

УДК (UDC) 625.084

ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА
КОМБИНИРОВАННОГО УПЛОТНЯЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙJUSTIFICATION OF THE DIRECTION OF ROTATION OF THE WORKING BODY OF
THE COMBINED SEALING EQUIPMENT FOR ASPHALT CONCRETE MIXTURESКазаков О.Ю.¹, Савельев А.Г.²
Kazakov O.Yu.¹, Saveliev A.G.²

- ¹ – АО Конструкторское бюро точного машиностроения им. А.Э. Нудельмана (Москва, Россия)
² – Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (Москва, Россия)
¹ – JSC Precision Engineering Design Bureau named after A.E. Nudelman (Moscow, Russian Federation)
² – Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI) (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. В статье рассматривается следующий аспект работы разрабатываемого комбинированного уплотняющего оборудования для асфальтобетонных смесей: исследование и обоснование оптимального направления вращения рабочих органов с точки зрения качества готового покрытия. В качестве рассматриваемых рабочих органов предлагается использовать гладкие вальцы многократного воздействия, вращающиеся вокруг собственных осей с эксцентриситетом. Представленные данные и схемы дают наглядное представление о наиболее важных процессах и явлениях, влияющих на выброс материала перед рабочим органом и, как следствие, величину призмы волнообразования. Данный параметр выбран как показатель обеспечения качества готового покрытия. Разработан и сконструирован лабораторный стенд, позволивший провести ряд экспериментов по сформулированным методикам. Конструкция стенда, за счёт гибкости и широкого списка регулируемых параметров, позволяет провести глубокий анализ и наблюдение за работой уплотняющего органа в виде вальца со смещенной осью вращения. Проведено два эксперимента по пять повторений, результаты которых зафиксированы и систематизированы. Анализ полученных результатов подтверждает гипотезу о том, что уплотнение вращающимся рабочим органом следует производить от неуплотнённого материала к уплотнённому. Это позволит уменьшить количество дефектов покрытия (таких как трещины), повысит ровность и гладкость покрытия, а также снизит расслоение уплотняемого материала.

Ключевые слова: уплотнение асфальтобетона, комбинированное уплотняющее оборудование, лабораторный стенд.

Дата получения статьи: 21.05.2025
Дата принятия к публикации: 30.08.2025
Дата публикации: 25.09.2025

Abstract. The article deals with the following aspect of the work of the developed combined compacting equipment for asphalt concrete mixtures: research and substantiation of the optimal direction of rotation of working bodies from the point of view of the quality of the finished pavement. It is proposed to use smooth rollers of multiple impact rotating around their own axes with eccentricity as working bodies under consideration. The presented data and schemes give a visual representation of the most important processes and phenomena affecting the ejection of material in front of the working body and, as a consequence, the size of the wave formation prism. This parameter is chosen as an indicator of quality assurance of the finished coating. A laboratory bench was designed and constructed, which allowed to conduct a number of experiments on the formulated methods. The design of the stand, due to its flexibility and a wide list of adjustable parameters, allows for in-depth analysis and observation of the work of the compacting organ in the form of a roller with an offset axis of rotation. Two experiments with five repetitions each were conducted, and the results were recorded and systematized. The analysis of the obtained results confirms the hypothesis that compaction by rotating working body should be performed from the unconsolidated material to the compacted one. This will reduce the number of coating defects (such as cracks), increase the evenness and smoothness of the coating, and reduce the delamination of the compacted material.

Keywords: asphalt concrete compaction, combined compaction equipment, laboratory stand.

Date of manuscript reception: 21.05.2025
Date of acceptance for publication: 30.08.2025
Date of publication: 25.09.2025

Сведения об авторах:

Казак Олг Юрьевич – инженер-конструктор 1 категории, АО Конструкторское бюро точного машиностроения им. А.Э. Нудельмана, *e-mail: 4informatika@mail.ru*.

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

Савельев Андрей Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», *e-mail: prof.saveliev@yandex.ru*.

Authors' information:

Oleg Yu. Kazakov – design engineer 1 category, JSC Precision Engineering Design Bureau named after A.E. Nudelman, *e-mail: 4informatika@mail.ru*.

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

Andrey G. Saveliev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), *e-mail: prof.saveliev@yandex.ru*.

1. Введение

Создание высококачественных современных асфальтобетонных дорог является важным и приоритетным направлением развития сферы дорожного строительства Российской Федерации в связи с активным и повсеместным использованием. Значительный объем дорожного полотна в Российской Федерации обладает асфальтобетонным покрытием.

Одним из ключевых факторов, влияющих на прочностные характеристики готового покрытия (ровность, водостойкость, долговечность и т.п.) является процесс уплотнения асфальтобетонной смеси. Некачественное уплотнение (например появление разрушений структуры смеси) часто приводит к преждевременному разрушению покрытия, требующему финансовых затрат на ремонтные работы.

Уплотнение традиционно производится посредством дорожных катков различных разновидностей (гладковальцовые, вибрационные и т.п.). Однако поиск способов повышения качества и эффективности уплотнения является актуальным направлением для исследований. Активно идет развитие комбинированных рабочих органов и методов воздействия на смесь [1]. Особый интерес вызывает и исследование упруго-деформированного ленточного элемента (далее ленточный элемент) как способ распределения усилий со стороны рабочего органа [2]. Ряд работ также показывает потенциал поэтапного воздействия рабочих органов с финишным воздействием для выравнивания покрытия [3].

Как одно из возможных перспективных средств уплотнения асфальтобетонных смесей является разработанное автором комби-

нированное уплотняющее оборудование [4], где рабочими органами выступают ряд вальцов с эксцентриситетом, вращающихся вокруг собственных осей и оказывающих многократное воздействие на асфальтобетонную смесь. При этом, работа вальцов происходит между предварительным и финишным уплотнением опорными вальцами оборудования.

Ряд исследований уже заложил основы и понимание возможностей оборудования [5], однако многие аспекты работы требуют дополнительного глубокого исследования. Одним из важнейших направлений научной деятельности является определение оптимального направления вращения вальцов с точки зрения волнообразования материала как показатель качества покрытия. Основываясь на физике процесса, выдвигается гипотеза, что направление вращения от уплотненного материала к уплотненному и наоборот будет по-разному влиять на величину призмы волнообразования. На данный момент не существует исследований по данной теме для описываемого оборудования.

Актуальность исследований обусловлена рядом факторов:

- важностью качества уплотнения для повышения долговечности покрытия;
- перспективностью использования описываемого оборудования;
- пробелами в области знаний касательно оптимального направления вращения вальцов многократного воздействия;
- необходимостью проведения модельных экспериментальных исследований по теме для подтверждения теоретических предположений.

Целью исследования является определение оптимального направления вращения

валяца многократного воздействия для повышения качества готового покрытия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- описать взаимодействие вальца с материалом и ленточным элементом, теоретически обосновав влияние направления вращения на качество покрытия;
- сформулировать методику проведения эксперимента; разработать и сконструировать лабораторный стенд для проведения экспериментов;
- собрать, систематизировать и проанализировать полученные данные;
- сделать выводы, сравнив экспериментальные данные с гипотезой.

2. Комбинированное уплотняющее оборудование

Разработанное уплотняющее оборудование является комбинированным за счёт сочетания многократного прокатывания и статического воздействия рабочих органов на асфальтобетонную смесь посредством ленточного элемента. Статическим воздействием является перекачивание вальцов по уплотняемому материалу, а циклическое прокатывание осуществляется за счёт вращения вальцов многократного воздействия вокруг собственных смещённых осей. При этом, воздействие на асфальтобетонную смесь происходит поэтапно в рамках одного про-

хода по участку покрытия вслед за асфальтоукладчиком.

Принципиальная схема комбинированного уплотняющего оборудования представлена на рис. 1.

На рисунке показаны следующие элементы: 1 – толкающий брус машины-носителя; 2 – крепёж-балансир; 3 – ведомый опорный валец; 4 – вспомогательный валец для поддержания ленты; 5 – рабочий уплотняющих орган в виде вальца многократного воздействия; 6 – рама; 7 – ленточный элемент; 8 – ведущий опорный валец; 9 – механизм натяжения ленточного элемента.

Ведомый валец соединён с устройством натяжения ленточного элемента. Вальцы многократного воздействия и ведущий валец имеют электропривод, расположение которых по отношению к уплотняемому материалу задаётся за счёт: угла наклона несущей рамы β , размеров $K_{1...2}$ и $T_{1...4}$.

Ведущим вальцом механизма перемещения ленточного элемента является тот, который первым входит в контакт с уплотняемым материалом. Это обосновано исследованиями уплотняющих рабочих органов [6]. Доказано, что ведущий валец позволяет добиться лучшего качества асфальтобетонного покрытия, чем ведомый, что обусловлено: снижением величины сдвиговых деформаций; уменьшением волнообразования перед вальцом.

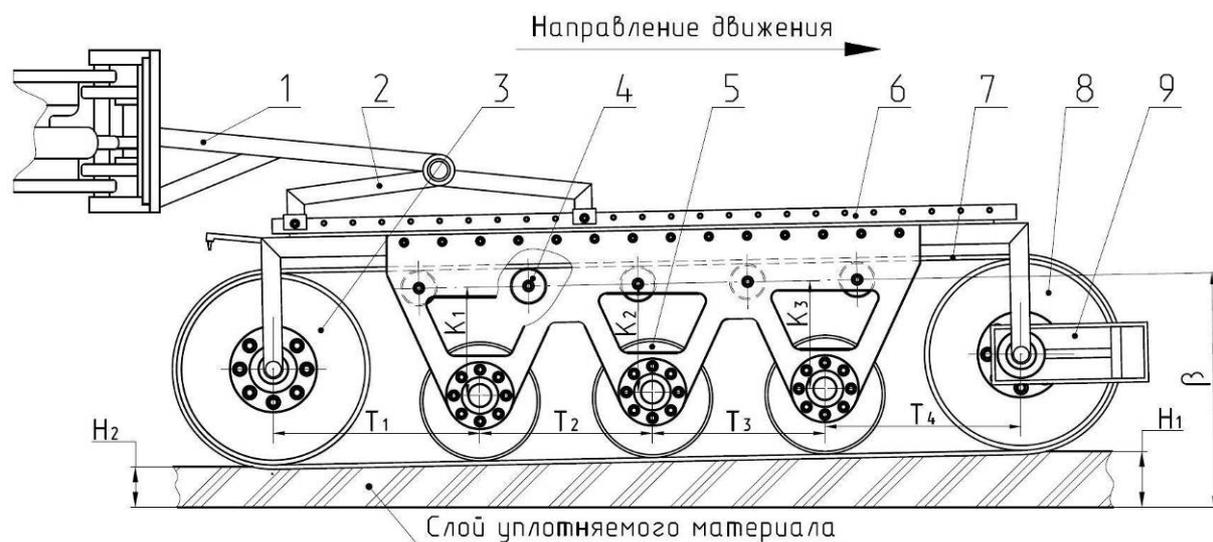


Рис. 1. Комбинированное уплотняющее оборудование



Рис. 2. Общий вид конструкции и рабочих органов комбинированного уплотняющего оборудования

Общий вид на рабочие органы также представлен на рис. 2.

Оборудование предназначено для поэтапного уплотнения асфальтобетона. Первым в контакт с материалом входит ведущий валец (позиция 8), осуществляя предварительное уплотнение с небольшой нагрузкой. Это обусловлено непрочными связями внутри смеси, нарушение которых может повлечь ряд дефектов (продольные и поперечные трещины, выбоины и т.д.).

Далее, ряд рабочих органов в виде валцов со смещенными осями вращения (позиция 5) осуществляют многократные прокатывающие воздействия, совершая основную работу по повышению плотности материала. При этом, каждый отдельно взятый валец установлен по отношению к поверхности асфальтобетонного покрытия на определенном расстоянии, задаваемом величиной $K_{1...3}$. Это позволяет добиться желаемой плотности материала путем регулирования высоты расположения вальца и, соответственно, усилия воздействия на смесь.

Вальцы осуществляют работу посредством ленточного элемента (позиция 7), поддерживаемого вспомогательными вальцами (позиция 4). Ленточный элемент обернут вокруг рабочих органов и опорных валцов, а его натяжение регулируется механизмом натяжения (позиция 9). После основного воздействия ряда вращающихся валцов осуществляется финишное уплотнение при помо-

щи опорного вальца (позиция 3), сглаживая возможные неровности [7].

Одним из основных преимуществ описываемого подхода к уплотнению является возможность повышения коэффициента уплотнения асфальтобетонной смеси за один проход, перемещая комбинированное оборудование вслед за асфальтоукладчиком. Смесь не успевает остыть и повышение коэффициента уплотнения осуществляется в оптимальных температурных условиях [8]. При классическом же подходе выложенная асфальтоукладчиком смесь подвергается многократному циклическому укатыванию катком, что занимает какое-то время, в течение которого асфальтобетон теряет структурно-механические свойства.

Роль используемого в конструкции комбинированного оборудования ленточного элемента в уплотнении асфальтобетонной смеси подробно рассмотрена [9]. Преимущества и особенности возвратно-поступательного циклического уплотнения также рассматривались в некоторых работах [10].

Однако, ввиду новизны предлагаемого подхода к уплотнению существует необходимость в экспериментальных исследованиях, подтверждающих работоспособность комбинированного оборудования, учитывая особенности протекающих процессов.

3. Вращение вальца многократного воздействия с эксцентриситетом

Качество готового покрытия является комплексным и многогранным понятием, поэтому для данного исследования в качестве определяющего параметра выбрана величина призмы волнообразования, которая образуется перед рабочим органом в процессе уплотнения [11].

Для определения оптимального направления вращения вальца многократного воздействия вокруг смещенной оси необходимо определить усилия и их направления по отношению к ленточному элементу и асфальтобетонной смеси. Привод вальца может осуществлять его вращение в двух направлениях:

- 1) валец подминает под себя уплотняемый материал;
- 2) валец выталкивает материал со стороны уплотненной части.

На рис. 3 показан 1-й вариант.

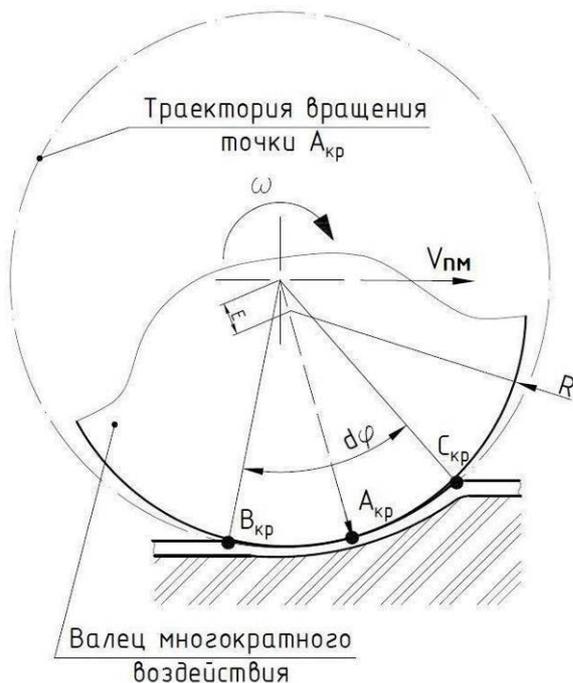


Рис. 3. Схема прокатывания крайней точки по длине пятна контакта

Рассмотрим валец многократного воздействия. Он обладает крайней точкой вращения вокруг собственной оси, характеризующей максимальное давление на уплотняемый

материал, а значит и на ленточный элемент. Что обусловлено эксцентриситетом оси вращения.

Соответственно, крайняя точка прокатывается от точки к по направлению вращения вальца многократного воздействия по собственной траектории вращения, характеризующей максимальную степень деформации ленточного элемента в период контакта с ним.

Воспринимая вращение точку вальца многократного воздействия как равномерное движение материальной точки по окружности, возможно составить следующую схему (рис. 4).

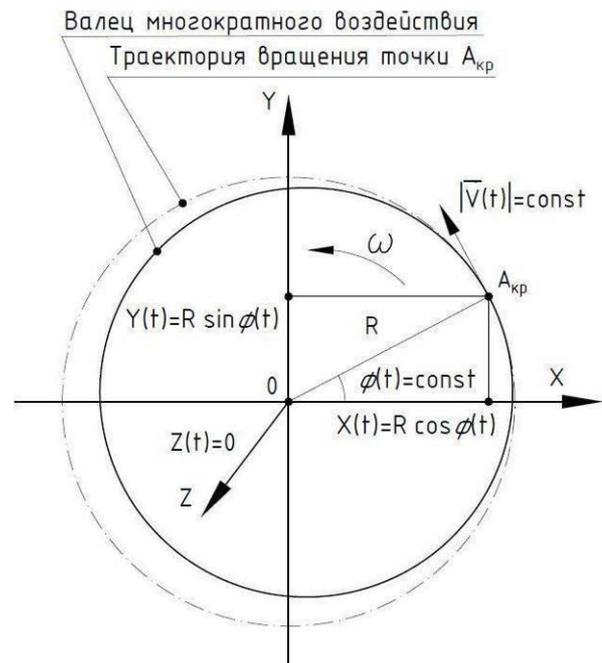


Рис. 4. Вращения точки вальца многократного воздействия

При подобном рассмотрении происходящих процессов, становится возможным записать уравнения движения в прямоугольной инерциальной системе координат XYZ. При этом, точка вращается вокруг оси, её движение происходит в плоскости XY, тогда как её координата в плоскости Z всегда равно 0.

Угол между радиус вектором точки, проведённым из начала координат (точки 0) и осью X зависит от времени t. Движение точки является равномерным, значит и описан-

ный угол изменяется с постоянной угловой скоростью.

Модуль вектора скорости и ускорения точки постоянны. Следовательно, ускорение точки постоянно по модулю, а выведенные уравнения скорости и ускорение равномерно движущейся материальной точки показывают зависимость от постоянной угловой скорости.

Соответственно, при направлении усилий со стороны крайней точки вальца многократного воздействия от неуплотненного материала к уплотненному возможно уменьшение призмы волнообразования. Что достигается за счет приложения максимальных усилий со стороны вальца (а именно, со стороны точки), направленных под рабочим органом. Это обусловлено тем, что асфальтобетонная смесь типа Гх является пористой структурой из щебня, песка и порошка, связанных битумом как вяжущим. Соответственно, частицы смеси должны многократно продвигаться под валец и в дальнейшем подвергаться дополнительному уплотнению. Что также должно способствовать повышению прочности готового покрытия.

4. Лабораторный стенд для модельных экспериментов изучения вальца многократного воздействия

Условия эксперимента соответствуют лабораторным с использованием стенда. Исследования являются воспроизводимыми, а наличие контрольных параметров, рассмотренных далее, позволяет получить более предсказуемые результаты.

Перед созданием стенда необходимо определить критерии подобия модели. Расчет параметров модели и индикаторы подобия исходя из ожидаемых параметров оригинала возможно благодаря научным трудам в области [12].

В данном исследовании рассматривается уплотнение тонких слоев материала, исходя из того, что:

– моделируется уплотнение дорожного покрытия, толщина которого часто варьируется от 50 до 150 мм;

– исследование предполагает определение влияния параметров и режимов работы уплотняющего органа путём выявления призмы волнообразования перед рабочим органом;

– лабораторные эксперименты подразумевают масштабирование как слоя материала, так и рабочего органа;

– используемый в ходе экспериментов материал моделирует холодную песчаную смесь типа Гх, характерную для верхних слоев покрытия;

– в исследовании не рассматриваются процессы уплотнения глубоких слоев покрытия и связанные с этим процессы.

Линейный масштаб модели примем равным 0,7. Укажем основные параметры оригинала и модели:

вес вальца оригинала 167 Н, модели - 82 Н; рабочая поступательная скорость движения модели и оригинала 0,0167 м/сек; мощность двигателя оригинала 571 Вт, модели - 280 Вт; угловая скорость вращения вальца модели и оригинала 15,2 1/с; ширина вальца оригинала 1,5 м, модели - 0,3 м; радиус вальца оригинала 0,3 м, модели - 0,21 м; толщина ленточного элемента оригинала 17 мм, модели - 5 мм; вязкость уплотняемого материала оригинала 10^3 Па·с, модели - 17^3 Па·с.

В качестве уплотняемого материала для моделирования холодной песчаной асфальтобетонной смеси типа Гх при проведении экспериментальных исследований применялась смесь песка и масел. Полученный материал обладал следующими параметрами: сцепление материала от 0,7 до 0,8 кг/см²; угол внутреннего трения от 28 до 32°; угол внешнего трения от 18 до 21°; объёмный вес 2 г/см³.

Параметры уплотняемого материала для проведения исследований позволяют моделировать реальную холодную песчаную асфальтобетонную смесь типа Гх, используемую при дорожном строительстве. Соответственно, полученные в дальнейшем результаты применимы для полевых условий.

Разработанный стенд освещался в ряде публикаций и представляет из себя неподвижную конструкцию с подвижной частью, на которой закреплен рабочий орган [13, 14,

15]. На рис. 5 показаны состав и основные элементы стенда.

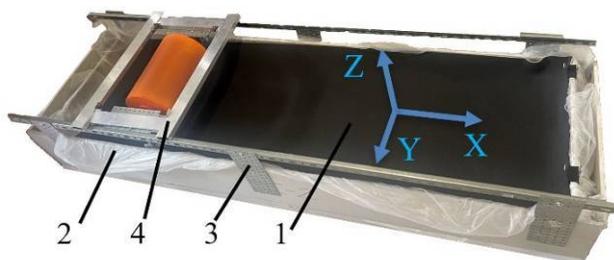


Рис. 5. Основные элементы лабораторного стенда

На рисунке показаны следующие элементы: 1 – регулируемая по высоте емкость для размещения уплотняемого материала; 2 – корпус; 3 – подвижная конструкция; 4 – рабочий орган в виде вальца многократного воздействия со смещенной осью вращения.

Конструкция стенда позволяет регулировать высоту расположения основания (позиция 1) для уплотняемого материала по отношению к основанию корпуса. В дополнение к этому, сам рабочий орган в виде вальца может быть отрегулирован в вертикальной оси Z за счёт переустановки болтовых соединений опор подвижной конструкции. Перемещение по оси X осуществляется за счёт электролебедки, перемещающей подвижную конструкцию вместе с рабочим органом вдоль уплотняемого материала.

На рис. 6 представлена подвижная часть лабораторного стенда со смонтированным вальцом многократного воздействия (рабочим уплотняющим органом). Показан метод закрепления подвижной конструкции при помощи особо прочного шнура с латунированным стальным сердечником и полимерным покрытием. Скольжение конструкции вдоль основания стенда осуществляется посредством подшипников, помещенных внутрь стальных направляющих и металлических опорных труб, расположенных сверху.

Валец, показанный на рис. 7 имеет эксцентриситет равный 10 мм. С одной стороны его ось вращения закреплена к муфте электромотора, а с другой в блок подшипника. Рабочая поверхность вальца в виде трубы может свободно вращаться относительно ос-

тальной части конструкции рабочего органа. Что обеспечивает возможность прокатывания вальца по внутренней части ленточного элемента, не приводя к его смещению и повреждению.

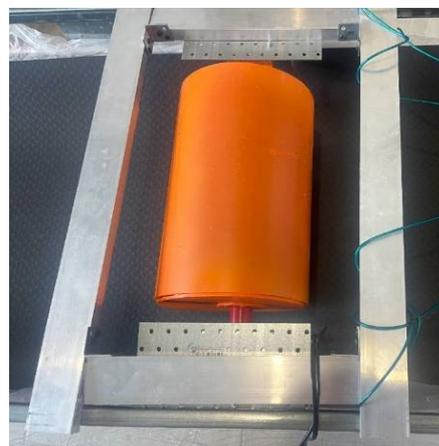


Рис. 6. Общий вид подвижной части с вальцом многократного воздействия с закрепленным шнуром электролебедки и подключенным питанием электромотора



Рис. 7. Модель вальца многократного воздействия шириной 300 мм и диаметром 210 мм

Валец осуществляет циклические многократные нагрузки при одновременном движении вдоль уплотняемого участка материала. Данное перемещение с постоянной скоростью осуществляется за счёт перемещения подвижной конструкции со смонтированным рабочим органом при помощи электролебедки.

Таким образом, симулируется поступательное движение комбинированного уплотняющего оборудования вслед за асфальтоукладчиком. Ограниченная регулировка расположения вальца по оси Y также присутствует

и осуществляется за счёт монтажа болтовых соединений в иные конструктивные отверстия.

Лабораторный стенд позволяет проводить широкий ряд исследований рабочего органа комбинированного уплотняющего оборудование. В том числе, возможно осуществление эксперимента по определению оптимального направления вращения вальца.

Подготовка эксперимента проводится при каждом повторении эксперимента и включает в себя следующее: подготовка материала к уплотнению, осуществление предварительного уплотнения, выравнивания поверхности и толщины слоя; расположение ленточного элемента на подготовленный слой материала для повышения распределения усилий со стороны вальца; выставление рабочего органа в изначальное положение (подвижная конструкция сложена до конечной точки), обеспечение расположения смещённой оси с эксцентриситетом в заданных начальных координатах.

Перемещение подвижной конструкции стенда с закрепленным рабочим органом в виде вальца многократного воздействия со смещенной осью вращения осуществлялся при помощи электротяги.

На рис. 8 представлена иллюстрация схемы эксперимента (в зависимости от эксперимента направление вращения вальца может меняться).

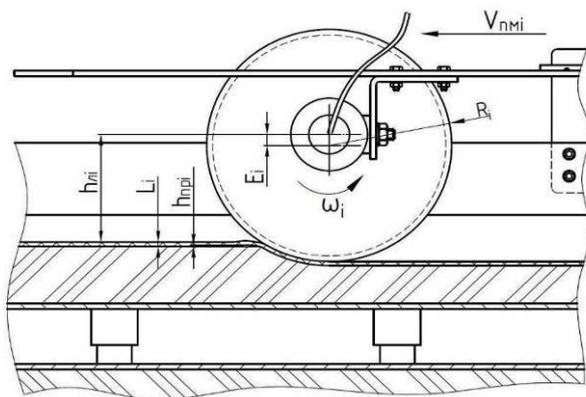


Рис. 8. Схема эксперимента по определению оптимального направления вращения вальца многократного воздействия

На рисунке указаны следующие параметры: R_i – радиус вальца; E_i – величина эксцентриситета; ω_i – угловая скорость вращения

вальца; $V_{пмi}$ – поступательная скорость подвижной конструкции стенда; $h_{пi}$ – расстояние от оси вращения вальца до внутренней поверхности ленточного элемента (данное расстояние обусловлено возможностью контроля значения параметра в процессе исследований без демонтажа ленты); L_i – толщина ленточного элемента; $S_{прi}$ – высота призмы.

Ряд параметров стенда был постоянен в процессе экспериментов, а именно: радиус вальца $R = 105$ мм; постоянная скорость движения подвижной конструкции составляет 15 мм/с; толщина полотна ленточного элемента $L = 5$ мм; частота вращения вальца $N = 1,75$ об/сек; эксцентриситет вальца $E = 10$ мм; расстояние от внутренней части ленточного элемента до оси вращения вальца $h_i = 100$ мм.

Эксперименты проводились в двух независимых сериях по 5 повторений в каждом для повышения достоверности результатов и снижения случайной погрешности. Первая серия экспериментов проводилась при вращении вальца от неуплотненного материала к уплотненному (против часовой стрелки, если смотреть на рис. 9). Вторая серия экспериментов проводилась от уплотненного к неуплотненному (по часовой стрелке).

Измерению подвергалась образовавшаяся в результате воздействия рабочего органа призма волнообразования: высота по отношению к неуплотненному слою материала; площадь сечения, вычисление которой производилось путем аппроксимации формы призмы на элементарные фигуры (рис. 9).

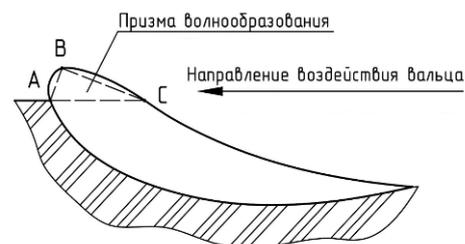


Рис. 9. Пример аппроксимации геометрии призмы волнообразования на простую фигуру (треугольник ABC)

Ширина заполненного уплотняемый материалом канала равна 60 см. Толщина слоя смеси составляет 50 мм, поверх которого укладывается и фиксируется зажимами (от смещений при работе вальца) ленточный элемент (рис. 10) толщиной 5 мм.



Рис. 10. Размещение ленточного элемента поверх материала

В качестве ленточного элемента применялась силиконовая резина со следующими параметрами: твёрдость 30 ± 3 Шор А; плотность $0,8 \text{ г/см}^3$; условная прочность от 5 до 7 МПа; термостойкость от 200 до 250°; относительное удлинение от 300 до 400%; толщина 5 мм.

5. Экспериментальные данные

На рис. 11 показан пример призмы волнообразования, которая образовалась после

воздействия рабочего органа. Для осуществления измерений величины призмы требуется удаление ленточного элемента и перемещение рабочего органа в изначальное положение.



Рис. 11. Призма волнообразования и измерения посредством штангенциркуля

Участок 1 показывает уплотненное покрытие, подвернувшейся воздействию вальца. На участке 2 располагается сама призма волнообразования, которая образуется перед рабочим органом за счёт выдавливания и волнообразования частиц смеси. Значения плотности и осадки материала на участке 3 соответствуют изначальным, так как рабочий орган не оказывал воздействия на эту часть покрытия.

Результаты повторений для каждой серии представлены в табл. 1.

Низкие значения коэффициента вариации показывают приемлемую воспроизводимость результатов в рамках одной серии повторений эксперимента.

Таблица 1

Экспериментальные данные

Направление вращения	Параметр	Номер повторения					Среднее значение	Коэффициент вариации, %
		1	2	3	4	5		
От неуплотненного материала к уплотненному	$h_{при}$, мм	2,1	2,5	2	2,6	2,3	2,3	10,87

	$S_{при}$, мм ²	23,5	28,7	25,1	26,8	26,9	26,2	7,67
От уплотненного материала к неуплотненному	$h_{при}$, мм	3,5	4,1	3,6	3,9	3,9	3,8	6,58
	$S_{при}$, мм ²	33,6	42,8	37,2	40,5	36,4	38,1	9,11

Полученные значения показывают незначительную погрешность в зависимости от номера повторения в рамках серии экспериментов. Что косвенно подтверждает надёжность и достоверность лабораторного стенда.

Результаты показывают, что вращение вальца многократного воздействия от неуплотненного материала к уплотненному (против часовой стрелки) по сравнению с вращением от уплотненного материала к неуплотненному (по часовой стрелке) приводит к уменьшению величины призмы волнообразования уплотняемого материала: среднее значение уменьшилось на 39,47% (с 3,8 до 2,3 мм); среднее значение уменьшилось на 31,23% (с 38,1 до 26,2 мм²).

6. Заключение

Проведенные модельные эксперименты по определению величины призмы волнообразования в зависимости от направления вращения вальца показали следующее.

Вращение вальца многократного воздействия со смещенной осью является предпочтительным, когда воздействие крайней точки в направлении от неуплотненного материала к уплотненному. Это объясняется снижением величины призмы волнообразования и, как следствие, возможным повышением качества готового асфальтобетонного покрытия.

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы. Направление вращения вальца действительно влияет на волнообразование материала перед собой в процессе работы вальца. С физической точки зрения это объясняется направлением приложения усилия крайней части вальца к материалу. Если оно направлено под валец (от неуплотненного материала), то рабочий орган проталкивает и подминает вещество под себя. Это приводит к заглоблению частиц, а не к их выталкиванию перед вальцом.

При вращении в оптимальном направлении ожидается повышение качества уплотнения, увеличение долговечности и снижение количества и объемов дефектов асфальтобетонного покрытия.

Выбранные параметры для оценки в виде высоты и площади призмы объективно могут показать величину выброшенного перед вальцом материала. Эти величины косвенно показывают ровность покрытия, степень расслоения материала и количество дефектов. Кроме того, измерение значений высоты и площади возможно при помощи штангенциркуля, избегая использование специальных инструментов, что повышает доступность и простоту исследований процесса уплотнения.

Полученные экспериментальные данные полностью согласуются с выдвинутой в начале статьи гипотезой.

Результаты и выводы можно экстраполировать на реальные полевые условия ввиду того, что модель станда разработана с учетом критериев подобия, а уплотняемый материал соответствует реальным характеристикам холодной асфальтобетонной песчаной смеси типа Гх.

Практическая значимость результатов заключается в возможности проектирования комбинированного уплотняющего оборудования с учетом оптимального направления вращения рабочих органов в виде гладких вал-

цов многократного воздействия для повышения качества уплотнения. Научная же значимость заключается в возможности использования методики и результатов экспериментов в дальнейших исследованиях по теме.

В качестве рекомендации к дальнейшим исследованиям можно сформулировать увеличение масштабов исследования, проведение модельных экспериментов в полевых условиях с макетом комбинированного уплотняющего оборудования с использованием опыта актуальных исследований [16, 17].

Список литературы

1. Курбатов Н.Е. Определение параметров уплотняющего оборудования ударно-укатывающего действия: дис. ... канд. техн. наук. М.: МАДИ, 1990. 203 с.
2. Кустарев Г.В., Павлов С.А. Анализ процесса качения цилиндра по уплотняемой поверхности через упругий элемент // Наука и техника в дорожной отрасли. 2009. № 2. С. 36-37.
3. Дорожный каток / М.В. Дудкин, Е.М. Алексеевский, Н.Е. Курбатов, Е.Л. Дудкина, Ю.В. Разумов. – Патент на изобретение № 1717692. Заявл. 02.04.1990. Опубл. 07.03.1992, Бюл. № 9.
4. Устройство для уплотнения горячих асфальтобетонных смесей и грунтов / О.Ю. Казаков, Г.В. Кустарев. – Патент на полезную модель № 194303. Заявл. 18.07.2019, № 2019122624. Опубл. 05.12.2019, Бюл. № 34.
5. Казаков О.Ю. Усовершенствование технологий уплотнения катка в отряде для скоростной укладки асфальта // 21 century: fundamental science and technology XXII: Proceedings of the Conference. North Charleston, 3-4.02.2020, Vol. 1 Morrisville, NC, USA: LuluPress, 2020, 73-75 p.
6. Хархута Н.Я. Вопросы теории уплотнения дорожных покрытий // Уплотнение земляного полотна и конструктивных слоев дорожных одежд. Союздорнии. М., 1980. С. 64-72.
7. Казаков О.Ю., Кустарев Г.В. Выявление особенностей применения устройства для уплотнения горячих асфальтобетонных смесей и грунтов // Всероссийская научно-практическая конференция «Молодежь и

References

1. Kurbatov N.E. Determination of parameters of compacting equipment of impact-rolling action. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Moscow: MADI, 1990. 203 p. (In Russian)
2. Kustarev G.V., Pavlov S.A. Analysis of the cylinder rolling process on a compacted surface through an elastic element. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. 2009. No. 2, pp. 36-37. (In Russian)
3. Patent SU 1717692. *Dorozhnyy katok* [Road roller]. Dudkin M.V., Alekseevskiy E.M., Kurbatov N.E., Dudkina E.L., Razumov Yu.V. Declared 02.04.1990. Published 07.03.1992. (In Russian)
4. Patent RU 194303. *Ustroystvo dlya uplotneniya goryachikh asfal'tobetonnykh smesey i gruntov* [Device for compaction of hot asphalt concrete mixtures and soils]. Kazakov O.Yu., Kustarev G.V. Declared 18.07.2019. Published 05.12.2019. (In Russian)
5. Kazakov O.Yu. Improvement of roller compaction technology in a team for high-speed asphalt paving. *21 Century: Fundamental Science and Technology XXII: Proceedings of the Conference*. North Charleston, 3-4.02.2020, Vol. 1. Morrisville, NC, USA: LuluPress, 2020, pp. 73-75.
6. Kharkhuta N.Ya. Issues of the theory of road surface compaction. *Compaction of Earth Embankments and Structural Layers of Road Pavements*. Soyuzdornii. Moscow, 1980, pp. 64-72. (In Russian)
7. Kazakov, O.Yu., Kustarev, G.V. Identification of features of the use of a device for compaction of hot asphalt concrete mixtures and soils. *All-Russian Scientific and Practical*

наука: от исследовательского поиска к продуктивным решениям»: Материалы конференции. Иркутск, 2020. Т. 1. С. 20-23.

8. 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. Vol. 25. N. 11. P. 1381-1425.

9. Павлов С.А. Определение параметров уплотняющего оборудования с применением упруго-деформируемого ленточного элемента: дис. ... канд. техн. наук. М.: МАДИ, 2017. 185 с.

10. Туманян С.Б. Определение параметров и режимов работы уплотняющего оборудования с комбинированным воздействием на уплотняемую среду: дис. ... канд. техн. наук. М.: МАДИ, 1994. 166 с.

11. Беляев К.В., Серебренников В.С. Укладка и уплотнение асфальтобетонных смесей. Теория и расчет. Омск: СибАДИ, 2015. 208 с.

12. Баловнев В.И. Подобие и моделирование в системе проектирования дорожно-строительных машин. М.: МАДИ, 2014. 148 с.

13. Казаков О.Ю., Кустарев Г.В. Методика конструирования лабораторного стенда для изучения уплотняющего рабочего органа катка // Междунар. конф. молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях»: Мат. конф. Бишкек, 2020. С. 383-387.

14. Казаков О.Ю., Кустарев Г.В. Экспериментальный стенд и методика для исследования рабочего органа катка // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2019. Т. 16. № 4 (68). С. 408-415.

15. Казаков О.Ю., Кустарев Г.В. Описание опыта проектирования лабораторного стенда для исследования рабочего органа катка // Московская междунар. межвуз. научно-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы»: Материалы конференции. М., 2020. С. 278-280.

16. Shi Z., Min Z., Chen F., Huang W. Mi-

† *Conference «Youth and Science: From Research Search to Productive Solutions»: Conference Proceedings, Irkutsk, 2020, Vol. 1, pp. 20–23. (In Russian)*

† 8. 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, Vol. 25, No. 11, pp. 1381-1425.

† 9. Pavlov S.A. Determination of parameters of compaction equipment using an elastic-deformable band element. Diss. Cand. Sci. (Eng.). Moscow. 2017. 185 p. (In Russian)

† 10. Tumanyan S.B. Determination of parameters and operating modes of compaction equipment with combined impact on the compacted medium. Diss. Cand. Sci. (Eng.), spec. 05.05.04. Moscow. 1994. 166 p. (In Russian)

† 11. Belyaev K.V., Serebrennikov V.S. *Ukladka i uplotnenie asfaltobetonnykh smesei. Teoriya i raschet* [Laying and compaction of asphalt concrete mixtures. Theory and calculation]: study guide. Omsk, SibADI, 2015. 208 p. (In Russian)

† 12. Balovnev V.I. *Podobie i modelirovanie v sisteme proektirovaniya dorozhno-stroitelnykh mashin* [Similarity and modeling in the design system of road construction machines]. Moscow: MADI, 2014. 148 p. (In Russian)

† 13. Kazakov O.Yu., Kustarev G.V. Experimental stand and methodology for the working element of the roller. *Int. Conf. of Young Scientists and Students «Modern Technology and Engineering in Scientific Research»*, Bishkek, 2020, pp. 383-387. (In Russian)

† 14. Kazakov O.Yu., Kustarev G.V. Experimental stand and method for studying the roller working tool. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 2019, Vol. 16, No. 4 (68), pp. 408-415. (In Russian)

† 15. Kazakov, O.Yu., Kustarev, G.V. Description of the design experience of a laboratory stand for studying the working body of a roller. *Moscow Int. Interuniv. Scientific and Technical Conf. "Lifting-Transport, Construction, Road, Track Machines and Robotic Systems": Conf. Proc.* Moscow, 2020, pp. 278–280.

croscopic quantitative analysis of the blending characteristics of epoxy asphalt-aged asphalt and its performance evaluation // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 467. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140389.

17. 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. Vol. 22. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e04312.

‡ 16. Shi Z., Min Z., Chen F., Huang W. Microscopic quantitative analysis of the blending characteristics of epoxy asphalt-aged asphalt and its performance evaluation, *Construction and Building Materials*, 2025, Vol. 467. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140389.

‡ 17. 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, Vol. 22. doi: 10.1016/j.cscm.2025.e04312.