетона при помощи циклического укатывания гладким металлическим и вибрационным вальцами уплотнения широко применяется долгое время по всему миру. А новые научные изыскания расширяют знания о физико-химических, структурно-механических и прочих свойствах асфальта [3].

С целью повышения качества покрытия и скорости укладки, специалисты в области дорожного строительства предлагают альтернативные подходы. Так, кафедра дорожно-строительных машин Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) предложила новый подход для скоростной укладки асфальтобетонного покрытия, основным отличием которого от классического подхода была непрерывная выгрузка смеси в виде валика с последующей загрузкой перегружателем в асфальтоукладчик.

Для развития и модернизации данного подхода было разработано и запатентовано¹ новое комбинированное уплотняющее оборудование для асфальтобетонных смесей (рисунок 1).

Одним из отличий данного оборудования от классического катка является непрерывность работы [4]. Отсутствие циклического возвратно-поступательного движения вдоль дорожного покрытия является фактором образования дефектов [5, 6]. Основным рабочим органом выступает валец со смещенной осью вращения, расположенные определенным образом на расстояниях $K_{1...3}$ и $T_{1...4}$. За счёт определенных заранее заданных параметров расположения данной оси по отношению к уплотняемому материалу под углом β и многократных ударных воздействий производится повышение плотности и формирование более прочной структуры смеси. Уплотнение выполняется несколькими рабочими органами с учетом предварительного и окончательного уплотнения опорными вальцами. В результате осадки толщина слоя материала меняется с H_1 на H_2 .

Конструкция включает в себя упругодеформируемый ленточный элемент, посредством которого вращающиеся вальцы оказывают воздействие на материал. В научной работе по исследованию влияния ленточного элемента на процесс возвратно-поступательного укатывания материала было выяснено, что его наличие позволяет [7, 8]:

- снизить деформации вдоль направления движения рабочего органа на 10%;
- снизить поперечные деформации на 5%;
- снизить величину деформации по глубине на 40%.

Это позволяет сформулировать гипотезу, состоящую в том, что применение ленточного элемента в конструкции комбинированного уплотняющего оборудования положительно скажется на качестве готового покрытия. С целью обоснования данного предположения проведено соответствующее экспериментальное исследование, учитывая опыт проведения подобных экспериментов [9, 10].

Объектом исследования является уплотнение материала при помощи вальца многократного воздействия посредством упругодеформируемого ленточного элемента.

Предметом исследования выбрана величина волнообразования перед рабочим органом. Чем больше материала выталкивается перед вальцом, тем больше разрушается структура асфальтобетона, что может привести к появлению дефектов (в т.ч. продольные и поперечные трещины) и нарушениям ровности и гладкости готового дорожного покрытия (из-за неравномерности волнообразования и последующей укатки неравномерно распределенного материала).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Местом проведения эксперимента выбрана лаборатория на материальной базе и с участием научных специалистов ООО «ФИЗЛАБПРИБОР». В качестве лабораторного стенда для исследований работы вальца со смещенной осью вращения использовалось специальное разработанное и изготовленное оборудование (рисунок 2) [11].

¹ Устройство для уплотнения горячих асфальтобетонных смесей и грунтов: Патент РФ № 194303. № 2019122624; заявл. 18.07.2019; опубл. 05.12.2019, Бюл. № 34. 4 с.

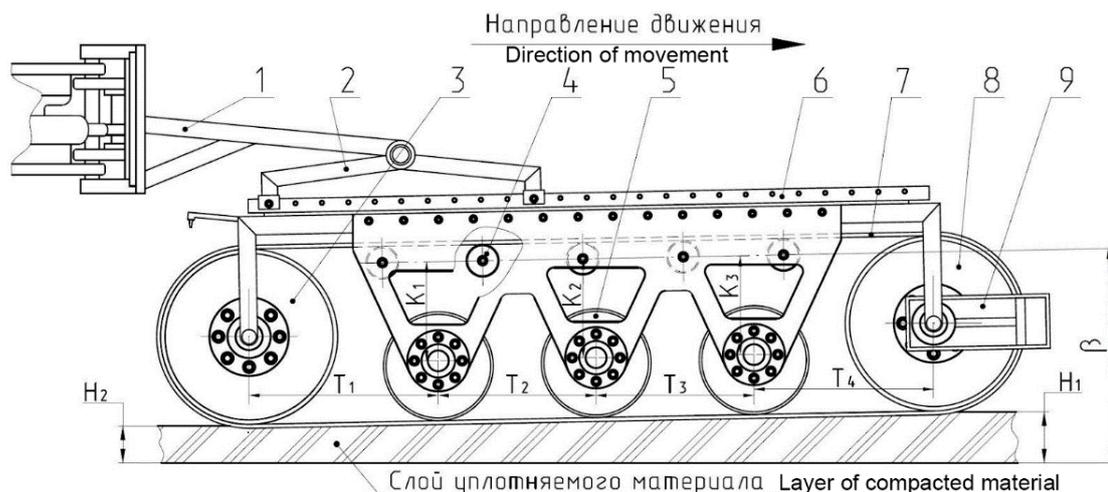


Рисунок 1 – Комбинированное уплотняющее оборудование и основные элементы:
 1 – толкающий брус машины-носителя; 2 – крепёж-балансир; 3 – ведомый опорный валец;
 4 – вспомогательный валец для поддержания ленты; 5 – рабочий уплотняющий орган в виде вальца многократного воздействия; 6 – рама; 7 – упругодеформируемый ленточный элемент;
 8 – ведущий опорный валец; 9 – механизм натяжения ленточного элемента
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Combined compaction equipment and main elements:
 1 – pushing beam of the carrier machine; 2 – balancer fastener; 3 – driven support roller;
 4 – auxiliary roller for supporting the belt; 5 – working compaction element in the form of a multiple action roller;
 6 – frame; 7 – elastically deformable belt element; 8 – leading support roller;
 9 – belt element tensioning mechanism
 Source: compiled by the authors.

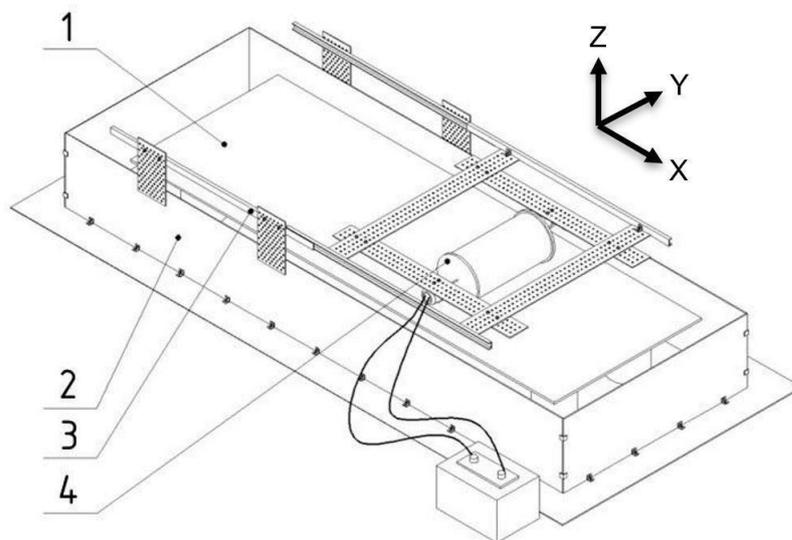


Рисунок 2 – Принципиальная схема и основные узлы лабораторного стенда:
 1 – основание для размещения емкости с уплотняемым материалом;
 2 – корпус лабораторного стенда; 3 – выдвижная конструкция;
 4 – рабочий орган в виде вальца со смещенной осью вращения
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Schematic diagram and main units of the laboratory stand:
 1 – base for placing a container with compacted material; 2 – body of the laboratory stand;
 3 – retractable structure; 4 – working element in the form of a roller with an offset axis of rotation
 Source: compiled by the authors.

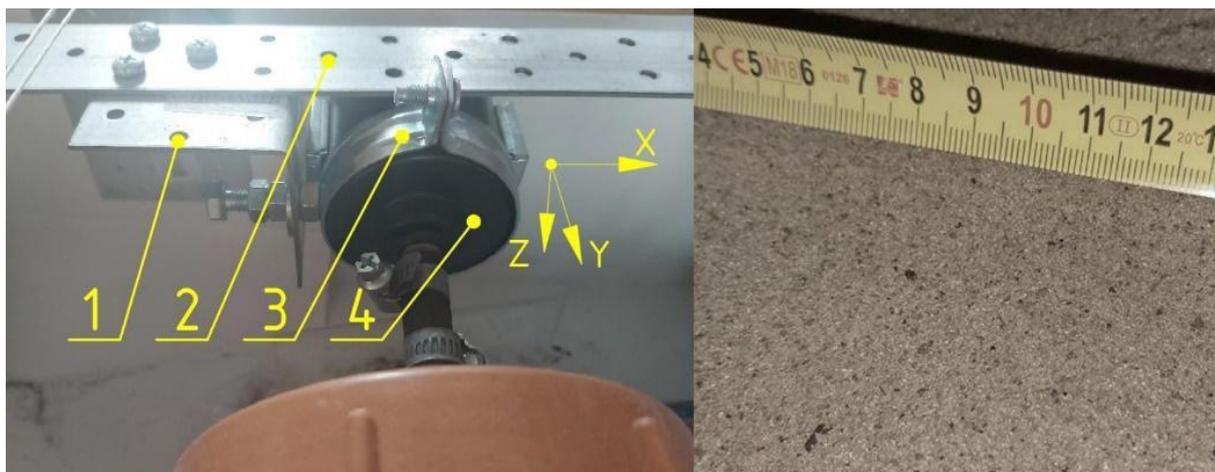


Рисунок 3 – Иллюстрации элементов лабораторного стенда (авторские фотографии): слева – метод монтажа к выдвижной конструкции 2-го рабочего органа, электромотора 4 при помощи кронштейна 1 и крепежа 3; справа – уплотняемый материал, моделирующий холодную песчаную асфальтобетонную смесь типа Гх
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Illustrations of laboratory stand elements (author's photographs): on the left – the method of mounting to the retractable structure the 2-nd working element, electric engine 4 using bracket 1 and fasteners 3; on the right – the compacted material simulating a cold sand asphalt concrete mixture of type Gx
Source: compiled by the authors.

Особенности крепления рабочего органа к выдвижной конструкции и уплотняемый материал показаны на рисунке 3. Особое внимание было уделено прочностным расчетам с учетом зарубежного опыта [12, 13], что позволило снизить погрешность по вине оборудования из-за люфтов, колебаний и т.п.

В качестве уплотняемого материала для моделирования холодной песчаной асфальтобетонной смеси [14, 15] типа Гх при проведении экспериментальных исследований применялась смесь кварцевого песка и масла, обладающего следующими параметрами: сцепление материала от 0,7 до 0,8 кг/см²; число ударов ударника ДОРНИИ от 8 до 9 раз; угол внутреннего трения от 28 до 32°; угол внешнего трения от 18 до 21°; объемный вес 2 г/см³. Это обосновывает достаточную степень сходства с моделируемым материалом [16, 17, 18].

Исследование проводится для подтверждения необходимости применения упругодеформируемого ленточного элемента в комбинированном уплотняющем оборудовании для увеличения эффективности процесса уплотнения в виде снижения величины призмы волнообразования. Оно включает два эксперимента, отличающихся наличием и отсутствием упругодеформируемого ленточного элемента в процессе работы вальца многократного воздействия.

Схема проведения эксперимента с упругодеформируемым ленточным элементом представлена на рисунке 4, где валец многократного воздействия радиусом R вращается вокруг собственной смещенной по отношению к геометрическому центру на величину эксцентриситета E оси с угловой скоростью ω за счёт электромотора при одновременном движении подвижного кронштейна рабочего органа вдоль ёмкости с уплотняемым материалом с постоянной скоростью $V_{\text{пм}}$ за счёт работы электролебедки (моделирующей поступательное движение машины-носителя).

Ось вальца многократного воздействия находится на расстоянии от внутренней поверхности упругодеформируемого ленточного элемента толщиной δ .

В таблице показаны наименование и значение основных параметров лабораторного стенда, используемых для проведения данного исследования.

В рамках исследования проведено 2 эксперимента, где параметры R , $V_{\text{пм}}$, L , N , E , h выступают в роли неизменных величин. Изменялось лишь наличие или отсутствие упругодеформируемого ленточного элемента. Таким образом, первый эксперимент проведен с использованием ленточного элемента, а второй – без.

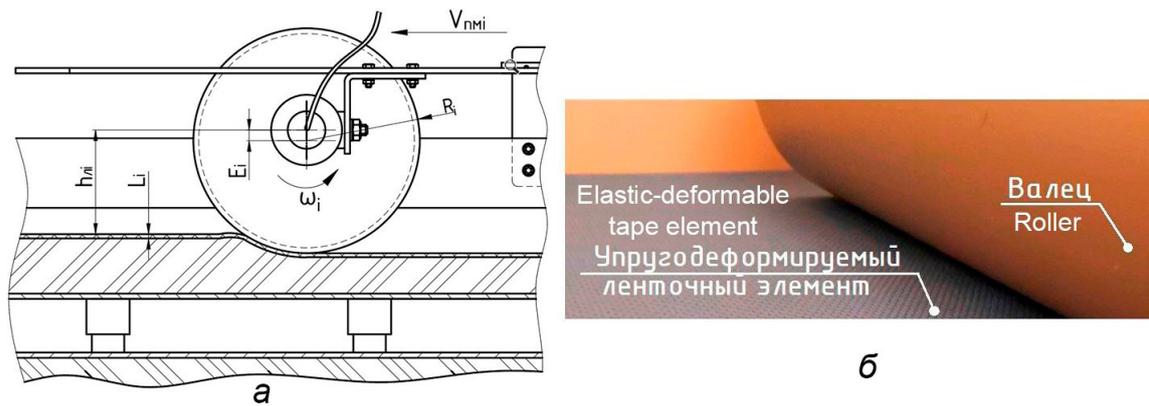


Рисунок 4 – Работа вальца многократного воздействия с ленточным элементом: а – принципиальная схема (изображен эксперимент с присутствующим упругодеформируемым ленточным элементом); б – подготовка к эксперименту (авторская фотография) Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Operation of a multiple impact roller with a belt element: а – schematic diagram (depicts an experiment with an elastically deformable belt element); б – preparation for the experiment (author’s photograph) Source: compiled by the authors.

Таблица
Наименование и значение параметров лабораторного стенда
Источник: составлено авторами.

Table
Name and significance of laboratory stand parameters
Source: compiled by the authors.

Наименование параметра	Значение параметра
Радиус вальца многократного воздействия R	105 мм
Скорость поступательного движения V_{nm} выдвижной конструкции	15 мм/с
Толщина упругодеформируемого ленточного элемента L	5 мм
Частота вращения вальца многократного воздействия N	1,75 об/с
Эксцентриситет оси вращения E	6 мм
Расстояние от оси вращения до внутренней поверхности упругодеформируемого ленточного элемента h_d	100 мм

Количество повторений для каждого эксперимента равно 5 для усреднения полученных результатов и снижения влияния случайных погрешностей на полученные данные. При этом подготовка к эксперименту каждый раз производится заново и включает в себя следующие шаги:

1. Позиционирование емкости для материала в рабочем пространстве лабораторного стенда. Распределение по емкости и предварительное уплотнение материала согласно аналогичным исследованиям. Слой материала укладывается толщиной 50 мм и предварительно уплотняется до коэффициента 0,6, обусловленный лабораторными условиями.

Его значение вычисляется с помощью объемного (геометрического) метода [19].

2. При необходимости (в зависимости от вида эксперимента) поверхность подготовленного материала располагается упругодеформируемый ленточный элемент. В качестве чего выступает силиконовое полотно толщиной 5 мм со следующими параметрами: твердость 30 ± 3 Шор А; плотность $0,8 \text{ г/см}^3$; относительное удлинение от 300 до 400%; условная прочность от 5 до 7 МПа; термостойкость от 200 до 250 °С.

3. Валец многократного воздействия с радиусом R располагается на выдвижной конструкции с закреплением необходимого значения эксцентриситета E .

4. Электрический привод вальца многократного воздействия подключается к источнику электропитания и включается, заставляя валец многократного воздействия совершать постоянные по частоте и угловой скорости вращения вокруг собственной оси с эксцентриситетом E .

5. Выдвижная конструкция приводится в движение при помощи электролебедки и перемещается с постоянной скоростью $V_{\text{пм}}$.

6. В произвольный момент времени, когда вращающийся валец многократного воздействия прошел от $1/3$ до $2/3$ продольной длины емкости для материала, уплотнение останавливается (продольное перемещение выдвижной конструкции прекращается, а привод вращения вальца отключается от электрической сети). Выдвижная конструкция отводится в начало пути, а упругодеформируемый

ленточный элемент (при его наличии) удаляется для возможности фиксации результатов эксперимента.

Аппроксимация призмы волнообразования проводится путём упрощения площади сечения до простейшей фигуры. На рисунке 5 показан пример с заменой сечения на треугольник с точками A , B и C . Измерения производятся после удаления упругодеформируемого ленточного элемента и вальца при помощи штангенциркуля с глубиномером. При этом точка B показывает также и высоту призмы $h_{\text{пр}}$ по отношению к поверхности уплотненного материала (основание треугольника). Вычисление площади упрощенной фигуры производится по известным формулам. Точность измерений возможно повысить при увеличении количества простых фигур с последующим суммированием их площадей.

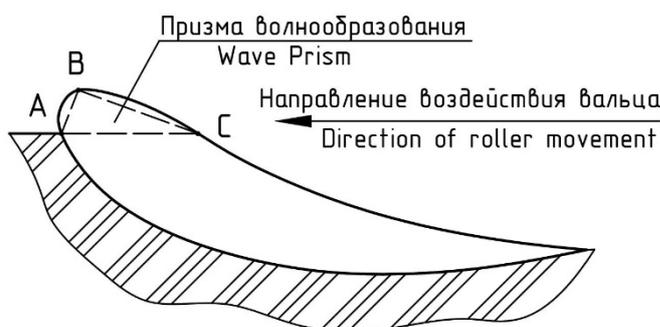


Рисунок 5 – Аппроксимация геометрии призмы волнообразования
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Approximation of the geometry of the wave forming prism
Source: compiled by the authors.

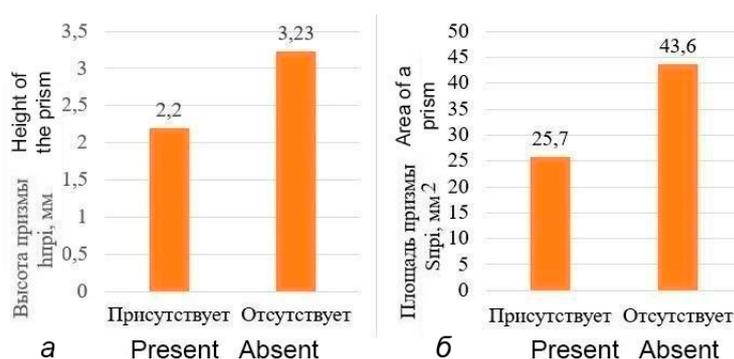


Рисунок 6 – Зависимость величины призмы волнообразования уплотняемого материала от наличия или отсутствия упругодеформируемого ленточного элемента: а – высота; б – площадь
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dependence of the size of the wave forming prism of the compacted material on the presence or absence of an elastically deformable belt element: a – height; b – area
Source: compiled by the authors.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты показали, что применение упругоэластичного ленточного элемента действительно уменьшает величину призмы перед рабочим органом. В результате проведенных экспериментов получен ряд значений интересующих параметров. Для минимизации случайных погрешностей были вычислены средние арифметические значения. Полученные данные приведены на рисунке 6.

Анализ полученных значений параметров выявил, что применение упругодеформируемого ленточного элемента уменьшает высоту сечения призмы h_{np} на 31,89% (с 3,23 до 2,2 мм); уменьшает площадь сечения призмы волнообразования S_{np} на 41,06% (с 43,6 до 25,7 мм²).

Результаты объясняются тем, что упругодеформируемый ленточный элемент препятствует перемещению частиц уплотняемого материала относительно друг друга, уменьшает продольные, поперечные и вертикальные деформации. Повышается распределение усилий со стороны вальца многократного воздействия, снижается объем выделенного материала по периметру пятна контакта вальца многократного воздействия и уплотняемого материала. Снижается перемещение материала, что согласуется с существующими исследованиями ленточного элемента при классической укатке.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из анализа результатов экспериментов, можно сделать следующие выводы:

1. Применение упругодеформируемого ленточного элемента для работы вальца многократного воздействия снижает величину призмы волнообразования за счёт уменьшения сдвиговых деформаций и более равномерного распределения касательных и нормальных напряжений в уплотняемом материале. Тем самым повышается эффективность процесса уплотнения, что подтверждает выдвинутую в статье гипотезу.

2. Применение упругодеформируемого ленточного элемента в комбинированном уплотняющем оборудовании для асфальтобетонных смесей может оказать положительное влияние на качество покрытия за счёт снижения объемов волнообразования перед рабочими органами.

3. Полученные данные касательно снижения объемов перемещения материала перед рабочим органом схожи и согласуются с

результатами подобных экспериментов [20], изучавших укатку материала посредством упругодеформируемого ленточного элемента. Это косвенно подтверждает правильность выдвинутой гипотезы и полученных результатов.

4. Ввиду того что уплотнение материалов при помощи вальцов – это сложный, комплексный и разносторонний вопрос, затрагивающий значительный объем научных знаний, рассмотреть их в одном эксперименте невозможно. Поэтому рекомендуются дальнейшие эксперименты на основе данной и иных статей, описывающих работу комбинированного уплотняющего оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Liu N., Liu L., Li M., Sun L. A comprehensive review of warm-mix asphalt mixtures: mix design, construction temperatures determination, performance and life-cycle assessment. *Road Materials and Pavement Design*. 2023; 25(11): 1-46. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2268194>.
2. Wang Y., Li J., Zhang X., Yao Y., Peng Y. Recent Development in Intelligent Compaction for Asphalt Pavement Construction: Leveraging Smart Sensors and Machine Learning. *Sensors*. 2024; 24(9): 2777. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24092777>.
3. Androjic, I., Dimter, S. Influence of Compaction Temperature on the Properties of Marshall Specimens. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2015; 10(4): 309-315. DOI: <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.39>.
4. Bopche L.M. Review On Evolution and Development of Electric Road Roller. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*. 2024; 08(04): 1-5. DOI: [10.55041/IJSREM30373](https://doi.org/10.55041/IJSREM30373).
5. Dan, H., Li, S., Chen, J., & Li, W. Dynamic response and compaction evaluation of asphalt pavement in different infrastructure types through an energy-based approach. *Construction and Building Materials*. 2025; 479: 141501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141501>
6. Bashash, A., Ahari, R. S., & Shahverdizadeh, G. H. Mechanical properties of metakaolin and granulated blast-furnace slag-based roller-compacted geopolymer concrete containing 100 % reclaimed asphalt pavement: Optimization and prediction via response surface methodology. *Construction and Building Materials*. 2025; 473: 140956. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140956>
7. Павлов С.А. Упруго-деформируемый ленточный элемент: теория и применение в строительных конструкциях // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2023. № 4. С. 45–56.
8. Павлов С.А. Моделирование работы упруго-деформируемого ленточного элемента в несущих системах // *Современные проблемы строительства и транспорта*. 2022. С. 112–118.
9. Hafezzadeh, R., Autelitano, F., & Giuliani, F. Performance-related methods for the characteriza-

tion of cold mix patching materials used in asphalt pavements maintenance. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 19: e02600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02600>

10. Li, X., Hu, X., Pan, P., Fuentes, L., & Walubita, L. F. Establishment of some parametric criteria for standardizing the stirring and blending conditions of using RPAF as an asphalt-binder modifier. *Construction and Building Materials*. 2021; 272: 121944. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121944>

11. Казаков О.Ю., Кустарев Г.В. Экспериментальный стенд и методика для исследования рабочего органа катка // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 4. С. 408–415.

12. Haghshenas H.F., Jahangiri B., Liu Z., Mensching D.J., Shen S., Yu S. Development of field compaction curves for asphalt mixtures based on laboratory workability tests and machine learning modeling. *Construction and Building Materials*. 2025; 479: 141520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141520>

13. Usanga I.N., Inyang E.O., Ikeagwuani C.C. Investigation of deformation characteristics of asphalt mixtures containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binders using laboratory simulations. *Hybrid Advances*. 2025; 10: 100426. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100426>

14. Chu F., Li Q., Sun C., Luo Y., Li J., Feng J., Zhang H. Investigation on the pavement performance and application of cold mix emulsified asphalt mixture in the surface layer. *Journal of Cleaner Production*. 2025; 507: 145542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145542>

15. Hu X., Dong Q., Shi B., Chen X., Yao K., Yuan X. Moisture migration characterization of bitumen emulsion-based cold-mix asphalt mixture over curing based on capacitive measurement. *Measurement*. 2025; 253(D): 117791. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117791>

16. Li F., Wang L., Zhang X., Li J., Gao Y., Su N. Evaluating thermal activated coal gangue as alternative filler in asphalt binder using rheological experiments and molecular dynamic simulation. *Construction and Building Materials*. 2024; 443: 137782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137782>

17. Akinmade D., Anupam K., Kasbergen C., Erkens S., Samson D., Marco P. Performance of natural asphalt as a paving material: A laboratory and field evaluation. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21: e03823. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03823>

18. Zartoshti Ilbeygi A.A., Roshni R., Khabiri M.M., Rezaei N. Experimental evaluation of industrial waste powders as fillers in hot mix asphalt by response surface method. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*. 2025; 178(2): 73-85. DOI: <https://doi.org/10.1680/jwarm.24.00018>

19. Sarı F.A., Öztürk İ.Ş., Gönen T., Emiroğlu M. Evaluation of waste metallic powder as fine aggregate replacement in Roller compacted concrete: Impact on

physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2025; 468: 140386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140386>

20. Zhao M., Liu Y., Xu X., Pei Y., Zhang C., Wu C. Advancements in asphalt pavement recycling: Integrating falling weight impact signals for enhanced rehabilitation efficiency. *Case Studies in Construction Materials*. 2025; 22: e04312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04312>

REFERENCES

1. Liu N., Liu L., Li M., Sun L. A comprehensive review of warm-mix asphalt mixtures: mix design, construction temperatures determination, performance and life-cycle assessment. *Road Materials and Pavement Design*. 2023; 25(11): 1-46. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2268194>

2. Wang Y., Li J., Zhang X., Yao Y., Peng Y. Recent Development in Intelligent Compaction for Asphalt Pavement Construction: Leveraging Smart Sensors and Machine Learning. *Sensors*. 2024; 24(9): 2777. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24092777>

3. Androjić, I., Dimter, S. Influence of Compaction Temperature on the Properties of Marshall Specimens. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2015; 10(4): 309-315. DOI: <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.39>

4. Bopche L.M. Review On Evolution and Development of Electric Road Roller. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*. 2024; 08(04): 1-5. DOI:10.55041/IJSREM30373

5. Dan H., Li S., Chen J., & Li W. Dynamic response and compaction evaluation of asphalt pavement in different infrastructure types through an energy-based approach. *Construction and Building Materials*. 2025; 479: 141501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141501>

6. Bashash A., Ahari R.S., & Shahverdizadeh G.H. Mechanical properties of metakaolin and granulated blast-furnace slag-based roller-compacted geopolymer concrete containing 100 % reclaimed asphalt pavement: Optimization and prediction via response surface methodology. *Construction and Building Materials*. 2025; 473: 140956. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140956>

7. Pavlov S.A. Elastic-deformable tape element: theory and application in building structures. *Structural Mechanics and Analysis of Construction*. 2023; 4: 45–56. (in Russ.)

8. Pavlov, S.A. Modeling of elastic-deformable tape element behavior in load-bearing systems. *Sovremennyye problemy stroitelstva i transporta*. 2022: 112–118. (in Russ.)

9. Hafezzadeh, R., Autelitano, F., & Giuliani, F. Performance-related methods for the characterization of cold mix patching materials used in asphalt pavements maintenance. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 19: e02600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02600>

10. Li, X., Hu, X., Pan, P., Fuentes, L., & Walubita, L. F. Establishment of some parametric criteria for standardizing the stirring and blending conditions of

using RPAF as an asphalt-binder modifier. *Construction and Building Materials*. 2021; 272: 121944. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121944>

11. Kazakov, O.Yu., Kustarev, G.V. Experimental stand and methodology for studying the roller working body. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* («Scientific and Technical Journal of Bryansk State University»). 2019; 4: 408–415. (in Russ.)

12. Haghshenas H.F., Jahangiri B., Liu Z., Mensching D.J., Shen S., Yu S. Development of field compaction curves for asphalt mixtures based on laboratory workability tests and machine learning modeling. *Construction and Building Materials*. 2025; 479: 141520. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141520>

13. Usanga I.N., Inyang E.O., Ikeagwuani C.C. Investigation of deformation characteristics of asphalt mixtures containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binders using laboratory simulations. *Hybrid Advances*. 2025; 10: 100426. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2025.100426>

14. Chu F., Li Q., Sun C., Luo Y., Li J., Feng J., Zhang H. Investigation on the pavement performance and application of cold mix emulsified asphalt mixture in the surface layer. *Journal of Cleaner Production*. 2025; 507: 145542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145542>

15. Hu X., Dong Q., Shi B., Chen X., Yao K., Yuan X. Moisture migration characterization of bitumen emulsion-based cold-mix asphalt mixture over curing based on capacitive measurement. *Measurement*. 2025; 253(D): 117791. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117791>

16. Li F., Wang L., Zhang X., Li J., Gao Y., Su N. Evaluating thermal activated coal gangue as alternative filler in asphalt binder using rheological experiments and molecular dynamic simulation. *Construction and Building Materials*. 2024; 443: 137782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137782>

17. Akinmade D., Anupam K., Kasbergen C., Erkens S., Samson D., Marco P. Performance of natural asphalt as a paving material: A laboratory and field evaluation. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 21: e03823. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03823>

18. Zartoshti Ilbeygi A.A., Roshni R., Khabiri M.M., Rezaei N. Experimental evaluation of industrial waste powders as fillers in hot mix asphalt by response surface method. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*. 2025; 178(2): 73–85. DOI: <https://doi.org/10.1680/jwarm.24.00018>

19. Sari F.A., Öztürk İ.Ş., Gönen T., Emiroğlu M. Evaluation of waste metallic powder as fine aggregate replacement in Roller compacted concrete: Impact on physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2025; 468: 140386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140386>

20. Zhao M., Liu Y., Xu X., Pei Y., Zhang C., Wu C. Advancements in asphalt pavement recycling: Integrating falling weight impact signals for enhanced

rehabilitation efficiency. *Case Studies in Construction Materials*. 2025; 22: e04312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04312>

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Казakov О.Ю. Патентование разработанной конструкции уплотняющего оборудования; разработка и конструирование лабораторного стенда; проведение экспериментального исследования, анализ, упорядочивание и представление результатов исследования, формирование выводов; написание, корректировка и перевод научной статьи.

Савельев А.Г. Помощь в планировании и качественном анализе полученных результатов экспериментального исследования; руководство, указания и рекомендации по структуре и оформлению статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

O.Yu. Kazakov *Compaction equipment design patenting; development and construction of the laboratory stand; conducting experimental study, analyzing, organizing and presenting research results, drawing up conclusions; writing, correcting and translating the scientific article.*

A.G. Savelyev *Assistance in planning and qualitative analysis of the obtained results of the experimental study; guidance, instructions and recommendations on the article structure and design.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Казakov Олег Юрьевич – соискатель, инженер-конструктор 1-й категории Конструкторского бюро точного машиностроения им. А.Э. Нудельмана (117342, г. Москва, ул. Введенского, 8).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-6072>,

SPIN-код: 6271-4855,

e-mail: 4informatika@mail.ru.

Савельев Андрей Геннадьевич – д-р техн. наук, проф. Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский пр., 64).

SPIN-код: 7256-5030,

e-mail: prof.saveliev@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg Y. Kazakov – applicant, design engineer (1-st category), A.E. Nudelman Precision Engineering Design Bureau (8, Vvedenskogo Street, Moscow, 117342).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-6072>,

SPIN-код: 6271-4855,

e-mail: 4informatika@mail.ru

Andrey G. Savelyev – Dr. of Sci. (Eng.), professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (64, Leningradskiy Avenue, Moscow, 125319).

SPIN-код: 7256-5030,

e-mail: prof.saveliev@yandex.ru