

АНАЛИЗ ПРИЧИН КОЛЕЕОБРАЗОВАНИЯ НА ПОКРЫТИЯХ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ЭТОГО ЯВЛЕНИЯ

А.С. Александров, Т.В. Семенова, А.Л.Калинин
ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время работы, направленные на уменьшение интенсивности колееобразований на автомобильных дорогах, являются актуальными. Мероприятия, направленные на повышение устойчивости дорожных одежд к колееобразованию включают в себя работы, нацеленные на решение материально-технических задач, совершенствование методов расчета конструкций и разработки новых технологий для обеспечения высокого качества строительства.

Материалы и методы. Анализом данных натурных и лабораторных экспериментальных исследований установлены причины формирования колеи на покрытиях нежестких дорожных одежд. Приведена методика экспериментального исследования распределения проходов шин транспортных средств по ширине проезжей части и полос движения. Установлены коэффициенты для расчета числа нагрузок в центральных и краевых частях полос наката, а также в межколеином пространстве.

Результаты. Предложены конструкции дорожных одежд со скрытоколеиными элементами, которые в целях борьбы с глубиной колеи размещаются на поверхности земляного полотна, а при борьбе с поверхностной колеей на основании дорожной одежды.

Заключение. В результате близкого расположения скрытоколеиных элементов друг от друга грунт земляного полотна между ними испытывает компрессионное сжатие, при котором девиатор напряжений имеет наименьшее значение по сравнению с другими напряженными состояниями земляного полотна, обусловленными трехосным сжатием, возникающим как от подвижной нагрузки, так и от собственного веса дорожной одежды. Это способствует существенному снижению деформаций в грунте.

Для успешного внедрения скрытоколеиных дорожных одежд необходимо разработать новую или обособленно выбрать известную методику расчета глубины колеи, которая необходима для проверки критерия колееобразования при расчете толщин скрытоколеиных элементов и толщины дорожной одежды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорога, дорожное покрытие, колея, колея поверхностная, колея глубинная, полоса наката, боковой выпор колеи.

Поступила 07.11.2019, принята к публикации 17.12.2019.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: А.С. Александров, Т.В. Семенова, А.Л.Калинин Анализ причин колееобразования на покрытиях нежестких дорожных одежд и рекомендации по уменьшению этого явления. Вестник СибАДИ. 2019;16(6): 718–745. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-718-745>



DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-718-745>

RUTTING ON THE SURFACES OF NON-RIGID ROAD PAVEMENTS: ANALYSIS OF THE CAUSES AND RECOMMENDATIONS FOR REDUCING

Anatoliy S. Aleksandrov, Tatiana V. Semenova, Aleksandr L. Kalinin
Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. The works of reducing the intensity of rutting on the roads are relevant nowadays. Activities of improving the stability of road pavements include solving material problems, improving methods of calculation of structures and the development of new technologies to ensure high quality construction.

Materials and methods. The analysis of data of natural and laboratory experimental researches established the reasons of formation of the rut on coverings of non-rigid road pavements. The authors presented the technique of experimental research of the tires passes' distribution of vehicles on width of the traffic way and traffic lane. Moreover, the authors gave the coefficients for calculating the number of loads in the central and marginal parts of the coasting strips as well as in the inter-track space.

Results. As a result, the authors suggested designs of road pavements with hidden rut elements, which placed on a surface of a highway subgrade on the basis of road pavement.

Discussion and conclusions. As a result of the close proximity of the hidden track elements from each other, the soil of the subgrade between them experiences compression, in which the stress deviator is of the least importance compared to other stresses of the subgrade due to triaxial compression arising from both the moving load and its own weight pavement. The suggested variant helps to reduce significantly the deformation.

For the successful implementation of hidden rut pavement, it is necessary to develop a new or reasonably choose a well-known method of calculating the depth of the rut, which is necessary to verify the criterion of gauge formation in the calculation of the thickness of hidden rut elements and the thickness of the pavement.

KEYWORDS: road, road surface, rut, surface rut, deep rut, coasting strip, lateral track gauge.

Submitted 07.11.2019, revised 17.12.2019.

The 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: Anatoliy S. Aleksandrov, Tatiana V. Semenova, Aleksandr L. Kalinin Rutting on the surfaces of non-rigid road pavements: analysis of the causes and recommendations for reducing. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(6): 718–745 (in Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-6-718-745>

© Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Kalinin A.L.



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

ВВЕДЕНИЕ

Колея, появляющаяся и развивающаяся на поверхности покрытий нежестких дорожных одежд, негативно отражается на потребительских свойствах автомобильных дорог. В первую очередь страдает безопасность движения. Дело в том, что колея препятствует отводу воды с поверхности покрытия, и в ней скапливаются атмосферные осадки. При движении по дороге с колеей, заполненной водой, водители стараются выбрать траекторию движения так, чтобы колеса транспортного средства располагались в межколеинном пространстве. В этом пространстве поверхность покрытия увлажнена, но очищена стекающей водой от пыли и грязи. При такой схеме движения коэффициент сцепления шины с покрытием достаточный для передвижения со сравнительно высокой скоростью. При разъезде со встречным автомобилем водители меняют траекторию движения, и шины колес транспортного средства оказываются на полосах наката, в пределах которых расположена колея, заполненная водой. В этот момент времени коэффициент сцепления шины с покрытием уменьшается, а его величина зависит от скорости движения, глубины воды в колее, параметров шероховатости покрытия (макро- и микрошероховатость) [1, 2, 3]. Поэтому работы, направленные на борьбу с образованием колеи, актуальны для дорожной отрасли и позволяют уменьшать интенсивность ухудшения безопасности движения, снижения ровности и прочности дорожной одежды, поддерживать скорость движения на требуемом уровне.

Мероприятия по обеспечению устойчивости дорожных одежд к образованию колеи можно разделить на три большие группы, к которым отнесем исследования в области материаловедения, конструирования и расчета дорожных одежд, разработки новых технологий и совершенствования методов организации строительства.

Материаловедческие решения направлены на:

- поиск составов смесей, обладающих каркасной устойчивостью к пластическому деформированию при испытаниях на сдвиг и трехосное сжатие, что актуально как для асфальтобетонных смесей [4, 5], так и для смесей из зернистых материалов [6, 7];
- разработку добавок, в том числе из отходов промышленности, к органическим вяжущим материалам, снижающих пластичность

смесей, что эффективно для смесей и грунтов с органическим вяжущим [8, 9];

– исследования в области применения медленнотвердеющих вяжущих, позволяющих добиваться эффекта набора прочности в течение длительного периода [10], что повышает сопротивление смеси, обработанной такими вяжущими, накоплению остаточных деформаций на длительном отрезке эксплуатации дорожной конструкции.

Новые технологии позволяют улучшать качество строительства и увеличивать однородность показателей прочности и деформируемости материалов в слоях дорожной одежды. Усовершенствованные способы организации строительства приводят к рациональным расчетам дальности транспортирования горячих асфальтобетонных смесей и обеспечению оптимального температурного режима их укладки и уплотнения [11, 12, 13].

Задачи, решаемые в области совершенствования расчетов дорожных одежд, дают возможность внедрять в практику проектирования новые решения, позволяющие конструировать деформационно-устойчивые слои из известных материалов. Критерием создаваемых методов расчета служит условие, в соответствии с которым фактическая глубина колеи, формирующаяся в результате накопления остаточных деформаций, не может превышать предельных значений. Предельные значения глубины колеи оговариваются в нормативных и методических документах, а их обоснованию посвящены отдельные научные работы [14]. Для прогнозирования процесса развития колеи применяют численные методы¹ [15], аналитические решения [16, 17, 18, 19] и эмпирические формулы, полученные на основе лабораторных [20, 21, 22, 23] и натуральных испытаний [24, 25, 26, 27, 28, 29].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В целях рационального конструирования деформационно-устойчивых дорожных одежд представляют интерес данные натуральных испытаний, позволяющие определить причины формирования колеи в конструкциях из различных материалов и разной капитальности. Такие данные получены в рамках международной программы полномасштабных ускоренных испытаний покрытий (*Full-scale Accelerated Pavement Testing «f-sAPT»*), при реализации которой выполнены испытания дорожных конструкций в

¹ Горшков Н.И. Разработка и внедрение геомеханического обеспечения проектирования транспортных сооружений на основе метода конечных элементов: дис...д-ра техн. наук по специальности 05.23.11. Хабаровск, 2016. 389 с.



Рисунок 1 – Кольцевые стенды [30, 31, 32]:
а – имитатор университета Кентерберри (Новая Зеландия, южный остров);
б – имитатор Нантского университета (Франция);
в – имитатор Андского университета (Колумбия)

Figure 1 – Ring stands [30, 31, 32]:
а – simulator of the Canterbury University (New Zealand, South Island);
б – simulator of the Nantes University (France);
в – simulator of the Andes University (Colombia)

Австралии, Бразилии, Германии, Голландии, Китае, США (штаты Вирджиния, Дакота, Индиана, Калифорния, Канзас, Луизиана, Миннесота, Флорида и др.), Швеции, ЮАР, Японии. Безусловно, что такие экспериментальные данные уникальны и могут быть использованы во многих странах мира. Испытания проводятся при помощи кольцевых стендов, применяемых для специально построенных конструкций, или имитаторов колесной нагрузки, которые используют для испытаний дорожных одежд, как на опытных полигонах, так и конструкций на эксплуатируемых дорогах.

Кольцевые стенды приведены на рисунке 1 [30, 31, 32].

Кольцевые стенды применяют на опытных полигонах, на которых предварительно устраивают испытываемую конструкцию дорожной одежды. При строительстве дорожной одежды в нее устанавливают датчики, позволяющие измерять деформации [30, 32, 33]. Согласно ОДМ 218.2.091–2017² такие измерения называют тензометрическими наблюдениями, применяемыми для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций. Достоинством этих испытаний является возможность расположения датчиков по глубине как на границах раздела слоев, так и внутри слоя. При обработке данных можно судить о вкладе того или иного слоя дорожной одежды, а также

² ОДМ 218.2.091–2017 Геотехнический мониторинг сооружений инженерной защиты автомобильных дорог. – М. : Росавтодор, 2017. – 91 с.

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

грунта земляного полотна в смещение поверхности покрытия, накопленное в результате воздействия нагрузки.

На рисунке 2 приведены линейные имитаторы подвижной нагрузки [34, 35, 36, 37], достоинством которых является возможность их транспортировки. Поэтому такие имитаторы применяют как для испытаний конструкций, построенных на опытных полигонах, так и дорожных одежд на эксплуатируемых участках дорог.

Анализ результатов данных испытаний позволяет определить условия, при которых определенный элемент дорожной конструкции вносит наибольший вклад в накопленную всей системой «дорожная одежда – земляное полотно» остаточную деформацию или глубину колеи на покрытии. Также имеется возможность исследования условий, при которых деформации материала конструктивного слоя являются деформацией сдвига.



Рисунок 2 – Имитаторы подвижной нагрузки [34, 35, 36, 37]:
а – Caltrans/UCPRC HVS; б – FloridaDOT; в – TxDOT MLS (обновленный вариант); г – Kansas APT;
д – Indiana DOT APTF; е – Louisiana DOTD ALF

Figure 2 – Moving load simulators [34, 35, 36, 37]:
а – Caltrans/UCPRC HVS; б – FloridaDOT; в – TxDOT MLS (updated version); г – Kansas APT;
д – Indiana DOT APTF; е – Louisiana DOTD ALF

Одним из вариантов исследования глубин колеи, формирующихся в результате деформирования дорожных конструкций, является отрывка траншей. Траншеи располагают перпендикулярно оси дороги, в них разбивают первоначальные поверхности слоев, закре-

пая натянутым шпагатом, или прорисовывают мелом. Траншеи дают наглядное представление о деформировании поверхности каждого конструктивного слоя. Иллюстрация траншей и деформированных слоев дорожной одежды приведена на рисунке 3.

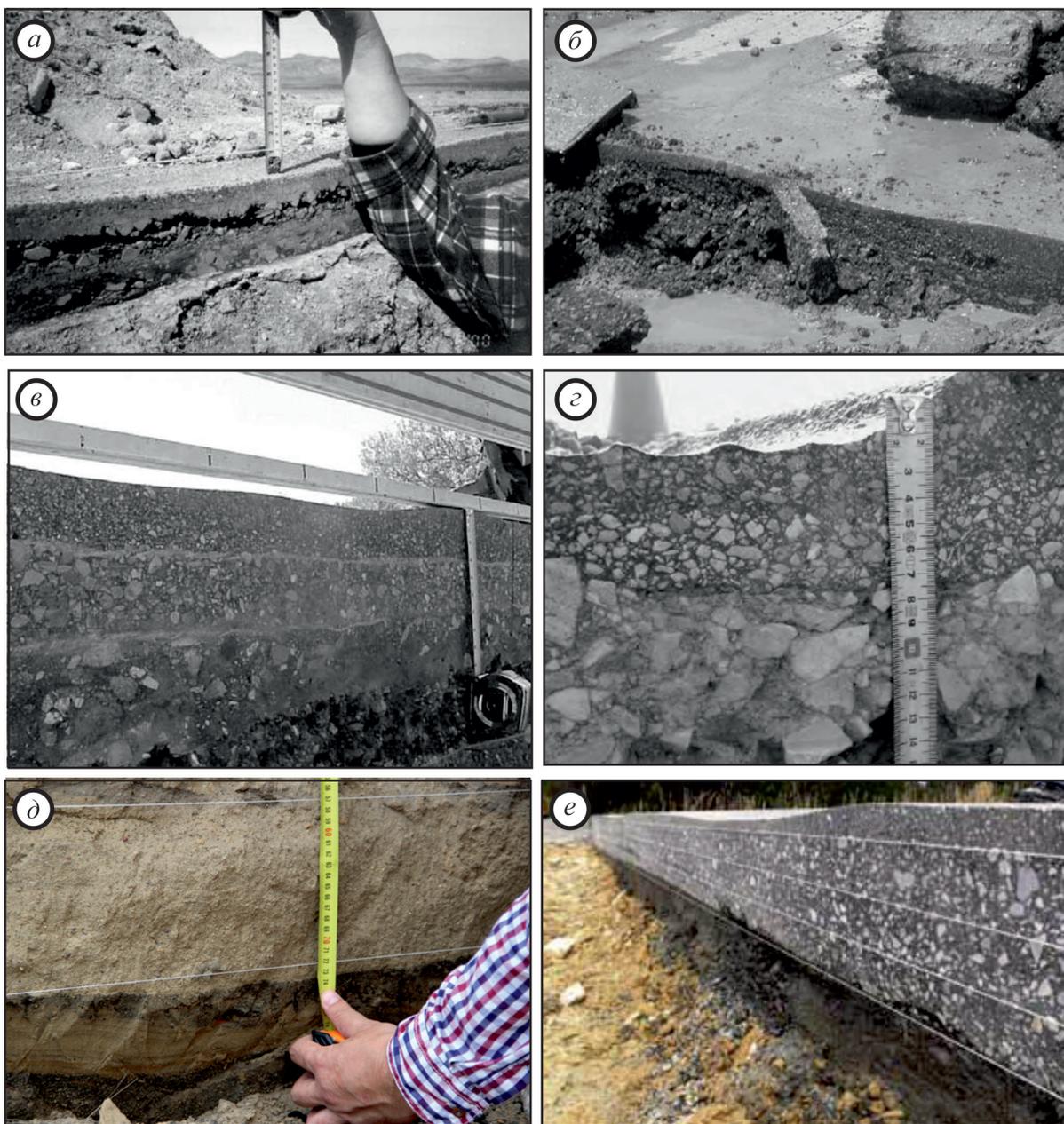


Рисунок 3 – Исследования деформирования слоев дорожной одежды в траншеях, открытых перпендикулярно оси дороги [38, 43, 44, 45]:
а – шоссе SR 267 (Невада, США); б – шоссе SH 28 East (Миссиссипи, США);
в – шоссе US 281 (Техас, США); г – шоссе US 64 East (северная Каролина, США);
д – улица 24-я Северная (Омск, Россия); е – шоссе S11 (США)

Figure 3 – Research of the layers' deformation on road pavements in trenches perpendicular to the axis of the road [38, 43, 44, 45]:
а – highway SR 267 (Nevada, USA); б – highway SH 28 East (Mississippi, USA);
в – highway US 281 (Texas, USA); г – highway US 64 East (North Carolina, USA);
д – 24, Severnaya St. (Omsk, Russia); е – highway S11 (USA)

Нами проанализированы научно-технические отчеты [38, 39, 40, 41, 42] и публикации [32, 43, 44, 45], в которых приведены иллюстрации колеи в траншеях, результаты измерений их глубин, деформаций поверхностей слоев и даны сведения о дорожной конструкции и условиях ее эксплуатации. На основе анализа выделили три модели условий развития колеи в нежестких дорожных одеждах с асфальтобетонным покрытием.

Анализируя данные рисунка 3,а,б, можно заметить, что основной причиной возникновения колеи является деформирование слоев, подстилающих однослойное асфальтобетонное покрытие. Боковые выпоры колеи, отчетливо просматривающиеся на рисунке 3,б, обусловлены деформациями основания из зернистого материала, который в данном случае испытывает деформации сдвига. Асфальтобетон в верхнем слое не имеет четко выраженных деформаций, а незначительное изменение толщины этого слоя может объясняться износом покрытия. При этом величина износа много меньше глубины колеи. Основной причиной колеи, возникающей в дорожных одеждах с покрытием переходного типа, характеризующихся суммарной толщиной слоев из материалов, обработанных органическим вяжущим, до 12 см, следует считать деформации, возникающие в слоях оснований из зернистых материалов и грунтах земляного полотна. Эти деформации носят упругопластический характер и обуславливаются двумя составляющими: уплотнением и сдвигом. Уплотнение возникает в результате воздействия шаровой составляющей тензора напряжений, а сдвиг – девиатора напряжений.

Объяснение такому поведению материалов можно дать из анализа методов расчета тонких пластин, базирующихся на гипотезах об их работе при изгибе. Расчетная схема тонкой пластины предполагает, что при ее изгибе материал не испытывает вертикальных нормальных напряжений или деформаций. При расчете тонких пластин вводится допущение об их плоском напряженном состоянии³. Такое допущение называют гипотезой о ненадавливании продольных волокон. Эта гипотеза постулирует, что вертикальное нормальное напряжение много меньше горизонтальных

нормальных напряжений, вследствие чего вертикальное нормальное напряжение можно принять равным нулю⁴. Отсутствие вертикальных деформаций в тонкой пластине также является допущением, которое называют гипотезой плоских сечений или гипотезой Бернулли. Эта гипотеза постулирует, что поперечные сечения, плоские и перпендикулярные к оси балки до деформации, остаются плоскими и перпендикулярными к изогнутой оси после ее деформации.

Анализ данных рисунка 3,а,б позволяют утверждать, что к асфальтобетонным покрытиям одежд переходного типа применимы гипотезы изгиба тонких пластин. Следовательно, вертикальными деформациями асфальтобетона можно пренебречь, а причиной возникновения колеи следует считать деформации слоев из зернистых материалов основания и грунтов земляного полотна.

Усовершенствованные покрытия капитального типа, имеющие суммарную толщину слоев из материалов, обработанных органическим вяжущим, более 18 см, работают на изгиб как толстая плита и испытывают вертикальные компоненты напряжений и деформаций. Подобное деформирование приведено на рисунке 3,в и рисунке 3,е, причем на рисунке 3,е дана иллюстрация локализации деформаций в верхнем слое, так называемой «вечной» дорожной одежды [43]. Такая колея является поверхностной, формирующейся за счет деформирования слоев покрытия.

На рисунке 3, д и более детально на рисунке 4 приведены результаты наших исследований [44], иллюстрирующие накопление деформаций в глинистом грунте земляного полотна дороги, расположенной по ул. 24-я Северная г. Омска. Особенностью ул. 24-я Северная является отсутствие грузового движения, наибольшими нагрузками значатся автобусы с коэффициентом приведения к расчетной нагрузке 0,7. Траншея устроена на расстоянии 10 м от пересечения с дорогой по ул. Герцена, а измерения выполнены: по правой стороне движения за светофорным объектом в пределах участка разгона транспорта и по левой стороне движения в пределах участка торможения транспорта перед светофором.

³ Макаров Е.Г. Теория пластичности и ползучести для инженеров (курс лекций). – СПб : БГТУ-Военмех, 2017. – 140 с.

⁴ Завьялов В.Н., Мартынов Е.А., Романовский В.М. Основы строительной механики пластин: учебное пособие – 2-е изд., испр. – Омск : СибАДИ, 2012. – 116 с.

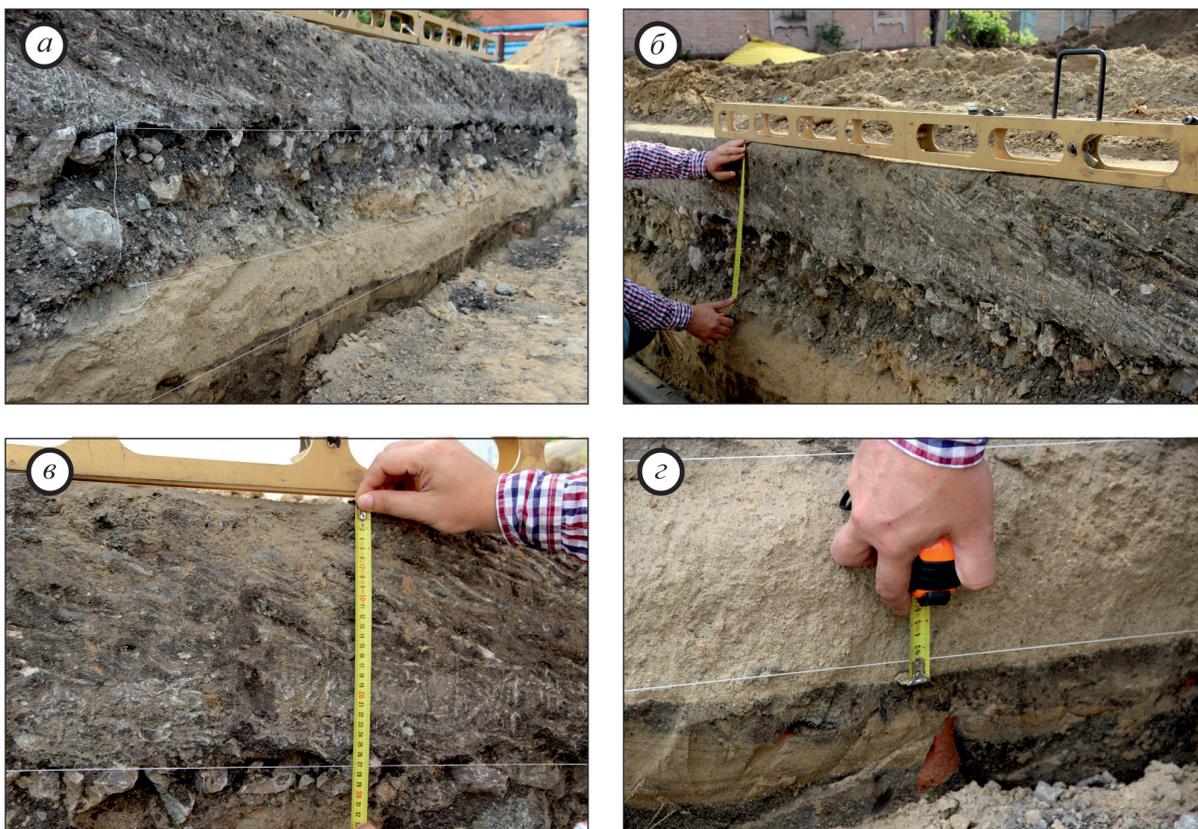


Рисунок 4 – Иллюстрации измерений толщин слоев дорожной одежды при обследовании колеи на участке разгона проезжей части по ул. 24-я Северная в г. Омске:
а – общий вид траншеи с натянутым шпагатом между слоями; б – измерение толщин слоев между колеи; в и г – измерения общей толщины асфальтобетонных слоев и деформации земляного полотна в сечении с максимальной глубиной колеи

Figure 4 – Illustrations of measurements of thickness of the layers of road pavements at survey of a rut on an acceleration lane of the traffic way on 24-ya Severnaya St. in Omsk:
а – general view of the trenches with stretched twine between the layers; б – measurement of the thickness of layers between the cart-ruts; в and г – measure of the total thickness of asphalt layers and deformation of the highway subgrade in cross-section with the maximum rut depth

При обследовании дорожной одежды на участке разгона в траншее установлено, что глубина внешней колеи составляет 24 мм, а внутренней – 22 мм, причем суммарная толщина слоев из асфальтобетона 27 см в любой точке поперечного профиля. Деформация земляного полотна в центре внешней колеи составила 20 мм, а внутренней – 17 мм. Таким образом, вклад деформаций грунтов земляного полотна в глубину колеи будет 77% по внутренней колее и 83% по внешней колее. Поверхность дополнительного слоя основания из песка деформирована на 22 и 20 мм по внешней и внутренней колее. Таким образом, остаточные деформации, накопленные песчаным дополнительным слоем основания, составляют 2 мм по внешней колее и 3 мм по внутренней колее. Следовательно, вклад деформаций песчаного слоя в глубину колеи

будет 8% по внешней колее и около 14% по внутренней колее. Оставшаяся часть деформации 2 мм накоплена щебеночным основанием толщиной 18 см. Таким образом, вклад щебеночного основания во внешнюю и внутреннюю колею составил 8% и 9% соответственно. Такая колея носит глубинный характер и иллюстрирует отсутствие остаточных деформаций слоев в слоях из материалов, содержащих органическое вяжущее. Примечательно, что на участке разгона транспорта отсутствовал износ поверхности покрытия, хотя в г. Омске 6 месяцев в году покрышки на колесах легкового транспорта имеют шипы.

На противоположной стороне движения, то есть в пределах участка торможения, наблюдалась несколько иная картина. На данном участке суммарная толщина асфальтобетонных слоев в колее на 3 мм меньше суммар-

ной толщины этих слоев между колеи. Общая глубина внешней колеи 33 мм, а внутренней 29 мм. Так, вклад износа покрытия и деформаций уплотнения асфальтобетона транспортом в глубину колеи можно характеризовать от 9% до 10%. Деформация щебеночного основания составила те же 2 мм, но его вклад в глубину колеи уменьшился до 6% и 7% соответственно по внешней и внутренней колее. Деформации песчаного слоя будут по внутренней колее 3 мм, а по внешней – 4 мм. Поэтому вклад щебеночного основания в общую глубину колеи составляет 10–12%. Деформации земляного полотна по внешней и внутренней колее 21 и 24 мм соответственно. Значит, вклад грунта земляного полотна в глубину колеи 72–73%.

Усовершенствованные покрытия облегченного типа, характеризующиеся суммарной толщиной слоев из материалов, обработанных органическим вяжущим, 12–18 см могут работать по одной из этих двух схем.

При нагреве асфальтобетонного покрытия облегченного или капитального типа до высоких температур, вязкость битумного вяжущего существенно уменьшается, и плита утрачивает способность работать на изгиб. В этом случае асфальтобетон и материалы, обработанные битумом, подобно зернистым материалам, испытывают трехосное сжатие, претерпевая деформации сдвига. Такая схема формирования колеи приведена на рисунке 3,г. Отличительной чертой такого деформирования является уменьшение толщины асфальтобетонного слоя в пределах полосы наката и ее увеличение в боковом выпоре. Колея носит поверхностный характер, но развивается за счет деформаций сдвига.

Попытки классификации колеи принимались в различных работах [38, 39, 46]. Авторы работ [38, 46] колеи, формирующиеся на поверхности асфальтобетонных покрытий, разделяют на три типа, два из которых относятся к поверхностной колее, а один тип к глубинной колее. Поверхностная колея возникает вследствие износа материала покрытия или из-за нестабильности материала верхнего слоя, например асфальтобетона. Глубинная колея называется структурной колеей, обуславливающейся деформациями грунтов земляного полотна и слоев дорожной одежды, подстилающих покрытие.

Колея износа образуется за счет отделения частиц асфальтобетона с поверхности покрытия. Местами сосредоточения такой колеи являются участки торможения [46], а интенсивность ее развития возрастает в зимний период. Это объясняется двумя причинами. Авторы работ [38, 46] указывают, что при борьбе с зимней скользкостью на поверхность покрытия подаются абразивные материалы, например песок. Трение абразива о покрытие увеличивает износ [46]. В работе [47] исследовано влияние шипов на глубину колеи износа, а шипы рассматриваются в качестве главной причины износа. Таким образом, для образования колеи износа необходимыми условиями являются участки торможения и зимний период года.

С таким типом колеи мы столкнулись при обследовании покрытия автомобильной дороги по ул. 1-я Чередовая, расположенной в г. Омске, иллюстрации полевых измерений и отбора проб приведены на рисунке 5.

Колея, протяженностью 12 м, возникла на участке торможения непосредственно на съезде с ул. 1-я Чередовая на ул. Невского (рисунок 5, а). Ремонт обеих улиц выполнен в августе и сентябре 2016 г., а наше обследование датируется 13.11.2019 г., таким образом, отремонтированный участок эксплуатировался в течение 3 лет. Дорожная конструкция представляет собой существующую дорожную одежду, ремонт которой выполнен путем фрезерования асфальтобетонного покрытия на среднюю глубину 4 см и устройством двух новых слоев из горячих асфальтобетонных смесей. Нижний слой является выравнивающим слоем, он устроен из горячей пористой мелкозернистой смеси. Верхний слой толщиной 5 см выполнен из горячей, плотной, мелкозернистой асфальтобетонной смеси типа А, марки II.

Глубина колеи определялась путем измерения максимального просвета под двухметровой рейкой, что соответствует требованиям ОДМ⁵, а также требованиям ОДН 218.0.006–2002, являвшегося действующим нормативным документом на момент приемки автомобильных дорог и ввода их в эксплуатацию. Из анализа рисунка 5,а следует, что колея образовалась на участке торможения, и согласно рисунку 5,в имеет глубину 60 мм, что превы-

⁵ ОДМ Рекомендации по выявлению и устранению колеи на нежестких дорожных одеждах. Ч. 1. Методика измерений и оценки эксплуатационного состояния дорог по глубине колеи. – М. : Росавтодор, 2002.



Рисунок 5 – Обследование колеи на дороге по ул. 1-я Чередовая в г. Омске:
а – измерение глубины колеи под 2-х метровой рейкой; б – отбор кернов из колеи и между колеи;
в – результат измерения глубины колеи 60 мм; г – иллюстрации различий поверхностей кернов, взятых из колеи и между колеи

Figure 5 – Inspection of the rut on the road surface on 1-ya Cheredovaya St. in Omsk:
а – measure of the depth rut under the 2 meter rail; б – core drilling out of the rut and between the ruts;
в – rut depth measurement result of 60 mm; г – illustration of differences in surface core drilling of the rut and between the ruts

шает предельные значения, регламентируемые ГОСТ Р 50597⁶ для дорог, относящихся к группам улиц Б и В. Для определения причины формирования колеи использована методика, рекомендуемая ОДН⁷, дополненная нами измерениями толщин кернов, взятых из дна колеи (в данном случае из внутренней колеи) и межколеинного пространства, расположенного между внешней и внутренней колеями. Иллюстрация отбора приведена на рисунке 5, б.

При визуальном осмотре наше внимание привлекло различие поверхностей асфальтобетонного покрытия на дне колеи и между колеи. Такое различие показано на примере отличий поверхностей кернов, представленных на рисунке 5,г. При измерении толщин обнаружили полное отсутствие верхнего слоя покрытия у кернов, взятых со дна колеи. У кернов, отобранных между колеи, толщина верхнего слоя составила 4,8 мм, что на 2 мм меньше

⁶ ГОСТ Р 50597–2017. Дороги автомобильные и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Методы контроля. Введен в действие 01.06.2018. Взамен ГОСТ Р 50597–93 – М. : Стандартинформ, 2017. – 28 с.

⁷ ОДМ Рекомендации по выявлению и устранению колеи на нежестких дорожных одеждах. Ч. 3. Рекомендации по устранению колеи на автомобильных дорогах. – М. : Росавтодор, 2002.

проектной толщины. Керны доставлены в лабораторию и испытаны в соответствии с требованиями ГОСТ 12801–98⁸ на предмет определения соответствия асфальтобетона и смеси требованиям ГОСТ 9128–2013⁹. В результате установлено, что асфальтобетон верхнего конструктивного и нижнего выравнивающего слоя и примененные для их устройства горячие асфальтобетонные смеси соответствуют всем требованиям государственного стандарта. Измерения толщин выравнивающего слоя в кернах, отобранных из одного и того же поперечного сечения со дна внутренней колеи и между колеи, позволили сделать вывод об их одинаковых значениях. В соответствии с этим результатом констатировали отсутствие износа нижнего выравнивающего слоя. Поэтому причиной колеи является полный износ верхнего слоя покрытия из горячей, плотной, мелкозернистой асфальтобетонной смеси типа А, марки II на величину 50 мм и деформирование нижележащих слоев существующей дорожной одежды и грунтов земляного полотна на величину 10 мм. Таким образом, на участках торможения износ покрытия является основной причиной образования колеи, обуславливающей ее глубину на 83%, и только 17% глубины колеи объясняется деформированием слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна.

Исследованию механизма износа покрытия посвящена одна из последних кандидатских диссертаций, выполненная А.И.Котовым¹⁰. Суть гипотезы А.И. Котова состоит в том, что процессу износа сопутствует образование в асфальтобетоне сетки пор, в которую попадает вода, а под воздействием нагрузки от колеса автомобиля вода создает поровое давление. Возникновение такого давления способствует интенсификации износа.

Этой интересной и новой гипотезе мы нашли экспериментальное подтверждение, полученное при обследовании колеи на автомобильной дороге по ул. Д. Бедного в г. Омске. Ремонт автомобильной дороги произведен одновременно с ремонтом дорог по ул. Невского и 1-я Челюскинцев. Работы на всех дорогах выполнены одним и тем же подрядчиком, приготавливав-

шим горячие пористую и плотную асфальтобетонную смесь на одном заводе из одинаковых материалов. Конструкции дорожных одежд одинаковые и включают в себя выравнивающий слой из горячей пористой асфальтобетонной смеси и верхний слой толщиной 50 мм из горячей плотной смеси типа А, марки II. Участок с колеей, обнаруженной на автомобильной дороге по ул. Д. Бедного, имеет протяженность 336 м и расположен от перекрестка с ул. 10-я Чередовая до перекрестка с ул. Полторацкого.

На обследуемом участке отбирались пробы асфальтобетона в виде кернов со дна колеи и между колеи. Для отбора проб выбрано две точки: одна точка с колеей глубиной 30 мм в районе остановки ул. Полторацкого, а вторая напротив дома 114 по ул. Д. Бедного (рисунок 6).

Обе точки отбора расположены в пределах одного прямолинейного участка. Первая точка находится в районе ост. «Ул. Полторацкого» на расстоянии 40 м от пешеходного перекрестка, то есть вне пределов участка торможения. Глубина колеи составляет 30 мм, а толщина верхнего слоя в кернах, отобранных со дна колеи, 42 мм, а в кернах, взятых между колеи 45 мм. Значения контролируемых параметров обоих асфальтобетонов и их смесей соответствуют требованиям ГОСТ 9128–2013. Таким образом, износ составляет 3 мм, а оставшаяся часть колеи глубиной 39 мм обусловлена деформациями материалов слоев оснований и грунтов земляного полотна. Коэффициенты уплотнения плотного асфальтобетона составили 0,99 для верхнего слоя и 0,98 для нижнего слоя, они соответствуют требованиям СП 78.13330.2012 и имеют такие же значения, какие были получены специалистами строительного контроля три года тому назад. Следовательно, деформации уплотнения асфальтобетона колесами транспортных средств за предшествующие нашим исследованиям теплые периоды эксплуатации дороги можно исключить. Это значит, что износом верхнего слоя покрытия объясняется 10% глубины колеи, а причиной формирования оставшейся части колеи глубиной 90% следует считать деформации земляного полотна и слоев дорожной одежды, подстилающих покрытие.

⁸ ГОСТ 12801–98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. Введен в действие 01.01.1999. Взамен ГОСТ 12801-84. – М. : ГУП ЦПП, 1999. – 54 с.

⁹ ГОСТ 9128–2013. Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. Взамен ГОСТ 9128-2009. Введен в действие 01.11.2014. – М. : Стандартинформ, 2014. – 51 с.

¹⁰ Котов А.И. Повышение износостойкости покрытия автомобильной дороги при наличии влаги в верхнем слое. Автореферат дис. ... к-та техн. наук по спец. 05.23.11. Воронеж, ВГТУ, 2019 – 19 с.



Рисунок 6 – Обследование колеи на дороге по ул. Д. Бедного в г. Омске:
а – измерение глубины колеи в точке ост. «Ул. Полторацкого»; б – отбор кернов из колеи и между колеи;
в – результат измерения глубины колеи 30 мм; г – иллюстрации измерения толщины верхнего слоя
асфальтобетонного покрытия; д – измерение глубины колеи в точке напротив д. 114 по ул. Д. Бедного;
е – отбор кернов со дна колеи

Figure 6 – Survey of a rut on the traffic way on D. Bednogo St. in Omsk:
a – measuring the depth of the rut at the point «ost. Poltoratskogo St.»; б – core drilling from the rut and between the ruts;
в – result of measuring the depth of the 30 mm rut; г – illustrations of measuring the thickness of the asphalt surface course;
д – measuring the depth of the rut at the point «opposite 114, D. Bednogo St.».; e – core drilling from the bottom of the ru.



Рисунок 7 – Измерение глубины внешней и внутренней колеи на дороге по ул. Интернациональная:
а – измерение глубины внешней колеи; б – результат измерения глубины внутренней колеи

Figure 7 – Measuring the depth of the external and internal rut on the traffic way on the International St.:
a – external rut depth's measurements; b – result of measuring the depth of the internal rut

Во второй точке, напротив д. 114 по ул. Д. Бедного, глубина колеи составляет 25 мм, а разница толщин верхнего асфальтобетонного слоя в кернях, отобранных со дна колеи и между колеи составляет 4 мм. Оставшаяся часть колеи глубиной 21 мм объясняется деформациями грунтов земляного полотна и материалами существующей дорожной одежды. Лабораторные испытания показали, что водонасыщение асфальтобетона в кернях, взятых со дна колеи, составляет 6,1%, а в кернях, отобранных между колеи, оно равно 4,8%. Керны взяты из одного и того же поперечного сечения. Это значит, что покрытие в местах отбора проб устроено из смеси, привезенной одним и тем же самосвалом, причем из одного и того же замеса. Уплотнение произведено при одинаковых условиях. Однако в кернях, отобранных между колеи, водонасыщение соответствует требованию «не более 5%», регламентируемому ГОСТ 9128–2013, а в кернях, взятых со дна колеи, этот параметр не соответствует требованиям стандарта. Отсюда следует вывод, что в процессе износа асфальтобетона в этом поперечном сечении в покрытии образовались дополнительные поры, которые могут создавать сетку, а при попадании в нее воды под воздействием транспортной нагрузки могут создавать дополнительное поровое давление, которое приводит к интенсификации процесса износа. Подтверждением этому служит увеличение величины износа от 3 мм (первая точка) до 4 мм (вторая точка). Причем для второй точки вклад износа в общую глубину колеи составляет 16%, а для первой точки

10%. Поэтому предложение А.И. Котова заслуживает внимания. При этом отметим, что обе точки полевых измерений и отбора проб находятся вне участков торможения транспорта и наибольший вклад в развитие колеи вносят деформации материалов в нижележащих слоях и грунтов земляного полотна. Этот вклад составляет 90% для первой точки и 84% для второй точки отбора.

Также следует отметить, что необходимо разрабатывать методики расчета дорожных одежд, позволяющие учитывать вклад процесса износа поверхности покрытия в глубину колеи. Кроме того, развитие сетки пор, происходящее в процессе износа асфальтобетона, свидетельствует об увеличении его поврежденности. Поэтому актуальны работы, выполняемые в направлении модификации методов расчета дорожных одежд, путем учета увеличения поврежденности асфальтобетона в процессе эксплуатации дороги.

Практический интерес вызывает изучение колеи, образующихся в местах кратковременных стоянок транспортных средств и на участках подхода к ним. Такая колея обнаружена нами на дороге по ул. Интернациональная в г. Омске. На рисунке 7 приведена иллюстрация измерения глубины колеи в сечениях участка напротив остановки общественного транспорта «Главпочтамт».

Особенностью колеи на обследуемой дороге является то, что она распространена на протяжении всей улицы на участке от остановки «Кинотеатр В. Маяковского» до перекрестка с ул. Герцена. На основном протяжении глубина

колеи на момент обследования была одинаковая и составляла 4 мм, но в районе остановки «Главпочтамт» глубина колеи увеличивается и на крайней правой полосе движения достигает значений 72 мм по внешней полосе наката и 50 мм на внутренней полосе наката. Причем по длине колеи, равной 80 м, ее глубина изменяется, достигая максимальных значений в местах наиболее длительной стоянки автобусов. Результаты измерения глубин колеи в сечениях, расположенных на расстоянии 10 мм друг от друга, приведены в таблице 1.

Ремонт дорожной одежды выполнен летом 2016 г, а обследования проведены 10.10.2018 г. Конструкция дорожной одежды представляет собой двухслойное асфальтобетонное покрытие с верхним слоем толщиной 50 мм из горячей плотной, мелкозернистой асфальтобетонной смеси типа Б, марки II и нижним выравнивающим слоем из горячей пористой мелкозернистой асфальтобетонной смеси, а также существующей дорожной одежды и земляного полотна из суглинка легкого песчанистого. При выполнении ремонта существующее покрытие фрезеровалось на среднюю глубину 4 см, после чего выполнялось устройство выравнивающего и конструктивного асфальтобетонных слоев.

В пределах обследуемого участка колеи на крайней правой полосе останавливаются автобусы, интенсивность движения которых в обоих направлениях составляет 2953 автобусов в сутки. В ходе обследований из сечений, расположенных в пределах поперечных профилей,

отбирались керны. Местом отбора, также как и в предыдущих случаях, служили дно колеи и пространство вне колеи, и боковые выпоры внешней колеи. В результате установлено, что разница толщин верхнего слоя в кернах, взятых со дна колеи и из боковых выпоров, составляет 2–4 мм. Отличие толщин верхнего слоя в кернах, взятых со дна колеи и между колеи, находится в пределах 2–8 мм. Поэтому деформации сдвига асфальтобетона нами исключены, глубина колеи, обусловленная износом покрытия, может составлять до 8 мм. При этом нужно принимать во внимание факт отличия коэффициентов уплотнения. Асфальтобетон верхнего слоя в кернах, отобранных между колеи и боковых выпоров, имеет коэффициент уплотнения 0,99, а в кернах, взятых со дна колеи, коэффициент уплотнения этого асфальтобетона составил 1,0 в двух пробах и 1,01 в одной пробе. Таким образом, асфальтобетон верхнего слоя в колее доуплотнялся в теплый период года нагрузкой от автобусов. Аналогичное различие коэффициентов уплотнения характерно для горячего пористого асфальтобетона выравнивающего слоя, его коэффициент уплотнения в кернах, отобранных между колеи, составил 0,98, в кернах, взятых из боковых выпоров 0,98, а в образцах, извлеченных со дна колеи 1,01 (два образца) и 1,0 (один образец). Поэтому часть колеи глубиной 8 мм обусловлена как износом верхнего слоя, так и уплотнением асфальтобетона в обоих слоях нагрузкой от автобусов.

Таблица 1
Результаты измерения глубины колеи по полосам наката

Table 1
Results of measuring the depth of the rut on the coasting strips

Полоса движения	Направление хода измерений	Адрес точки измерений ПК+	Глубина колеи, мм	
			Внешняя	Внутренняя
Крайняя правая	В сторону ул. Герцена	0+00	6	5
		0+10	22	20
		0+20	30	13
		0+30	55	24
		0+40	72	41
		0+50	55	50
		0+60	36	29
		0+70	30	24
		0+80	43	24

В этом случае износ асфальтобетона верхнего слоя и уплотнение асфальтобетона обоих слоев объясняет до 13% глубины колеи, причиной оставшихся 87% необходимо считать деформации грунтов земляного полотна и слоев существующей дорожной одежды. Причем в данном случае деформирование слоев основания из зернистых материалов и земляного полотна повлекло появление выпоров колеи, что свидетельствует о явном проявлении деформаций сдвига хотя бы в одном из этих слоев, то есть по аналогии с рисунка 3, б. На этом рисунке отчетливо виден выпор в слое из зернистого материала, образовавшийся в результате сдвига и ставший причиной выпора колеи на асфальтобетонном покрытии.

Считаем, что важным фактором, объясняющим большую глубину колеи на этом участке, является продолжительность действия нагрузки. Наибольшую глубину колея имеет в центральной части, то есть в месте наиболее длительной стоянки автобусов. В результате чего развивается деформация ползучести. Обнаруженные условия формирования колеи в местах кратковременных стоянок требуют их более тщательного учета при проектировании дорожных одежд.

Для структурной (глубинной) колеи характерна практически одинаковая толщина слоев покрытия и основания дорожной одежды в колее и за ее пределами. По данным работы [38] основной причиной такой колеи являются остаточные деформации, накапливаемые в земляном полотне. Исследуя такие колеи, износ покрытия не обнаруживают или он незначителен, на что прямо указано в работе [38].

Колея, обусловленная нестабильностью материала верхнего слоя, объясняется возникновением деформации сдвига. Такая колея формируется по пути следования колеса, а за его пределами формируется боковой выпор [38].

В работе [39] выполнена классификация колеи для дорожной одежды со слоями из зернистых материалов. Авторы выделили три типа колеи. Колея первого типа образуется за счет деформаций уплотнения слоя из зернистого материала, уложенного на стабильное земляное полотно. Обязательным условием такого деформирования является отсутствие тяжелых нагрузок и хорошее уплотнение слоев из зернистых материалов и земляного полотна. Авторы работы [39] отмечают, что в районах с промерзающими грунтами данное

деформирование может быть нарушено. Дело в том, что деформации морозного пучения приводят к разуплотнению грунтов земляного полотна, после чего они накапливают остаточные деформации. В этом случае, по данным авторов работы [39], колея первого типа может перейти в колею второго типа. Колея второго типа формируется за счет деформаций сдвига в грунте земляного полотна. Такая колея может возникать и без разуплотнения земляного полотна, для формирования необходимо возникновение больших напряжений, вызывающих деформации сдвига. Вторым условием образования колеи является существенное увлажнение земляного полотна, например в результате оттаивания грунтов, после глубокого сезонного промерзания [39]. Третий тип колеи обусловлен деформациями сдвига зернистого материала по поверхности скольжения, возникшей в слое. При достаточной толщине слоев дорожной одежды деформирование земляного полотна не происходит. Причина такой колеи состоит в промерзании и последующем оттаивании самого слоя из зернистого материала. В этом случае слой испытывает деформации сдвига, но в процессе эксплуатации повторно уплотняется транспортными нагрузками [39]. Данная колея характерна для северных стран [39].

Особый интерес представляют работы, в которых измерялись деформации поверхности слоев дорожной конструкции. На рисунке 8 приведены результаты измерения деформаций поверхностей слоев дорожных конструкций, представленных в таблице 2 [33]. Испытания проведены имитатором HVS, снабженным одним колесом со спаренной шиной, имеющей возможность смещать траекторию движения по ширине. Смещение проходов задается программой и необходимо для имитации распределения проходов шины по ширине полосы наката. Этот имитатор HVS находится в совместном владении Швеции и Финляндии.

Из анализа данных на рисунке 8 несложно определить, что по центру колеи в сечении $x=0$ глубина колеи на поверхности конструкции типа 1 составляет 61 мм, а типа 2 – 2–44 мм. Используя графоаналитический метод можно определить деформацию материала каждого слоя и вклад этого слоя в общую глубину колеи. Это реализуется путем определения местоположения поверхности рассматриваемого элемента конструкции до и после деформирования.

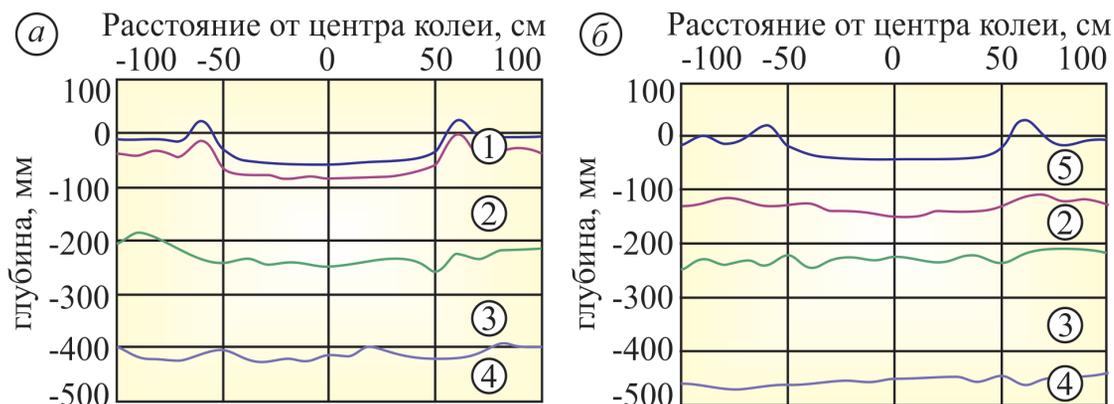


Рисунок 8 – Форма колеи и деформирование поверхностей слоев дорожных одежд [33]:
а – конструкция типа 1; б – конструкция типа 2;
1 – 5 конструктивные элементы, материалы которых приведены в таблице 2

Figure 8 – Shape of the rut and deformation of the surfaces of the road pavements' layers [33]:
а – type 1 construction; б – type 2 construction;
1 – 5 structural elements, the materials of which are given in the table 2

Таблица 2
Материалы слоев дорожных одежд рисунка 8

Table 2
Materials of the road pavements' layers on the figure

Номер на рисунке 8	Материал конструктивного слоя и модуль упругости	Толщина, мм	
		Тип 1	Тип 2
1	Слой износа	12	13
2	Зернистый материал, E=240 МПа	191	103
3	Зернистый материал, E=180 МПа	194	204
4	Земляное полотно (грунт песок), E=80 МПа	–	–
5	Зернистый материал, обработанный битумной эмульсией, соответствующей требованиям стандарта Швеции (BE 65M B180), E=600 МПа	–	91

Примечание: на рисунке 8, б положение нижней границы слоя износа не показано (на границе раздела слоев износа и покрытия датчики не устанавливались).

Начальное местоположение определяется суммой толщин слоев, расположенных выше рассматриваемого элемента. Местоположение поверхности этого же элемента конструкции после деформирования определяется по графику рисунка 8. Например, начальное местоположение поверхности земляного полотна в точке $x=0$ составит $12+191+194=397$ мм, а ее местоположение на рисунке 8 составляет 414 мм. Следовательно, накопленная песчаным земляным полотном остаточная дефор-

мация в точке $x=0$ составляет 17 мм. Далее определяя местоположение поверхности нижнего слоя конструкции типа 1 до и после деформирования, и вычитая из их разности деформацию земляного полотна, получим, что деформация материала в этом слое составила 30 мм или 49% от глубины колеи.

В таблице 3 приведены результаты расчета деформаций, накапливаемых каждым элементом обеих дорожных конструкций, и указан их вклад в колею.

Таблица 3
Деформации элементов дорожной конструкции

Table 3
Deformation of road structure elements

Тип конструкции	Материал конструктивного слоя	Деформация слоя, мм (%)
1	Слой износа	0 (0)
	Зернистый материал, E=240 МПа	14 (23)
	Зернистый материал, E=180 МПа	30 (49)
	Земляное полотно (песок), E=80 МПа	17 (28)
	Суммарная деформация всех элементов	61(100)
2	Зернистый материал, обработанный органическим вяжущим, E=600 МПа	1 (2)
	Зернистый материал, E=240 МПа	25 (56,8)
	Зернистый материал, E=180 МПа	-22 (-50)
	Земляное полотно (песок), E=80 МПа	40 (91)
	Суммарная деформация всех элементов	44(100)

Особенностью деформирования конструкции типа 2 является отрицательная деформация нижнего слоя дорожной одежды. Объяснением такому деформированию является разуплотнение слоя из зернистого материала. Разуплотнение происходит по двум причинам. На рисунке 8,б в сечении $x=0$ на поверхности этого слоя имеет место выпор материала. Таким образом, разуплотнение объясняется деформациями сдвига в этом слое и образованием выпора. Однако высота данного выпора меньше 22 мм. Поэтому деформация сдвига лишь отчасти объясняет разуплотнение зернистого материалов в этом слое. Рассматривая поверхности земляного полотна и нижнего слоя основания на рисунке 8,б можно заметить, что по всей ширине в пределах вариации x от -100 до 100 песчаная поверхность расположена ниже глубины 411 мм, на которой находилась эта поверхность до деформирования. Толщина нижнего слоя основания по всей ширине больше 204 мм, то есть после накатывания колеи толщина нижнего слоя увеличилась. Такому поведению материала можно дать только одно объяснение. В процессе деформирования нижний слой основания дорожной одежды копировал оседающую поверхность песчаного земляного полотна, и в процессе такого копирования несвязный зернистый материал испытал разуплотнение.

Отсюда следует, что определение вклада земляного полотна в накопленную на поверхности покрытия деформацию возможно, а расположенных выше него слоев из зернистых материалов затруднительно. Подтверждением служат данные эксперимента авторов работы [32], выполнивших испытания 5 конструкций на стенде, представленном на рисунке 1,б. Конструкции 1–4 имели однослойное асфальтобетонное покрытие толщиной 5 см (типы 1 и 2) и 8 см (типы 3 и 4). Основание этих дорожных одежд выполнено из зернистого материала толщиной 20, 35, 40 и 50 см. Конструкция типа 5 имела двухслойное асфальтобетонное покрытие суммарной толщиной 14 см и основание из зернистого материала толщиной 20 см. Земляное полотно выполнено из песчаных грунтов с модулем упругости 80–110 МПа. В процессе эксперимента приложено 1,5 млн нагрузок с измерением глубины колеи на поверхности с последующим устройством траншей и определением местоположения поверхностей слоев. Несмотря на проделанную работу авторы [32] отмечают, что вклад слоев в накопленную колею им определить не удалось. Тем не менее они установили, что в конструкциях типов 1–4 наибольшее деформирование происходит в слоях оснований из зернистых материалов и песчаных грунтах земляного полотна. В конструкции типа 5 вклад асфальтобетонных слоев значительный.

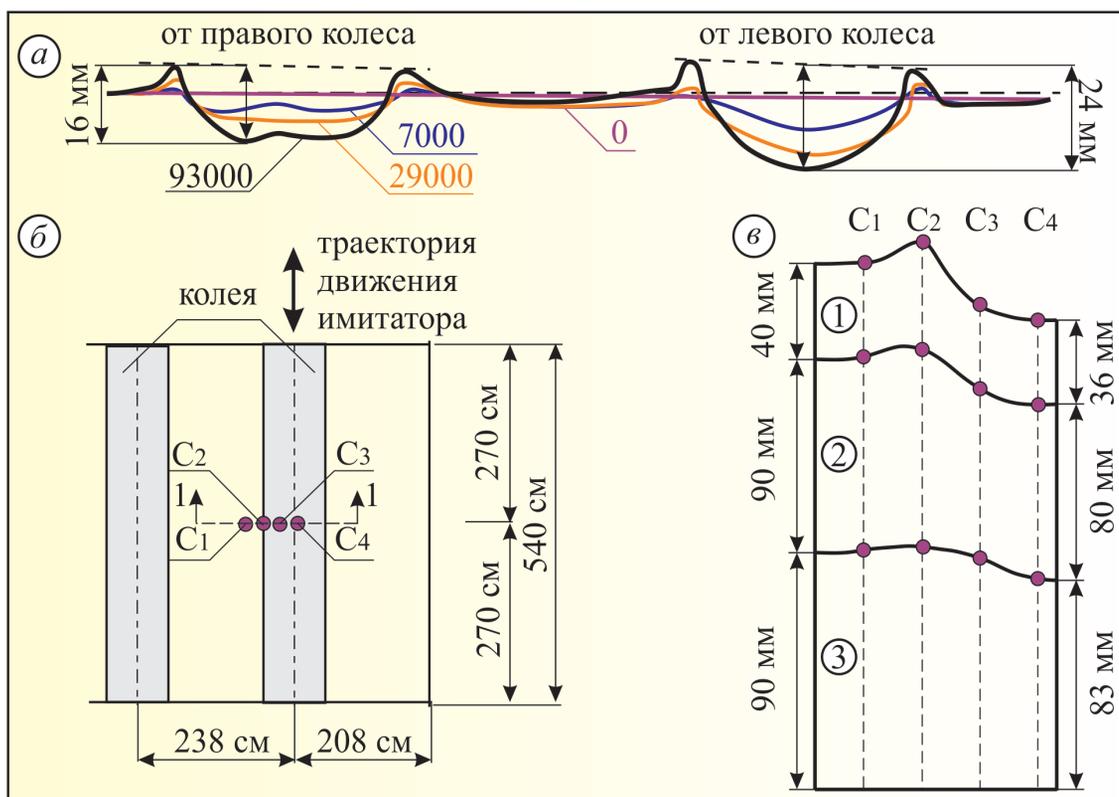


Рисунок 9 – Форма колеи и деформирование поверхностей слоев дорожных одежд из материалов, обработанных органическим вяжущим [48]:
а – история развития колеи от левого и правого колеса имитатора;
б – схема испытательного полигона и отбора кернов в местах $C_1 - C_4$;
в – схема деформирования слоев с указанием толщин в колее и за ее пределами

Figure 9 – Shape of the rut and deformation of the surfaces of the road pavements layers from materials treated with organic binder [48]:
а – history of rut development from left and right wheel simulator;
б – scheme of the test site and core drilling in places $C_1 - C_4$;
в – scheme of deformation of layers with the indication of thicknesses in a rut and beyond its limits

Данные рассмотренных нами экспериментов свидетельствуют о том, что слои из необработанных зернистых материалов нестабильны, а при передаче на земляное полотно сравнительно больших давлений его грунты способны накапливать большие деформации, составляющие значительную долю от глубины колеи на поверхности покрытия. Поэтому стабилизация зернистых материалов, например путем их обработки вяжущим, позволяет уменьшить интенсивность накопления деформаций.

На следующем этапе исследования нами выполнен анализ данных о накоплении деформаций в дорожной одежде капитального типа. Данные такого эксперимента приведены в работе [48], а его результаты на рисунке 9.

Испытания выполнены имитатором ALT LAVOC (Швейцария), ось которого снабжена двумя колесами с одной шиной. В качестве

критерия окончания испытания принята средняя глубина колеи 20 мм. Средняя глубина колеи определялась как среднеарифметическое значение глубин колеи от левого и правого колеса имитатора. Верхняя часть дорожной одежды включала слои из материалов, обработанных битумами различной вязкости, суммарной толщиной 22 см [48]. Подстилающий слой толщиной 28 см выполнен из песчано-гравийной смеси (0–60 мм), а земляное полотно из песка мелкого [48].

Анализируя данные рисунка 9, в несложно заметить, что суммарная деформация слоев, обработанных битумом от воздействия левого колеса имитатора, составила 21 мм, а общая глубина колеи 24 мм. Это соответствует данным рисунка 3, согласно которым деформации концентрируются в верхних слоях асфальтобетонных покрытий.



Рисунок 10 – Иллюстрация эксперимента:
а – общий вид опытной станции; б – фиксация номеров полос при проезде шин

Figure 10 – Illustration of the experiment:
а – general view of the experimental station; б – fixing lane numbers by the tires' passing

Анализируя этот рисунок, обратим внимание на боковые выпоры колеи в двух верхних слоях, свидетельствующие о деформации сдвига в материалах, обработанных битумом. Отметим, что температура слоев при их испытании составляла 40 °С, а нагрузка на колесо имитатора 45 кН. Глубина колеи достигла предельного значения после приложения 93 000 нагрузок. Отсюда следует, что применение материалов, обработанных битумом, требует анализа условий эксплуатации (по параметрам нагрузки и погодно-климатическим данным). В противном случае колея накачивается при сравнительно малом числе проходов.

Выполнив анализ многочисленных экспериментальных данных и проведя обследования колеи на улицах г. Омска (работы выполнялись ФГБОУ ВО «СибАДИ»), мы пришли к выводу о необходимости разработки конструктивных мероприятий, позволяющих выравнять значения накапливаемых деформаций в пределах полос наката и межколеином пространстве. В данном аспекте практический интерес представляет устройство скрытоколейных дорожных одежд¹¹.

Исследование необходимо начать с изучения характера распределения проходов шин по ширине полос движения. Для этого на эксплуатируемых дорогах с параметрами проезжей части, соответствующими требованиям СП 34.13330.2012,¹² организовывались опытные

станции. Суть эксперимента состояла в том, что на покрытие вдоль оси проезжей части наносятся продольные полосы, которые нумеруют в порядке возрастания от оси к кромке. Станция, организованная на автомобильной дороге Омск–Павлодар представлена на рисунке 10,а. На рисунке 10,б представлен момент проезда шин по пронумерованным сечениям.

Наблюдатель производил видеосъемку опытной станции, при помощи которой фиксировались номера полос, в пределах которых оказывались шины транспортного средства при его проезде через сечение дороги. Учету подлежали проходы шин грузовых автомобилей и автобусов. Этому обстоятельству служит то объяснение, что разрабатываемые нами конструктивные мероприятия предназначены для борьбы с колеей, обуславливаемой деформированием слоев оснований дорожных одежд из зернистых материалов и грунтов земляного полотна. При расчете таких деформаций расчетными являются нагрузки типа A_1 , A_2 и A_3 . Традиционно к данным расчетным нагрузкам одежд коэффициент приведения интенсивности движения легковых автомобилей принимается равным нулю. Поэтому в наших исследованиях распределение их проходов по ширине полосы движения не учитывалось. Тем не менее отметим, что для колеи износа воздействие шипованных шин легковых автомобилей является одним из наиболее значимых

¹¹ Фидловский Н.А. Скрытоколейные конструкции нежестких дорожных одежд внутрихозяйственных дорог колхозов и совхозов // автореф. ... канд. техн. наук. Москва: 1987. 16 с.

¹² СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85. Введен в действие 01.07.2013. – М.: Госстрой России, 2013. – 109 с.

факторов, и при разработке методов прогнозирования износа и мер борьбы с ним пренебрегать интенсивностью движения легковых автомобилей и ее распределением по ширине проезжей части нельзя. Однако специалисты в области трения и износа выделяют целый ряд разновидностей изнашивания контактирующих поверхностей. Поэтому разработка методики прогнозирования износа асфальтобетонного покрытия является сложной контактной задачей, требующей рассмотрения различных типов возможных износов и обоснования основного из них. Из этого следует, что для прогнозирования износа покрытия необходимо разработать принципиально новую методику приведения интенсивности движения легковых автомобилей и прочих транспортных средств к расчетной нагрузке.

Обработку результатов наблюдений по видеосъемке производили в камеральных условиях, фиксируя в ведомости номера полос, в пределах которых осуществлялся проезд шин. Данные учета распределения проходов шин приводили к проходам задней оси автомобиля, колеса которой снабжены спаренными шинами. При проезде такого автомобиля центр каждой шины оказывался в пределах строго определенной пронумерованной полосы. Для автомобилей с задней осью, снабженной шинами с одним баллоном для каждого ко-

леса, фиксировали по две пронумерованные полосы, в пределах которых осуществлялся проезд. Независимо от числа шин, которыми снабжены задние оси транспортных средств, проезд каждого автомобиля позволял выделить 4 пронумерованные полосы, воспринимающие нагрузку.

Транспортные средства, подлежащие изучению распределения проходов шин по ширине проезжей части, были разделены на три группы. Первую группу составляли тяжелые и очень тяжелые грузовые автомобили, седельные тягачи, самосвалы, автопоезда. Ко второй группе отнесены средние и легкие грузовые автомобили, а к третьей группе – автобусы.

На рисунке 11 приведены результаты экспериментальных исследований распределения проходов шин тяжелых грузовых автомобилей, самосвалов, седельных тягачей и автопоездов по ширине проезжей части автомобильной дороги II технической категории с осевой разметкой 1.5 или 1.6 и краевой разметкой 1.2.1 или 1.2.2.

Из анализа данных рисунка 11 следует, что основное число проходов шин расположено в пределах полос шириной 90 см, у которых наиболее нагруженными являются центральные части шириной по 30 см, воспринимающие до 80% воздействий шин от общего числа нагрузок.

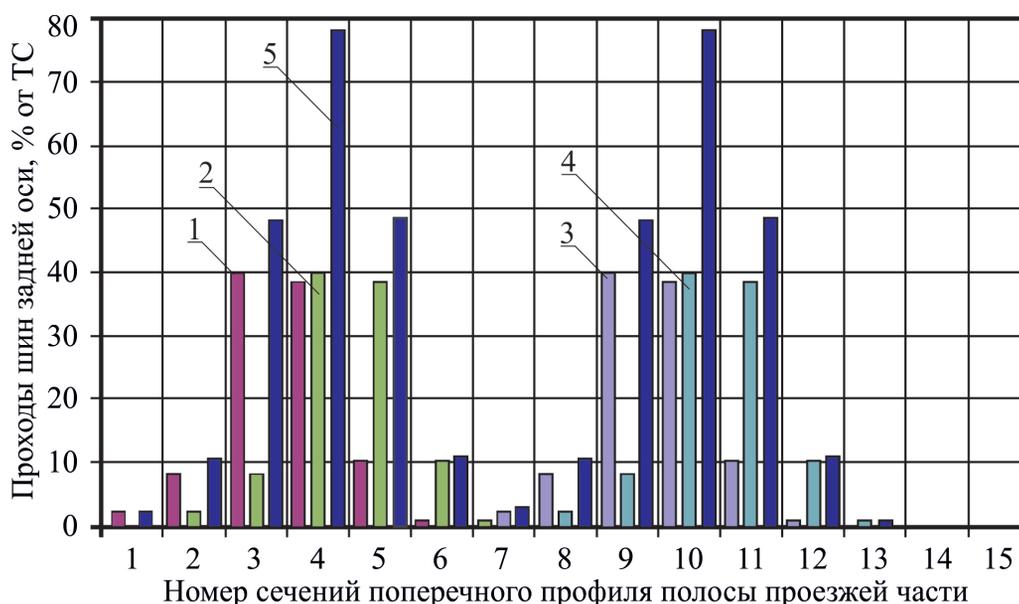


Рисунок 11 – Эпюры распределения проходов шин в пределах полосы движения дороги II технической категории: 1 и 2 – внешняя и внутренняя шина левого колеса; 3 и 4 – внутренняя и внешняя шина правого колеса; 5 – суммарная эпюра

Figure 11 – Plots of distribution of passes of tires within a lane of the road of the II technical category: 1 and 2 – external and internal bus of the left wheel; 3 and 4 – internal and external bus of the right wheel; 5 – total plot

Краевые части шириной по 30 см воспринимают до 50% воздействий шин каждая. В межколеином пространстве реализуется 20% воздействий шин от каждого колеса.

Эпюры распределения проходов шин на рисунке 11 представлены в форме эмпирического дискретного распределения, но их можно обработать методами математической статистики, подобрав теоретический закон распределения проходов для каждой шины. В этом случае распределение будет непрерывным.

Авторы считают возможным выполнять подсчет количества нагрузок при помощи поправочных коэффициентов, задаваемых эмпирическим распределением, подобным распределению, представленному на рисунке 11 (суммарная эпюра). Такие данные можно применять для прогнозирования глубины колеи, причем они пригодны для использования в любом известном методе расчета. Это подтверждается тем, что эмпирические, механико-эмпирические и аналитические методы прогнозирования глубины колеи, независимо от типа математического аппарата, использованного при их разработке, содержат функцию числа нагрузок.

Методы определения числа расчетных нагрузок многократно модифицировались. В результате в инструкциях по проектированию дорожных одежд нежесткого (ВСН 46-72¹³, ВСН 46-83¹⁴, ОДН 18.046-01¹⁵) и жесткого типов (ВСН 197-83¹⁶, ВСН 197-91¹⁷ и ОДМ¹⁸) появились новые модифицированные формулы, заменяющие предыдущую методику расчета. Ориентируясь на зависимости ОДН 218.046-01, формулы для расчета суммарного числа приложения нагрузок в различных сечениях поперечного профиля полосы движения дадим в виде

$$\sum N_p = f_n \cdot \sum_{m=1}^n (N_{1m} \cdot K_c \cdot T_{\text{ргд}} \cdot 0,7) \cdot S_{mc} \cdot k_n \cdot k_{mi},$$

где f_n – коэффициент, учитывающий число полос движения и распределение движения по

ним; n – общее число различных марок транспортных средств в составе транспортного потока; N_{1m} – суточная интенсивность движения автомобилей марки m в первый год службы (в обоих направлениях), авт/сут m ; $S_{\text{тс}}$ – суммарный коэффициент приведения воздействия на дорожную одежду транспортного средства марки t к расчетной нагрузке; $T_{\text{ргд}}$ – расчетное число расчетных дней в году, соответствующих определенному состоянию деформируемости конструкции; K_c – коэффициент суммирования; k_n – коэффициент, учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого; k_{mi} – введенный нами коэффициент распределения проходов шин автомобилей марки m по ширине полосы движения, определяющий их долю в центре i -го сечения, пронумерованного при эксперимента (рисунок 10, а).

Величина введенного нами коэффициента распределения проходов шин меньше 1. Поэтому в любом сечении, выделенном в пределах ширины полосы движения, суммарное число приложения расчетных нагрузок меньше, чем по нормативному документу.

В каждом сечении, выделенном в пределах ширины полосы движения, суммарное число приложения нагрузок индивидуально, поэтому поверхность поперечного профиля испытывает неодинаковые остаточные деформации по ширине. Отсюда возникает идея о повышении однородности деформирования дорожной одежды в пределах полосы движения за счет устройства неравнопрочной по ширине конструкции.

Для таких условий Н.А. Фидловский¹⁹ предложил скрытоколейную конструкцию дорожной одежды. В этой конструкции основание из щебня в пределах полос наката укреплено битумом по способу пропитки. Конструкция имеет ограничения, связанные с тем, что способ пропитки позволяет устраивать слой толщиной не более 8 см. Такое усиление основания подходит для ограниченного числа приложения нагрузок.

¹³ Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46-72.– М. : Транспорт, 1973, – 110 с.

¹⁴ Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46-83.– М. : Транспорт, 1985. – 157 с.

¹⁵ Проектирование нежестких дорожных одежд. ОДН 218-046-01.– М. : ГСДХ Минтранса России, 2001. – 146 с.

¹⁶ Инструкция по проектированию жестких дорожных одежд. ВСН 197-83.– М. : Минтрансстрой, 1984. – 129 с.

¹⁷ Инструкция по проектированию жестких дорожных одежд. ВСН 197-91.– М. : Союздорнии, 1992. – 130 с.

¹⁸ ОДМ Методические рекомендации по проектированию жестких дорожных одежд. – М. : Росавтодр, 2004.

¹⁹ Фидловский Н.А. Скрытоколейные конструкции нежестких дорожных одежд внутрихозяйственных дорог колхозов и совхозов // автореф.... канд. техн. наук. Москва: 1987. 16 с.

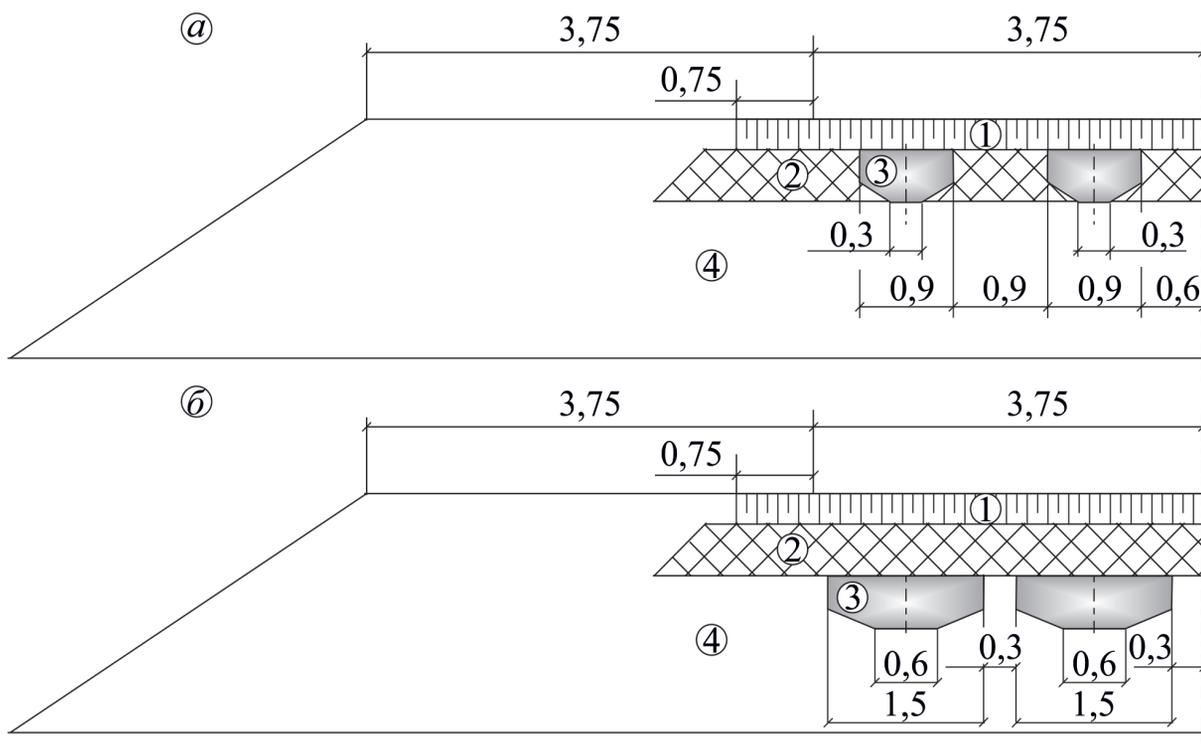


Рисунок 12 – Скрытоколеиные дорожные одежды для дороги II технической категории:
а – с устройством скрытоколеиного элемента в основании из зернистых материалов;
б – с устройством скрытоколеиного элемента в земляном полотне;
1 – слой покрытия и основания из материалов, обработанных органическим вяжущим;
2 – слой из зернистых материалов; 3 – скрытоколеиный элемент из материала или грунта, обработанного вяжущим; 4 – земляное полотно

Figure 12 – Concealed rut road pavements for road II technical category:
а – with the device hidden knee element in the base of granular materials;
б – with the device of the hidden rut element in the highway subgrade;
1 – coating and base layer of materials treated with organic binder;
2 – layers of granular materials; 3 – hidden knee element of the material or soil treated with a binder;
4 – subgrade

По мнению авторов, более эффективны скрытоколеиные элементы, устраиваемые в траншеях, нарезанных в основании из зернистого материала или грунте земляного полотна. Современная техника позволяет разрабатывать траншеи с различным поперечным профилем, а доработка траншеи по шаблону позволяет добиваться полного копирования формы скрытоколеиного элемента, рассчитанного при проектировании. Поэтому мы предлагаем две разновидности конструкций дорожных одежд, включающих в себя скрытоколеиные элементы неодинаковой толщины по ширине полосы наката. Форма поперечного сечения скрытоколеиного элемента может быть задана в виде трапеции, что показано на

рисунке 12. На этом рисунке приведены две конструкции, направленные на уменьшение глубины поверхностной колеи (рисунок 12, а) и глубинной колеи (рисунок 12, б).

Конструкция, представленная на рисунке 12,б разработана нами давно²⁰, но в первоначальном варианте ширина скрытоколеиного поверху составляла 90 см, а ширина центральной части понизу 30 см. Выполненные исследования по измерению ширин деформированных поверхностей земляного полотна потребовали увеличения ширин скрытоколеиных элементов на земляном полотне. Конструкция, показанная на рисунке 1,а, является модификацией конструктивного решения Н.А. Фидловского, она приведена впервые.

²⁰ Александров А.С. Скрытоколеиные дорожные одежды и особенности их проектирования // «Совершенствование организации и технологии ремонта и содержания автомобильных дорог» Сб. науч. трудов СибАДИ, 2001, С. 115–123.

Спецификой наших предложений является то, что в центральной части полосы наката, в которой глубина колеи равнопрочной по ширине дорожной одежды имеет максимальную глубину, скрытоколейный элемент имеет наибольшую толщину. В этих сечениях толщина элемента рассчитывается при величине коэффициента распределения проходов шин $k_{mi}=0,8$. В краевых частях скрытоколейных элементов расчет их толщины выполняется при величине коэффициента – $k_{mi}=0,5$. Для проверки достаточности толщины дорожной одежды в межколейном пространстве значение коэффициента – $k_{mi}=0,2$. Здесь отметим принципиальное отличие нашего предложения от конструкции Н.А. Фидловского. Идея Н.А. Фидловского направлена на усиление зернистого основания в пределах полос наката. Эта идея основана на том, что щебеночное основание дорожной одежды, рассчитанной по всем правилам нормативного метода, усиливается по методу пропитки по полосам наката. В данном случае происходит некоторое увеличение материалоемкости дорожной конструкции за счет пропитки битумом, которого при нормативном расчете на прочность не требуется. Наше предложение состоит в том, что дорожная одежда со скрытоколейными элементами рассчитывается при трех различных числах суммарных приложений нагрузки. Эти суммарные числа приложения расчетных нагрузок составляют: для межколейного пространства 20% от числа расчетных нагрузок по нормативной методике, для центральных и краевых частей полос наката соответственно 80% и 50%. В этом случае материалоемкость конструкции уменьшается, а за счет выравнивая величин деформаций поверхностей слоев по их ширине глубина колеи уменьшается. Безусловно, что при таком расчете все условия прочности и морозостойкости, регламентируемые нормативным документом, должны удовлетворяться.

Усиление слоев основания из зернистых материалов (см. рисунок 12,а) направлено на предотвращение деформаций сдвига в этом конструктивном элементе. Такое усиление может быть применено при деформировании поверхности покрытия, показанном на рисунке 3,а,б. Эта же конструкция может быть применена для уменьшения материалоемкости дорожных одежд с многослойным толстым асфальтобетонным покрытием, накапливающим деформации в верхних асфальтобетонных слоях (см. рисунок 3,в,г). В этом случае скрытоколейный элемент можно выполнить из

асфальтобетонной смеси, получив после его перекрытия одним или двумя слоями асфальтобетона с одинаковой толщиной по ширине, большую суммарную толщину асфальтовых слоев только в пределах полосы наката, а в межколейном пространстве толщина таких слоев будет соответствовать облегченному или переходному типу дорожной одежды. В данных конструкциях ширина скрытоколейного элемента поверху принимается 90 см, то есть она равна ширине полосы наката в наиболее деформируемой части. Ширина особенно толстой части элемента понизу составляет 30 см, то есть она равна ширине полосы наката с наибольшим числом повторных нагрузок.

Скрытоколейные элементы в земляном полотне имеют ширину поверху 1,5 м, а ширина наиболее толстой части элемента понизу составляет 60 см. В этом случае учитывается распределяющая способность дорожной одежды, то есть ее способность перераспределять нагрузку на площадь, возрастающую по глубине. Грунт земляного полотна, расположенный между скрытоколейными элементами испытывает благоприятное напряженно-деформированное состояние, близкое к компрессионному сжатию. Такое состояние возникает в результате близкого расположения элементов друг от друга на расстоянии 30 см (см. рисунок 12,б). В результате этого грунт между скрытоколейными элементами работает в условиях существенного ограничения боковых деформаций, поэтому увеличение ширины скрытоколейных элементов и ее фактическая увязка с распределяющей способностью дорожной одежды нецелесообразны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В первой части статьи выявлены причины возникновения колеи на асфальтобетонных покрытиях нежестких дорожных одежд. При этом показано, что за исключением участков торможения, наибольший вклад в глубину колеи вносят деформации слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна. В местах кратковременных стоянок автобусов глубина колеи, обусловленных деформированием слоев дорожной одежды и земляного полотна, существенно выше глубин колеи на участке с обычным режимом движения. Следовательно, актуальность работ, направленных на разработку конструктивных мероприятий борьбы с глубиной колеей нами доказана.

Поэтому в заключение ограничимся достоинствами и недостатками предложенных нами

конструкций, обозначив круг задач для дальнейших исследований.

Обе предлагаемые конструкции обладают двумя преимуществами, они уменьшают материалоемкость дорожной одежды и повышают однородность деформирования дорожной одежды по ширине полос движения, тем самым способствуя уменьшению глубины колеи.

В результате близкого расположения скрытоколейных элементов друг от друга грунт земляного полотна между ними испытывает компрессионное сжатие, при котором девиатор напряжений имеет наименьшее значение по сравнению с другими напряженными состояниями земляного полотна, обусловленными трехосным сжатием, возникающим как от подвижной нагрузки, так и от собственного веса дорожной одежды. Это способствует существенному снижению деформаций в грунте.

В качестве недостатка отметим повышенную трудоемкость устройства элемента дорожной одежды со скрытоколейными элементами, но они могут устраиваться с применением средств механизации. Возможность механизации работ по устройству скрытоколейных элементов делает эти конструкции реальными в обозримой перспективе, поэтому необходимо поставить задачи, решение которых позволит внедрять скрытоколейные дорожные конструкции в строительстве.

Для успешного внедрения скрытоколейных дорожных одежд необходимо:

– разработать новую или обоснованно выбрать известную методику расчета глубины колеи, которая необходима для проверки критерия колееобразования при расчете толщин скрытоколейных элементов и толщины дорожной одежды;

– установить значения коэффициентов приведения транспортных нагрузок к расчетной нагрузке для всех типов транспортных средств. Это позволит более точно определять суммарный коэффициент приведения $S_{\text{тс}}$ в формуле, а значит, повысится достоверность вычисления суммарного числа приложения расчетных нагрузок и надежность расчета скрытоколейных дорожных одежд.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новизенцев В.В., Оськин Д.В. Скорость, дорожные условия и безопасность движения // Наука и техника в дорожной отрасли. 2007. № 3. С. 7–10.

2. Александров А.С., Александрова Н.П., Семенова Т.В. Критерии проектирования шероховатых асфальтобетонных покрытий из условия обе-

спечения безопасности движения // Известия вузов. Строительство. 2009. № 2. С. 66–73.

3. Кириллов А.М. Учет скорости движения транспортных средств в расчетах нежестких дорожных одежд // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. №8 (119). С. 959–972.

4. Berthelot C., Crockford B., Lytton R. Comparison of alternative test methods for predicting asphalt concrete rut performance // Canadian Technical Asphalt Association Proceedings. Canada. 1999. Vol. XLVL. P. 405–434.

5. Zheng, J.; Huang, T. Study on triaxial test method and failure criterion of asphalt mixture // J. Traffi Transp. Eng. 2015. No 2. P. 93–106.

6. Werkmeister S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions // Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany. 2003. 189 p.

7. Александров А.С. Пластическое деформирование гранодиоритового щебня и песчано-гравийной смеси при воздействии трехосной циклической нагрузки / Инженерно-строительный журнал. 2013. №4. С. 22–34.

8. Галдина В.Д. Серобитумные вяжущие. Омск: Изд-во СибАДИ, 2011. 124 с.

9. Прокопец В.С., Т.Л. Иванова. Модификация дорожного асфальтобетона резиновыми порошками механоактивационного способа получения. Омск: Изд-во СибАДИ, 2012. 116 с.

10. Лыткин А.А. Влияние повторного уплотнения и транспортных нагрузок на характер твердения белитового шлама в слоях дорожных одежд // Вестник СибАДИ. 2017. № 3 (55). С. 125–132.

11. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Влияние удобоукладываемости асфальтобетонной смеси на энергоемкость процесса уплотнения // Строительные и дорожные машины. 2002. № 1. С. 14–16.

12. Завьялов М.А. Закономерности остывания асфальтобетонного слоя и их связь с продолжительностью процесса уплотнения // Механизация строительства. 2004. №2. С. 17–18.

13. Завьялов М.А. Термодинамическая теория жизненного цикла дорожного асфальтобетонного покрытия. Омск: Изд-во СибАДИ, 2007. 283 с.

14. Герцог В.Н., Долгих Г.В., Кузин Н.В. Расчет дорожных одежд по критериям ровности. Часть 1. Обоснование норм ровности асфальтобетонных покрытий // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 5 (57). С. 45–57.

15. Матуа В.П., Панасюк Л.Н. Прогнозирование и учет накопления остаточных деформаций в дорожных конструкциях. Ростов на/Д: РГСУ. 2001. 372 с.

16. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Aleksandrova N.P. Analysis of permanent deformations in granular materials of road structures // Roads and Bridges. 2016. Vol.15. No 4. P. 271–284.

17. Niemunis A., Wichtmann T. Separation of time scale in the HCA model for sand // Acta Geophysica. 2014. Vol. 62. No 5. P. 1127–1145.

18. Wichtmann T., Niemunis A., Triantafyllidis T. Strain accumulation in sand due to drained cyclic

loading: on the effect of monotonic and cyclic preloading (Miner's rule) // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2010. Vol. 30. No 8. P. 736–745.

19. Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L. 2017. Analysis and modeling of process of residual deformations accumulation in soils and granular materials // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2017) 012004*.

20. Sweere G.T.H. Unbound granular bases for roads // PhD Thesis. Netherlands. Delft University of Technology. 1990. 127 p.

21. Wolff H., Visser, A.T., Incorporating elasto-plasticity in granular layer pavement design // *Transportation Engineering*. 1994. Vol. 105. P. 259–272.

22. Lekarp F., A. Dawson. Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials // *Construction and building materials*. 1998. Vol. 12. No1. P. 9–18.

23. Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Ignatov V.F. Kalinin A.L. 2018. The application of the principles of the theory of shakedown to the calculation of pavement layers of granular materials in shear // *MATEC Web of Conferences*. Vol. 239. 05019.

24. Su. K., Sun L.J., Hachiya Y. Rut Prediction for Semi-rigid Asphalt Pavements // *First International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices*. China, Beijing. 2008. P. 486–491.

25. Sousa J.B., Craus J., Monismith C. L. Summary report on permanent deformation on asphalt concrete // SHRP-A-318, Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington D.C., 1994. P. 40–60.

26. Eisenmann J., Hilmer A. Influence of wheel load and inflation pressure on the rutting effect at asphalt pavement experiments and theoretical investigations // *Proceedings of the sixth international conference on the structural design of asphalt pavements*. 1987. P. 392–403.

27. Brunette B.E., Lundy J.R. Use and Effects of Studded Tires on Oregon Pavements // *Transportation Research Record 1536*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1996. P. 64–72.

28. Odermatt, N., Janoo, V., Magnusson, R. Analysis of Permanent Deformation in Subgrade Material Using a Heavy Vehicle Simulator // *Proceedings of the First International Conference on Accelerated Pavement Testing*, Reno, Nevada. 1999.

29. Myers L.A. Drakos C., Roque R. The combined effects of tire contact stresses and environment on surface rutting and cracking performance // *Proceedings of the ninth international conference on asphalt pavements*. Denmark, Copenhagen. 2002.

30. Steven B.D. The development and verification of a pavement response and performance model for unbound granular pavements // PhD Thesis. New Zealand. University of Canterbury. 2005. 291 p.

31. Zornberg J.G., Gupta R. Geosynthetics in pavements: North American contributions // *Geosynthetics*

in pavements: North American contributions // 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010. P. 379–398.

32. Balay J.M., Kerzreho J.P. Assessment of French design method for flexible pavement by mean of the LCPC. ALT facility // 3rd International Conference APT'08. Madrid, Spain, 1–3 October, 2008.

33. Erlingsson S., Ingason Th. Performance of two thin pavement structures during Accelerated Pavement Testing using a Heavy Vehicle Simulator // 2nd Int. Conf. on Accelerated Pavement Testing. University of Minnesota. 2004. 19 p.

34. Harvey, J.T. at all. Caltrans Partnered Pavement Research Program (PPRC) Summary Report: Four Year Period: 2000–2004, Report No: UCPRC-SR-2006-02, UCPRC, Davis, Calif., 2007. 96 p.

35. Khazanovich, L., Yut, I., Tompkins, D. The Second Generation of Minnesota Accelerated Loading Facility – Minne-ALF-2. // *Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Pavements*, Colorado Springs, Colo., Aug. 14–18, 2005.

36. Monismith, C. at all. Ten Year Perspective on Accelerated Pavement Testing; Caltrans Partnered Pavement Research Program, // *Proceedings of the 2nd International Conference on Accelerated Pavement Testing*, Minneapolis, Minn., Sep. 26–29, 2004.

37. Stokoe, K.H. at all. Super-Accelerated Testing of a Flexible Pavement with the Stationary Dynamic Deflectometer (SDD) // *Transportation Research Record 1716*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000, P. 98–107.

38. White Th.D., Haddock J.E., Hand A. J.T. Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements // *National Cooperative Highway Research Program*. NCHRP Report No 468. Washington, D.C., 2002. 151 p.

39. Dawson A., Kolisoja P. Permanent deformation // Report on task 2.1. University OF Nottingham and Tampere University of Technology. 2007. 47 p.

40. Parker F., Brown E.R. A Study of Rutting of Alabama Asphalt Pavements. // Alabama Department of Transportation, final report for Project 2019-09, Bureau of Research and Development, Montgomery, Alabama. November 1993.

41. Sargand S.M., Young B.A., Khoury I.S., Wasniak D L., Goldsberry B.M. Final Report on Forensic Study for Section 390101 of Ohio SHRP US 23 Test Pavement // Ohio Department of Transportation and Federal Highway Administration. Columbus, Ohio. February 1998.

42. Chen D.-H., Bilyeu J., Murphy M., Walker D. Comparison of Rut-Depth Measurements // draft of a paper submitted to the Transportation Research Board for consideration for presentation and publication at the 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D.C., by the Texas Department of Transportation, Austin, Texas. July 2000.

43. Радовский Б.С. Концепция вечных дорожных одежд. / Б.С. Радовский // *Дорожная техника*. 2011. № 11. С. 132–144.

44. Александров А.С., Калинин А.Л. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 1. Учет деформаций в условии пластичности Кулона — Мора // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 7 (59). С. 4–17.

45. Александрова Н.П., Чусов В.В. Особенности расчета асфальтобетонных покрытий по сопротивлению сдвигу с учетом накопления повреждений // Вестник СибАДИ. 2016. № 3 (49). С. 42–50.

46. Dawley C.B., Hogewiede B.L., Anderson K.O. Mitigation of Instability Rutting of Asphalt Concrete Pavements in Lethbridge, Alberta, Canada. // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 59, Association of Paving Technologists, St. Paul, Minnesota. 1990. P. 481–508.

47. Lenngren C.A. Some Approaches in Treating Automatically Collected Data on Rutting. // Transportation Research Record 1196, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1988.

48. Blab R., Kappl K., Lackner R., Aigner E. Permanent deformation of bituminous bound materials in flexible pavements. Evaluation of test methods and prediction models // Samaris D28. 2006. Vol. 1. 144 p.

REFERENCES

1. Novizencev V.V., Os'kin D.V. Skorost', dorozhnye usloviya i bezopasnost' dvizheniya [Speed, road conditions and traffic safety] // Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli, 2007; 3: 7–10 (in Russian).

2. Aleksandrov A.S., Aleksandrova N.P., Semenova T.V. Kriterii proektirovaniya sherohovatykh asfal'tobetonnykh pokrytij iz usloviya obespecheniya bezopasnosti dvizheniya [Criteria for the design of rough asphalt pavements from the conditions of ensuring traffic safety] // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo, 2009; 2: 66–73 (in Russian).

3. Kirillov A.M. Uchet skorosti dvizheniya transportnykh sredstv v raschetah nezhestkih dorozhnykh odezhd [Accounting for vehicle speed in non-rigid pavement calculations] // Vestnik MGSU, 2018; T.13; 8 (119): 959–972 (in Russian).

4. Berthelot C., Crockford B., Lytton R. Comparison of alternative test methods for predicting asphalt concrete rut performance // Canadian Technical Asphalt Association Proceedings. Canada, 1999, Vol. XLVL: 405–434.

5. Zheng, J.; Huang, T. Study on triaxial test method and failure criterion of asphalt mixture // J. Traffic Transp. Eng. 2015, 2: 93–106.

6. Werkmeister S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions // Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany, 2003: 189 p.

7. Aleksandrov A.S. Plasticheskoe deformirovanie granodioritovogo shchebnya i peschano-gravijnoj smesi pri vozdeystvii trekhosnoj ciklicheskoj nagruzki [Plastic deformation of granodiorite crushed stone and sand-gravel mixture under the action of a triaxial cyclic load] // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal, 2013, 4: 22–34 (in Russian).

8. Galdina V.D. Serobitumnye vyazhushchie [Gray-bituminous binders]. Omsk: Izd-vo SibADI, 2011:124 p. (in Russian).

9. Prokopec V.S., T.L. Ivanova. Modifikaciy dorozhnogo asfal'tobetona rezinovymi poroshkami mekhanoaktivacionnogo sposoba polucheniya [Modification of road asphalt concrete with rubber powders of the mechanical activation method for producing]. Omsk: Izd-vo SibADI, 2012: 116 p. (in Russian).

10. Lytkin A.A. Vliyanie povtornogo uplotneniya i transportnykh nagruzok na karakter tverdeniya belitovogo shlama v sloyah dorozhnykh odezhd [The effect of re-compaction and transport loads on the nature of hardening of belitic sludge in the layers of pavements] // Vestnik SibADI, 2017, 3 (55): 125–132 (in Russian).

11. Zav'yalov M.A., Zav'yalov A.M. Vliyanie udoboukladyvaemosti asfal'tobetonnoj smesi na energoemkost' processa uplotneniya [Effect of workability of asphalt mix on the energy intensity of the compaction process] // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny, 2002, 1: 14–16 (in Russian).

12. Zav'yalov M.A. Zakonomernosti ostyvaniya asfal'tobetonnoy sloya i ih svyaz' s prodolzhitel'nost'yu processa uplotneniya [Patterns of cooling of the asphalt concrete layer and their relations with the duration of the compaction process] // Mekhanizatsiya stroitel'stva, 2004, 2: 17–18 (in Russian).

13. Zav'yalov M.A. Termodinamicheskaya teoriya zhiznennogo cikla dorozhnogo asfal'tobetonnoy pokrytiya [Thermodynamic theory of the life cycle of asphalt pavement] Omsk: Izd-vo SibADI, 2007: 283 p. (in Russian).

14. Gercog V.N., Dolgih G.V., Kuzin N.V. Raschet dorozhnykh odezhd po kriteriyam rovnosti. Chast' 1. Obosnovanie norm rovnosti asfal'tobetonnykh pokrytij [Calculation of pavement according to evenness criteria. Part 1. Justification of the evenness standards of asphalt concrete pavements] // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal, 2015, 5 (57): 45–57 (in Russian).

15. Matua V.P., Panasyuk L.N. Prognozirovanie i uchet nakopleniya ostatocnykh deformacij v dorozhnykh konstrukciyah [Prediction and accounting for the accumulation of residual deformations in road structures]. Rostov-na-Donu: RGSU, 2001: 372 p. (in Russian).

16. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Aleksandrova N.P. Analysis of permanent deformations in granular materials of road structures // Roads and Bridges, 2016, Vol.15, 4: 271–284.

17. Niemunis A., Wichtmann T. Separation of time scale in the HCA model for sand // Acta Geophysica, 2014, Vol. 62, 5: 1127–1145.

18. Wichtmann T., Niemunis A., Triantafyllidis T. Strain accumulation in sand due to drained cyclic loading: on the effect of monotonic and cyclic preloading (Miner's rule) // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, Vol. 30, 8: 736–745.

19. Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L. (2017) Analysis and modeling of process of

residual deformations accumulation in soils and granular materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2017): 012004.

20. Sweere G.T.H. Unbound granular bases for roads // PhD Thesis. Netherlands. Delft University of Technology, 1990: 127 p.

21. Wolff H., Visser, A.T., Incorporating elasto-plasticity in granular layer pavement design // Transportation Engineering, 1994, 105: 259–272.

22. Lekarp F., A. Dawson. Modelling permanent deformation behaviour of unbound granular materials // Construction and building materials, 1998, Vol. 12, 1: 9–18.

23. Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Ignatov V.F. Kalinin A.L. (2018) The application of the principles of the theory of shakedown to the calculation of pavement layers of granular materials in shear // MATEC Web of Conferences. Vol. 239: 05019.

24. Su, K., Sun L.J., Hachiya Y. Rut Prediction for Semi-rigid Asphalt Pavements // First International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices. China, Beijing, 2008: 486–491.

25. Sousa J.B., Craus J., Monismith C. L. Summary report on permanent deformation on asphalt concrete // SHRP-A-318, Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington D.C., 1994: 40–60.

26. Eisenmann J., Hilmer A. Influence of wheel load and inflation pressure on the rutting effect at asphalt pavement experiments and theoretical investigations // Proceedings of the sixth international conference on the structural design of asphalt pavements, 1987: 392–403.

27. Brunette B.E., Lundy J.R. Use and Effects of Studded Tires on Oregon Pavements // Transportation Research Record 1536, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1996: 64–72.

28. Odermatt, N., Janoo, V., Magnusson, R. Analysis of Permanent Deformation in Subgrade Material Using a Heavy Vehicle Simulator // Proceedings of the First International Conference on Accelerated Pavement Testing, Reno, Nevada, 1999.

29. Myers L.A. Drakos C., Roque R. The combined effects of tire contact stresses and environment on surface rutting and cracking performance // Proceedings of the ninth international conference on asphalt pavements. Denmark, Copenhagen, 2002.

30. Steven B.D. The development and verification of a pavement response and performance model for unbound granular pavements // PhD Thesis. New Zealand. University of Canterbury, 2005: 291 p.

31. Zornberg J.G., Gupta R. Geosynthetics in pavements: North American contributions Geosynthetics in pavements: North American contributions // 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010: 379–398.

32. Balay J.M., Kerzreho J.P. Assessment of French design method for flexible pavement by mean of the LCPC. ALT facility // 3rd International Conference APT'08. Madrid, Spain, 1–3 October, 2008.

33. Erlingsson S., Ingason Th. Performance of two thin pavement structures during Accelerated Pavement Testing using a Heavy Vehicle Simulator // 2nd Int. Conf. on Accelerated Pavement Testing. University of Minnesota, 2004: 19 p.

34. Harvey, J.T. at all. Caltrans Partnered Pavement Research Program (PPRC) Summary Report: Four Year Period: 2000–2004, Report No: UCPRC-SR-2006-02, UCPRC, Davis, Calif., 2007: 96 p.

35. Khazanovich, L., Yut, I., Tompkins, D. The Second Generation of Minnesota Accelerated Loading Facility – Minne-ALF-2. // Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Pavements, Colorado Springs, Colo., Aug. 14–18, 2005.

36. Monismith, C. at all. Ten Year Perspective on Accelerated Pavement Testing; Caltrans Partnered Pavement Research Program, // Proceedings of the 2nd International Conference on Accelerated Pavement Testing, Minneapolis, Minn., Sep. 26–29, 2004.

37. Stokoe, K.H. at all. Super-Accelerated Testing of a Flexible Pavement with the Stationary Dynamic Deflectometer (SDD) // Transportation Research Record 1716, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000: 98–107.

38. White Th.D., Haddock J.E., Hand A. J.T. Contributions of Pavement Structural Layers to Rutting of Hot Mix Asphalt Pavements // National Cooperative Highway Research Program. NCHRP Report No 468. Washington, D.C., 2002: 151 p.

39. Dawson A., Kolisoja P. Permanent deformation // Report on task 2.1. University OF Nottingham and Tampere University of Technology, 2007: 47 p.

40. Parker F., Brown E.R. A Study of Rutting of Alabama Asphalt Pavements. // Alabama Department of Transportation, final report for Project 2019-09, Bureau of Research and Development, Montgomery, Alabama. November, 1993.

41. Sargand S.M., Young B.A., Khoury I.S., Wasniak D L., Goldsberry B.M. Final Report on Forensic Study for Section 390101 of Ohio SHRP US 23 Test Pavement // Ohio Department of Transportation and Federal Highway Administration. Columbus, Ohio. February, 1998.

42. Chen D.-H., Bilyeu J., Murphy M., Walker D. Comparison of Rut-Depth Measurements // draft of a paper submitted to the Transportation Research Board for consideration for presentation and publication at the 80th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D.C., by the Texas Department of Transportation, Austin, Texas. July, 2000.

43. Radovskij B.S. Konceptiya vechnyh dorozhnyh odezhd. / B.S. Radovskij // Dorozhnaya tekhnika, 2011, 11: 132–144 (in Russian).

44. Aleksandrov A.S., Kalinin A.L. Sovershenstvovanie rascheta dorozhnyh konstrukcij

po soprotivleniyu sdvigu. Chast' 1. Uchet deformacij v uslovii plastichnosti Kulona — Mora // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal, 2014, 7 (59): 4–17 (in Russian).

45. Aleksandrova N.P., Chusov V.V. Osobennosti rascheta asfal'tobetonnyh pokrytij po soprotivleniyu sdvigu s uchedom nakaplivaniya povrezhdenij // Vestnik SibADI, 2016, 3 (49): 42–50 (in Russian).

46. Dawley C.B., Hogewiede B.L., Anderson K.O. Mitigation of Instability Rutting of Asphalt Concrete Pavements in Lethbridge, Alberta, Canada // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 59. Association of Paving Technologists, St. Paul, Minnesota, 1990: 481–508.

47. Lenngren C.A. Some Approaches in Treating Automatically Collected Data on Rutting. // Transportation Research Record 1196, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1988.

48. Blab R., Kappl K., Lackner R., Aigner E. Permanent deformation of bituminous bound materials in flexible pavements. Evaluation of test methods and prediction models // Samaris D28, 2006, 1: 144 p.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Александров А.С. – Разработка скрытоколейных конструкций дорожных одежд с усиливающими элементами переменной толщины, выполнение экспериментальных исследований распределения проходов шин по ширине полос движения проезжей части автомобильных дорог, обработка данных эксперимента. Сбор и анализ информации об экспериментальном изучении остаточных, накапливаемых слоями дорожных одежд и грунтами земляного полотна. Написание введения и заключения.

Семенова Т.В. – Учет и регистрация проходов шин транспортных средств в пределах сечений, выделенных на полосах движения автомобильных дорог, необходимых при выполнении экспериментальных исследований по изучению распределения проходов шин по ширине полос движения проезжей части. Проверка статьи.

Калинин А.Л. – Вычисление остаточных деформаций, накапливаемых конструктивными слоями дорожной одежды и грунтом земляного полотна при обработке экспериментальных данных. Определение вклада слоев дорожной и грунтов земляного полотна в глубину колеи, образующуюся на поверхности покрытия дорожной одежды.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Anatoliy S. Aleksandrov – development of hidden rut structures of road pavements with reinforcing elements of variable thickness; experimental studies of the distribution of tire passes over the width of the lanes of the roadway; processing of experimental data; collection and analysis of information on the

experimental study of residual accumulated layers of pavements and soils of the highway subgrade; formulation of further research; writing the introduction and conclusion.

Tatiana V. Semenova – accounting and registration of vehicle tire passes within the sections allocated to the coasting strip and necessary for the implementation of experimental studies to study the distribution of traffic way over the width of the roadway traffic lanes; checking the article.

Aleksandr L. Kalinin – calculation of residual deformations accumulated by structural layers of road pavement and soil of the highway subgrade during the processing of experimental data; determination of the contribution of layers of road pavements and soil of the highway subgrade to the depth of the rut formed on the surface of road pavements.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александров Анатолий Сергеевич – канд. техн. наук, доц., кафедра «Строительство и эксплуатация дорог», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), ORCID 0000-0003-2009-5361 (644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5, e-mail: aleksandrov00@mail.ru),

Семенова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доц., кафедра «Строительство и эксплуатация дорог», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), ORCID 0000-0002-1921-8531 (644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5, e-mail: stv8@yandex.ru),

Калинин Александр Львович – ст. преподаватель, кафедра «Строительство и эксплуатация дорог», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), ORCID 0000-0003-0291-2022 (644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5, e-mail: a1exsandr55ne@mail.ru)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoliy S. Aleksandrov – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of the Road Construction and Operation, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), ORCID 0000-0003-2009-5361 (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: aleksandrov00@mail.ru).

Tatiana V. Semenova – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of the Road Construction and Operation, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), ORCID 0000-0002-1921-8531 (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: stv8@yandex.ru).

Aleksandr L. Kalinin – Senior Lecturer, Department of the Road Construction and Operation, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), ORCID 0000-0003-0291-2022 (644080, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: a1exsandr55ne@mail.ru).