

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 1 / 2024, Vol. 11, Iss. 1 <https://t-s.today/issue-1-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS124.pdf>

DOI: 10.15862/06SATS124 (<https://doi.org/10.15862/06SATS124>)

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Условия работы дорожных одежд в весенний период в районах с глубоким сезонным промерзанием грунтов

Кривко Е.В.

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Кривко Елена Валерьевна, e-mail: krivkoeva@mail.ru

Аннотация. Дорожные одежды автомобильных дорог в России рассчитывают на весенний период их эксплуатации — период наибольшей влажности грунтов. В этот период, при переходе температур воздуха к положительным значениям, начинается оттаивание сезонно промерзающего слоя грунта под дорожной одеждой. В результате увлажнения прочностные характеристики грунта в этом слое земляного полотна изменяются в сторону уменьшения, то есть окажутся меньше, чем были заложены в расчете дорожной одежды. Такое состояние дорожной конструкции продолжается до тех пор, пока сезонная мерзлота полностью не деградирует. В период оттаивания сезонно промерзающего слоя земляного полотна схема распределения нагрузки от автомобиля не будет соответствовать расчетной, в которой земляное полотно будет состоять из двух слоев — оттаивающего и еще промерзшего. Только после полного оттаивания промерзшего слоя в земляном полотне, ее расчетная схема будет соответствовать расчетной.

Целью исследования данной работы — является проведение анализа состояния дорожной конструкции, в котором она работает не в состоянии с расчетной схемой: в течение периода от начала оттаивания грунта земляного полотна автомобильной дороги до полной деградации сезонно промерзающего слоя. Для достижения цели были поставлены задачи: выявить особенности напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции и возможное ее влияние в этот период на накопление микро-деформаций в верхнем слое земляного полотна с последующим их накоплением и копированием на проезжую часть дороги. Автором представлены результаты особенности деформирования дорожной одежды в период оттаивания земляного полотна на автомобильной дороге А-376 Хабаровск-Лидога-Ванино с подъездом к г. Комсомольск-на-Амуре.

Ключевые слова: дорожная одежда; земляное полотно; упругое полупространство; промерзающий слой; влажность грунта; нагрузка колесная; прогиб дорожной одежды

Road pavement operating conditions in spring in areas with deep seasonal soil freezing

Elena V. Krivko

Pacific State University, Khabarovsk, Russia

Corresponding author: Elena V. Krivko, e-mail: krivkoeva@mail.ru

Abstract. Road pavements of highways in Russia are designed for the spring period of their operation — the period of the highest soil dampness. During this period, when air temperature is above 0°C, thawing of the seasonally frozen soil layer under the pavement begins. As a result of dampness, the strength characteristics of the soil in this layer of the roadbed will change downward, i.e. will be less than those assumed in the calculation of the pavement. This road structure condition will continue until the seasonal permafrost has completely degraded. During the thawing of the seasonally roadbed frozen layer, the vehicle load distribution pattern will not correspond to the design one, where the roadbed will consist of two layers — thawing and still frozen. Only after complete thawing of the frozen layer in the roadbed, its design scheme will correspond to the initial design scheme.

This paper's research purpose is to analyze the state of the road structure, in which it's operating not in a state corresponding with the design scheme: during the period from the beginning of the roadbed soil thawing of the highway to the complete degradation of the seasonally frozen layer. To achieve the goal the following tasks were set: to reveal the stress-strain state peculiarities of the road structure and its possible influence during this period on the microdeformations accumulation in the top layer of the roadbed with their subsequent accumulation and copying on the roadway. The author presents the deformation peculiarities results of the pavement during roadbed thawing on the highway A-376 Khabarovsk-Lidoga-Vanino with access to the city of Komsomolsk-on-Amur.

Keywords: roadway; roadbed; elastic half-space; freezing layer; soil dampness; wheel load; roadway deflection

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Уровень надежности автомобильных дорог, так же как и ее элементов, назначают на стадии проектирования с учетом значимости дороги для экономики региона, ее категории. Дорожная одежда является одним из важнейших и дорогостоящих элементов автомобильной дороги. Именно она непосредственно воспринимает механические, физические и химические воздействия. В связи с этим при ее проектировании к ней предъявляют повышенные требования. Это, в конечном итоге, обеспечивает устойчивую ее работу без дефектов в течение всего срок службы.

Дорожная одежда представляет собой многослойную конструкцию в пределах проезжей части автомобильной дороги, воспринимающую механические воздействия от транспортных средств, а также физические и химические воздействия. Применение типовых конструкций дорожных одежд, рассчитанных на указанные выше воздействия для различных гидрогеологических и климатических условий, позволяют с минимальными затратами обеспечить их работоспособность в пределах нормативных сроков их эксплуатации.

Для дорожной одежды, как и для других строительных конструкций, научной основой методов проектирования является механика твердого деформируемого тела, в частности, такого ее раздела, как теория упругости [1]. Современные методы расчета нежестких дорожных одежд основаны на предположении, что по уровню напряжений их проектируют на напряжения в стадии обратимых деформаций (без остаточных — пластических деформаций в материале ее слоев). Каждый ее слой при этом характеризуется своим модулем упругости и коэффициентом Пуассона. Модель многослойной конструкции удовлетворительно отражает свойства дорожных одежд.

За рубежом работа по усовершенствованию расчета дорожных одежд практически приостановлена: считается, что необходимо развивать не теоретические методы расчетных моделей, а точность определения расчетных параметров грунтов и материалов конструктивных слоев дорожных одежд [2].

В России, несмотря на то, что существенного прорыва от классических решений теории упругости не выявлено, работы по разработке методик расчета дорожных одежд продолжились. Многочисленные исследования, проведенные отечественными учеными, на данный момент времени позволили выработать методику оценки прочности конструкции, включающую в себя как оценку прочности

конструкции в целом, так и оценку прочности с учетом напряжений, возникающих в отдельных конструктивных слоях и устанавливаемых с использованием решений теории упругости.

Еще в СССР в инженерной практике при расчете толщины конструктивных слоев дорожной одежды нежесткого типа, использовались методы, основанные на теории упругости, теории накопления деформации [3]. В 1941 г. метод расчета дорожных одежд по упругим деформациям впервые под руководством профессора Н.Н. Иванова предложили ученые ДорНИИ.

Чуть позже исследованиями в этой области занимались также М.Б. Корсунский [4], Б.С. Радовский [5], Коган Б.И. [6] и еще ряд ученых.

Впоследствии в результате многолетних исследований, выполненных Кривисским А.М., Теляевым А.П. и Ивановым Н.Н., был создан практический метод расчета дорожных одежд [7], который позднее вошел в нормативные документы. Для расчета дорожных одежд были изданы: в 1943 г. — «Выбор конструкций дорожных одежд (Теория прочности и методы расчета)»¹, в 1961 г. — ВСН 46-60², 1973 г. — ВСН 46-72³, 1985 г. — ВСН 46-83.⁴ Во всех этих нормативных документах рассматривается двухслойная конструкция нежесткой дорожной одежды — один конструктивный слой, который расположен на грунте земляного полотна, являющийся упругим полупространством.

Ранее действующие методики^{2,3,4} по определению параметров напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций дорожных одежд допускали приведение ее к упрощенным двухслойным системам с постоянными физико-механическими характеристиками в расчетный период.

На сегодняшний день в России конструирование и проектирование дорожных одежд выполняется на основе положений ОДМ 218.3.1.005-2021.⁵ Данный документ позволяет производить расчет параметров напряженно-деформированного состояния многослойных (до семи слоев)

¹ Выбор конструкций дорожных одежд (Теория прочности и методы расчета) / под ред. Н.Н. Иванова, А.М. Кривиского; НКВД СССР, Гл. упр. шоссежных дорог «ДорНИИ». — М.: Дориздат. — 1943. — 68 с.

² Инструкция по назначению конструкций дорожных одежд нежесткого типа: ВСН 46-60. Утв. Министерством транспортного строительства СССР. — М.: Автотрансиздат, — 1961. — 78 с.

³ Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа: ВСН 46-72. — М.: Транспорт. — 1973. — 112 с.

⁴ Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа: ВСН 46-83 / Минтрансстрой СССР. — М.: Транспорт. — 1985. — 157 с.

⁵ ОДМ 218.3.1.005-2021. Отраслевой дорожный методический документ. Проектирование нежестких дорожных одежд. Методические рекомендации по расчету параметров напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций при воздействии колесных нагрузок. — М. — 2021. — 143 с.

конструкций нежестких дорожных одежд без приведения их к упрощенным схемам.

Для внедрения в практику дорожного строительства типовых конструкций дорожных одежд разработан ОДМ 218.2.104-2019⁶ — альбом типовых конструкций нежестких дорожных одежд, рекомендуемых для различных категорий дорог и применения в различных дорожно-климатических зонах.

Научные основы расчета дорожных одежд

Scientific basis of road pavement calculation

Во всех вышеперечисленных нормативных документах дорожную одежду и земляное полотно рассматривают как многослойное упругое полупространство. Основным критерием прочности дорожной одежды в действующих нормативных документах принята величина допускаемого упругого прогиба.

Однако, точный расчет растягивающих напряжений в монолитных слоях дорожной одежды на границе с верхним слоем грунта земляного полотна не гарантирует накопление в нем остаточных деформаций. Это происходит под воздействием касательных напряжений, возникающих в конструктивных слоях и подстилающем грунте от транспортной нагрузки, приложенной к поверхности покрытия. В соответствии с этим расчет на прочность в слоях выполняют по допускаемым напряжениям на сдвиг в слоях с пониженной сопротивляемостью сдвигу и на растяжение при изгибе в монолитных слоях.

При расчетах сложная многослойная дорожная конструкция заменяется двухслойной с постоянными физико-механическими характеристиками, не изменяющимися со временем в расчетный период. Фактическое же значение модуля упругости грунтов не только изменяется со временем, но даже является не постоянным в пределах самой конструкции на протяжении одного и того же участка дороги [8].

На преждевременное разрушение автомобильной дороги, наряду с воздействием транспортной нагрузки, существенное влияние оказывают и погодные-климатические факторы. Изучению влияния природно-климатических условий на формирование свойств грунтов земляного полотна автомобильных дорог посвящены научные работы Ярмолинского А.И. [9], Сухорукова А.В. [10], Ланиса А.Л. [11] и др. Однако погодные-климатические факторы в настоящее время не в полной

⁶ ОДМ 218.2.104-2019 Отраслевой дорожный методический документ. Альбом типовых конструкций нежестких дорожных одежд в различных дорожно-климатических зонах. — М. — 2022. — 55 с.

мере учитываются при проектировании нежестких дорожных одежд, что и является причиной их преждевременного разрушения.

Устойчивая работа системы «земляное полотно — дорожная одежда» может быть обеспечена только при условии создания условий стабильного во времени водно-теплового режима земляного полотна. Однако при увеличении влажности грунтов его прочностные свойства изменяются в худшую сторону — уменьшение прочности этой системы [12].

Прочность грунтов изменяется противоположно сезонному изменению влажности: при уменьшении влажности грунта, его прочность увеличивается, а с ее ростом — прочность уменьшается, вплоть до перехода грунта земляного полотна в текучее состояние [13].

$$E = f(WC),$$

где E — прочность грунта, Па; W — влажность грунта, %; C — коэффициент, характеризующий условия сложения и первоначальное уплотнение грунта.

Прочностные характеристики грунта рабочего слоя земляного полотна определяются, учитывая суммарное число приложения приведенной расчетной нагрузки к концу срока службы и расчетной влажности грунта, по формуле⁷:

$$\overline{W}_p = (\overline{W}_T + \Delta_1 \overline{W} - \Delta_2 \overline{W})(1 + 0,1t) - \Delta_3, \quad (1)$$

где \overline{W}_T — среднее многолетнее значение относительной влажности в рабочем слое земляного полотна, определяемое в зависимости от дорожно-климатической зоны, типа местности и вида грунта по таблице П2.1; $\Delta_1 \overline{W}$ — поправка на особенности рельефа местности, назначаемая по таблице П2.2; $\Delta_2 \overline{W}$ — поправка на конструктивные особенности проезжей части, назначаемая по таблице П2.3; t — коэффициент нормативного отклонения, назначаемый по таблице П4.2; Δ_3 — поправка на влияние суммарной толщины стабильных слоев дорожной одежды, устанавливается по графику рисунка П2.1.

Для районов с сезонным промерзанием грунтов под дорожной одеждой в грунтах земляного полотна происходят изменения водно-температурного режима: в процессе осеннего накопления в нем влаги, зимнего перераспределения, весеннего их переувлажнения в процессе оттаивания промерзшего слоя и летнего просыхания. Именно изменения водно-теплового режима по сезонам года в конечном итоге приводят к

⁷ ОДН 218.046-01. Отраслевые дорожные нормы. Проектирование нежестких дорожных одежд. Минтранс РФ — М.: Информавтодор. — 2001. — 144 с.

ослаблению прочности грунтов в весенний период оттаивания грунтов под дорожной одеждой.

В течение зимнего периода, особенно в районах крайнего Севера и с резко-континентальным климатом, где грунты промерзают до трех и более метров, весной начинается их оттаивание. При оттаивании грунты переувлажняются, иногда переходя в текучее состояние, в связи с чем дорожная конструкция (система «земляное полотно — дорожная одежда») имеет минимальную прочность.

Повышение долговечности материалов дорожной конструкции и устойчивости земляного полотна автомобильных дорог являются основной задачей по обеспечению срока службы дорог — до первого капитального ремонта. Именно в весенний период — период наибольшего ослабления дорожной конструкции появляются различного вида дефекты и разрушения дорожных одежд. Поэтому необходимо учитывать влияние региональных природно-климатических условий на сезонное изменение напряженно-деформированного состояния системы земляное полотно — дорожная одежда.

С учетом этого в данной работе были проанализированы основные, наиболее важные и значимые факторы, влияющие на отклонение расчетных характеристик от их фактических значений в дорожной конструкции, а именно:

- водно-температурный режим, при котором изменяется состояние грунта земляного полотна в годовом цикле, особенно в весенний период года;
- длительный период оттаивания грунта земляного полотна под дорожной одеждой в районах с большой глубиной промерзания.

Из проанализированной вышеприведенной формулы (1) напрашивается вывод, что расчетная влажность является полностью теоретической величиной — ожидаемой [14]. Полученные таким способом расчетные характеристики грунта земляного полотна не отображают в расчетный период реальное состояние системы «дорожная одежда — рабочий слой земляного полотна», так как влажность грунта по толщине оттаивающего слоя не может быть одинаковой.

Реальный процесс оттаивания грунтов земляного полотна, содержащих в том числе и дисперсные частицы, можно описать следующим образом: в первый период зимы в процессе осенне-зимнего накопления и перераспределения влаги в грунте земляного полотна, при его промерзании, под дорожной одеждой в грунте образуются линзы или кристаллики льда.

В весенний же период эти кристаллики или линзы льда при оттаивании переходят в жидкое состояние. И, в первую очередь, оттаивание грунта начинается под проезжей частью дороги, так как покрытие на проезжей части устроено из асфальтобетона, имеющего темный цвет, аккумулирующий тепловую энергию солнца. В результате теплового воздействия граница оттаивания опускается вниз, последовательно пересекая все слои дорожной одежды, и достигает грунта земляного полотна, в первую очередь, в пределах проезжей части. При этом влажность грунта земляного полотна в оттаявшем слое увеличивается, так как он расположен на промороженном еще массиве грунта, который препятствует фильтрации воды вниз. Толщина этого оттаивающего слоя грунта под дорожной одеждой постоянно с каждым днем увеличивается. В нем начинает скапливаться вода, почти всегда достигая нижней границы текучести. При этом грунт уже будет не в состоянии воспринимать нагрузку, будет смешиваться со слоями основания.

В этот же период отвод воды в поперечном направлении дороги еще невозможен, так как грунт земляного полотна под обочинами оттаивает позже. Помимо того, что в процессе оттаивания грунт может перейти и в текучее состояние, вне зависимости от этого суглинистые и глинистые грунты теряют до 70 % своей прочности (от прочности грунта при оптимальной влажности).

Из выше приведенного можно сделать вывод: при появлении под дорожной одеждой оттаивающего слоя грунта, толщина которого постоянно увеличивается, изменяется и расчетная схема дорожной одежды — слои дорожной одежды на однородном упругом полупространстве. Этот период работы дорожной одежды, который характеризуется, как не соответствующий расчетной схеме будет длиться от начала оттаивания промерзшего слоя земляного полотна, до полного его оттаивания (деградации) (рис. 1).

В процессе оттаивания дорожной конструкции изменяется не только ее однородность, но и принципы восприятия и передачи расчетной нагрузки. Это означает, что в весенний период дорожная одежда представляет собой конструкцию уже не в виде упругого полупространства — она расположена на сжимаемом слое конечной величины оттаявшего слоя земляного полотна, толщина которого постоянно увеличивается.

Полная деградация сезонно промерзающего слоя, представленного на рисунке 1, приходится на 1 июня. Перед полной деградацией сезонно промерзающего слоя достигается и максимальный упругий прогиб

дорожной одежды, измеренный путем приложения к ее поверхности расчетной нагрузки.

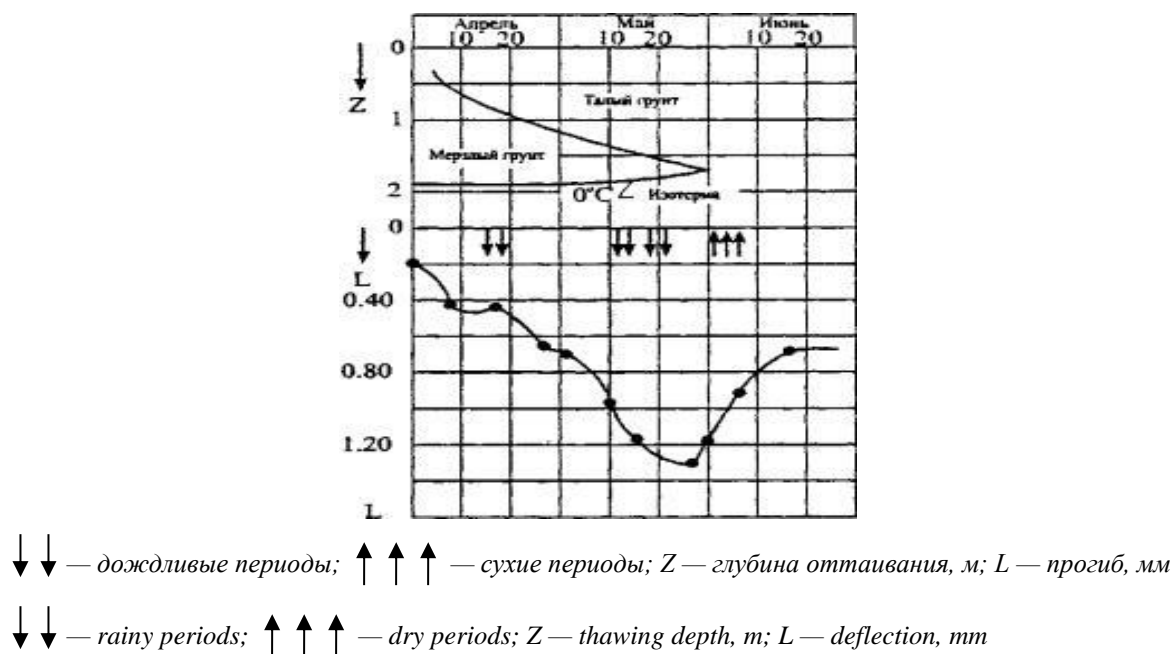


Рисунок 1. Изменение прогиба дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием в весенний период по мере оттаивания грунта земляного полотна (данные Р.С. Нордала, Норвегия)⁸

Figure 1. Variation of asphalt concrete pavements deflection in the spring period as the roadbed soil thaws out (data of R.S. Nordal, Norway)⁸

Результаты исследования

Research results

Такой же результат был получен автором при измерении упругих прогибов на контрольной точке в створе 54 километра автомобильной дороги А-376 Хабаровск-Лидога-Ванино с подъездом к г. Комсомольск-на-Амуре (рис. 2).

Климат южных районов Хабаровского края характеризуется как резко континентальный с влажным жарким летом и холодной зимой. На автомобильных дорогах земляное полотно промерзает на большую глубину. При нормативной глубине промерзания равной 2,65 м в южных районах Хабаровского края на оголенных от снега участках местности, оттаивание сезонно промерзающего слоя длится не менее 56 суток и номинально завершается к 24 мая. В этот период условия работы дорожной конструкции являются крайне неблагоприятными.

⁸ Ремонт и содержание автомобильных дорог. Справочная энциклопедия дорожника. Том II. / Под ред. А.П. Васильева. — М. — 2004. — 1129 с.

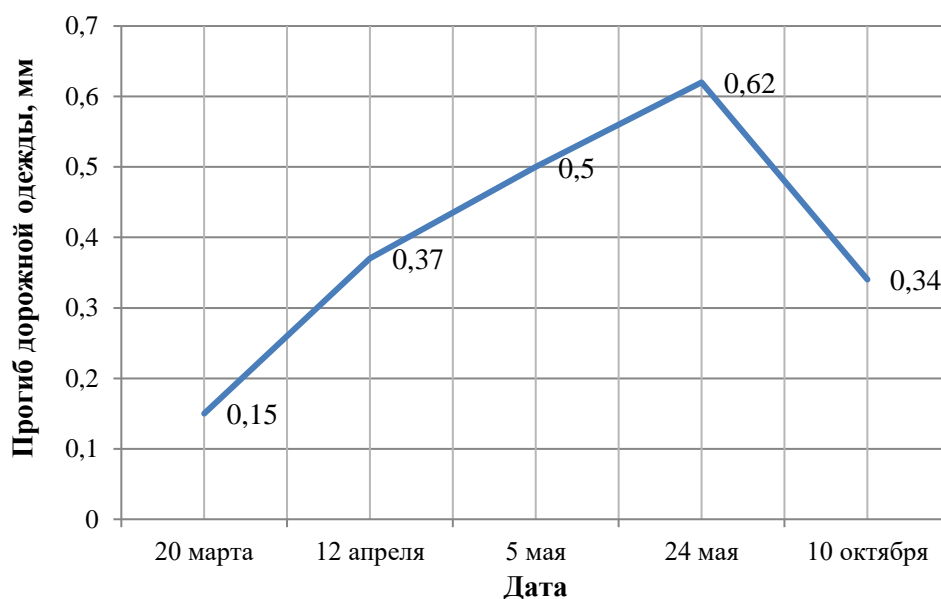


Рисунок 2. Измерение прогиба под нагрузкой от колеса автомобиля на контрольной точке (разработано автором)

Figure 2. Deflection measurement under the load from a car wheel at the reference point (developed by the author)

С момента начала оттаивания грунта земляного полотна непосредственно под дорожной одеждой вода не может отфильтровываться из него, так как этот слой находится на еще промерзшем грунте.

Наиболее критическим периодом работы дорожной одежды весной является период от начала оттаивания грунта земляного полотна, когда концентрация воды у поверхности еще промерзшего слоя будет максимальна и близка к нижней границе его текучести. Слой, с повышенной влажностью грунта, будет постоянно увеличиваться с перемещением границы его оттаивания вниз.

С достижением глубины оттаивания грунта от низа дорожной одежды до 0,3–0,4 м влажность грунта в верхней части оттаявшего слоя начнет уменьшаться, оставаясь максимальной на контакте с еще замерзшим грунтом.

При глубине оттаявшего слоя грунта земляного полотна под дорожной одеждой более 0,6 м часть воды начнет, для Хабаровска это примерно 26 мая, отфильтровываться уже в поперечном направлении — через обочины.

При достижении границы оттаивания до 140–160 см сезонно промерзающий слой деградирует полностью. Именно с этого периода можно с уверенностью утверждать, что расчетная схема дорожной одежды будет полностью соответствовать той, которая заложена в нормативах документах^{5, 7}: слой на упругом полупространстве.

С исчезновением сезонно-промерзающего слоя происходит мгновенное выравнивание влажности грунтов земляного полотна по всей высоте насыпи (при условии отсутствия грунтовых или застоя поверхностных вод).

Исходя из проведенного исследования условий работы дорожной одежды рассматриваемого участка автомобильной дороги, можно сделать вывод о несоответствии отдельных теоретических предпосылок и реальных условий работы дорожной конструкции в весенний период года, а именно:

1. При расчетах влажность является исключительно теоретической величиной и не учитывается в расчетах. Это приводит к тому, что реальная влажность грунта земляного полотна зачастую не отвечает расчетным условиям работы дорожной конструкции: в процессе оттаивания грунта оттаявший слой на еще замёрзшем слое зачастую оказывается переувлажненным, что значительно ослабляет дорожную конструкцию.

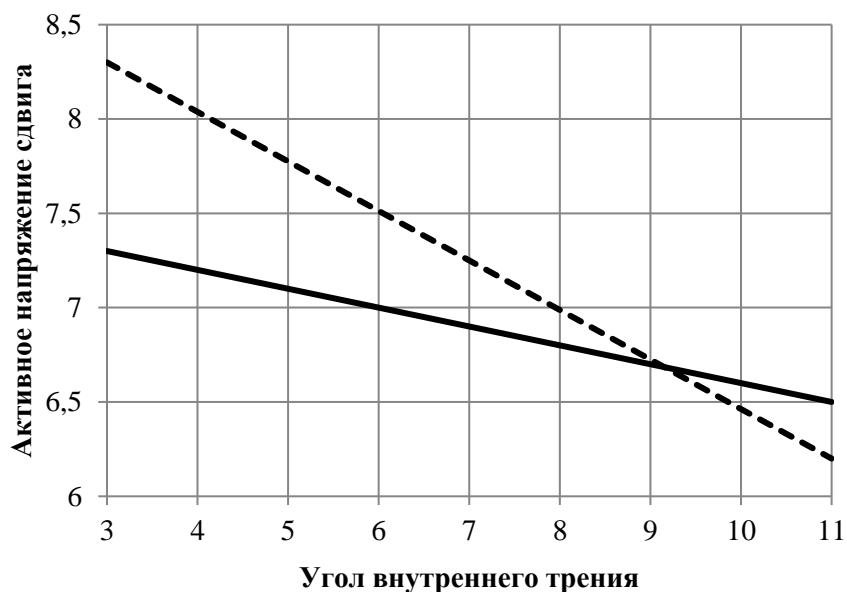
2. Длительный период дорожная одежда работает в условиях несоответствия расчетной ее модели фактическому состоянию, особенно в районах с большой глубиной промерзания. Так в пригороде г. Хабаровска оттаивание сезонно промерзающего слоя длится не менее 56 суток. В этот период дорожная одежда представляет собой конструкцию не в виде упругого полупространства, а на сжимаемом слое конечной величины — оттаявший слой земляного полотна на еще не оттаявшем слое грунта земляного полотна. И только после полной деградации мерзлого слоя в естественном основании или в теле насыпи дорожная одежда будет работать как упругое полупространство, то есть в соответствии с расчетной схемой.

Как все это влияет на состояние конструкции в период оттаивания, как происходит ее деформирование на настоящий момент учеными еще не изучено.

Обсуждения

Discussions

Во многом, созвучно нашим взглядам на расчетную схему дорожной одежды в период оттаивания сезонно промерзающего грунта земляного полотна, в своей работе изложил А.Е. Мерзликин [15]. Им выполнен расчет конструкции дорожной одежды по определению напряжений сдвига в верхнем слое земляного полотна при оттаивании его на глубину 20 см и при полной деградации сезонно промерзающего слоя (рис. 3).



--- — Грунт оттаял на глубину 20 см; — — Грунт оттаял на всю глубину земляного полотна
--- — The soil thawed to a depth of 20 cm; — — The soil has thawed to the entire depth of the roadbed

Рисунок 3. Зависимость активных напряжений сдвига в оттаявшем слое грунта земляного полотна под дорожной одеждой [12]

Figure 3. Dependence of resistive stress in the thawed layer of roadbed soil under the pavement [12]

Мерзликиным А.Е. отмечено, что сдвигоустойчивость грунтов, насыщенных водой в оттаявшем слое грунта толщиной 20 см в точке А (рис. 3) под дорожной одеждой, лежащей на твердом замороженном основании, меньше, чем сдвигоустойчивость грунтов на этом же уровне (точка Б рис. 3), но только после того, как земляное полотно оттаивает на всю глубину промерзания. При этом активные напряжения сдвига были определены для грунтов, которые в водонасыщенном состоянии и имеют угол внутреннего трения от 3 до 11 градусов, что соответствует таким грунтам как глины, суглинки, супеси и пылеватые пески.

На основании вышесказанного Мерзликиным А.Е. сделаны два важнейших для теории расчета дорожных одежд вывода:

- Во-первых, необходимо изменить применяемую в настоящее время расчетную схему дорожных одежд для районов, для которых характерны длительные холодные периоды года с большой глубиной промерзания грунтов. Это означает, что в расчетной схеме следует учитывать часть нижележащего еще промерзшего слоя грунта земляного полотна в процессе его оттаивания сверху. При этом промерзший грунт представляет собой жесткое основание с модулем упругости равным 3 800 МПа. Этот период до полной деградации мерзлоты может длиться в некоторых районах более 60 суток.

- Во-вторых, продление срока службы дорожной одежды зависит от точности прогнозирования всего периода весеннего оттаивания грунта земляного полотна, когда реально сдвигающие усилия в грунте с дисперсными частицами превышают расчетные.

В подтверждение этих исследований на автомобильных дорогах южных районов Хабаровского края нашей кафедрой «Автомобильные дороги» Тихоокеанского государственного университета были проведены испытания дорожных одежд путем статической нагрузки в виде колеса автомобиля [11].

Упругий прогиб измерялся после снятия нагрузки с точки, находящейся на полосе наката путем отсчета по индикатору с выдержкой до полного достижения обратимой (упругой) деформации. В обычных условиях стабилизация показаний завершалась в основном к 90 секундам (рис. 4).

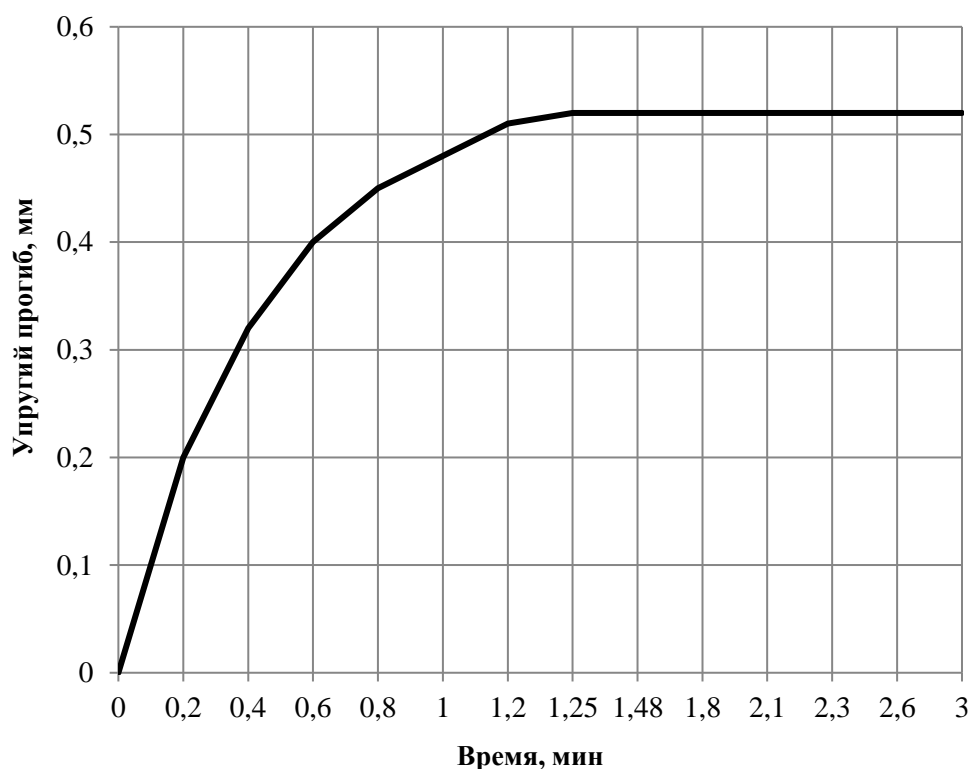
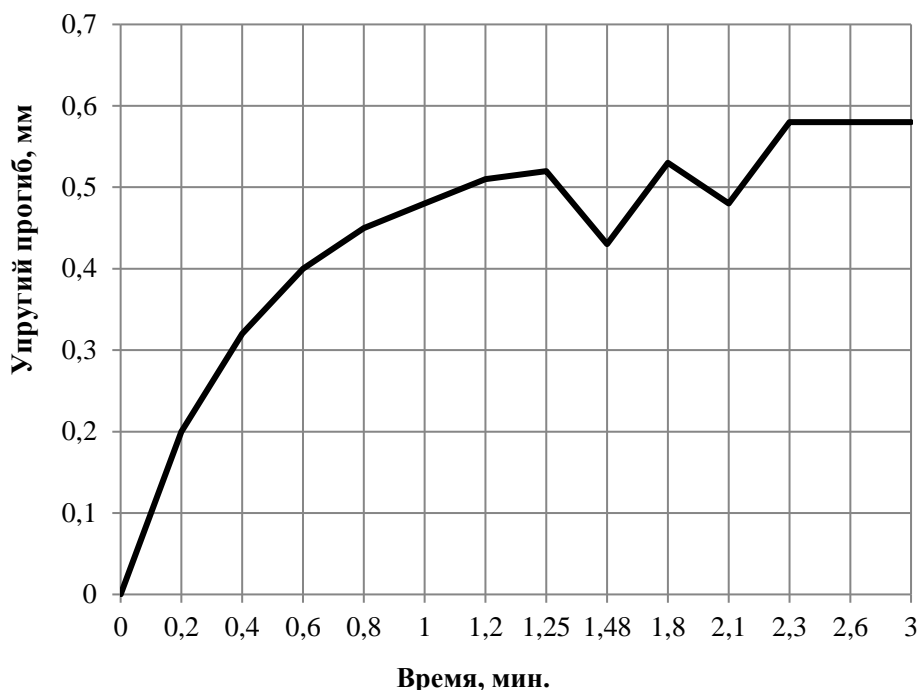


Рисунок 4. Полная обратимая деформация дорожной одежды при расчетном состоянии грунтов земляного полотна (разработано автором)

Figure 4. Full recoverable deformation of the pavement under the design condition of the roadbed soils (developed by the author)

Однако при этом на некоторых участках нами были отмечены не характерные (не типичные) обратимые деформации дорожной одежды после снятия нагрузки (рис. 5).



0–1,25 — обратимая деформация; 1,25–1,48 первичное деформирование (прогиб) дорожной одежды без нагрузки; 1,48–1,8 — обратимая деформация первичного прогиба; 1,8–2,1 — вторичное деформирование (прогиб) дорожной одежды без нагрузки; 2,1–2,3 — обратимая деформация вторичного прогиба с достижением конечного значения

0–1,25 — recoverable deformation; 1,25–1,48 — primary deformation (deflection) of the pavement without load; 1,48–1,8 — recoverable deformation of the primary deflection; 1,8–2,1 — secondary deformation (deflection) of the pavement without load; 2,1–2,3 — recoverable deformation of the secondary deflection with reaching the final value

Рисунок 5. Обратимая деформация дорожной одежды по показаниям индикатора после снятия нагрузки в условиях переувлажненных грунтов земляного полотна (разработано автором)

Figure 5. Recoverable deformation of the pavement according to the indicator readings after load removal in conditions of overwatered roadbed soils (developed by the author)

Ниже автором приведены условия, при реализации которых происходило такое обратное деформирование после снятия испытательной нагрузки в точке нагружения:

- высота насыпи не более двух метров, в том числе и нулевые отметки продольного профиля;
- наличие в теле насыпи суглинков, в том числе и тяжелых, дресвы различной степени разложения с содержанием дисперсных частиц;
- краткий период продолжительности проявления таких обратных деформаций дорожных одежд после снятия с них испытательной нагрузки, который составлял до пяти суток на участках дорог с продольными уклонами на южной и до десяти суток — северной их экспозиции;

- в скважинах, пробуренных для установления видов материалов и толщины слоев дорожных одежд, визуалью на глубине от 15 до 25 см фиксировалась свободная вода;
- на участках автомобильных дорог на земляном полотне из гравийно-песчаных смесей и крупнообломочных грунтов не было зафиксировано ни одного случая видов обратимых деформаций.

Общими условиями, определяющими не типичный вид обратимой деформации дорожных одежд после снятия испытательной нагрузки в точке нагружения, являются:

- наличие в земляном полотне грунтов с дисперсными частицами;
- повышенная влажность грунтов, обусловленная в основном его оттаиванием, а также, частично, инфильтрацией воды в земляное полотно с проезжей части и обочин;
- глубина оттаивание грунта земляного полотна под дорожной одеждой в период проявления не типичных обратимых деформаций соответствует 0,4–0,6 м. При такой глубине оттаявшего грунта фильтрации воды через обочины и откосы не происходит вследствие наличия там еще промерзшего грунта.

В нормативном документе по измерению прочности нежестких дорожных одежд введено понятие чаши прогиба дорожной одежды, под колесом автомобиля или жестким штампом, при определении ее прочности. Дорожная одежда под нагрузкой деформируется с максимальным прогибом в месте ее приложения, приобретая чашеобразную вогнутую форму под воздействием нагрузки на покрытие. То есть чаша прогиба дорожной одежды занимает определенный объем материала слоев, в том числе и оттаявшего грунта.

Методика измерения прогиба покрытия заключается в следующем. Устанавливают заднее колесо автомобиля в точке испытания с последующей стабилизацией покрытия под нагрузкой. Устанавливают прогибомер по оси расчетного правого колеса автомобиля между скатами. Снимают показания по индикатору после стабилизации его стрелки. Автомобиль отъезжает от точки измерения прогиба на расстояние не менее чем на 10 м для исключения погрешности от чаши прогиба.

В условиях переувлажнения грунта, когда вода в нем по свойствам близка к свободной, она будет частично выдавливаться при прогибе покрытия дорожной одежды в продольном направлении под чашей прогиба и частично в поперечном направлении. В таких случаях на подобных участках дороги нами отмечены не типичные обратимые деформации после снятия нагрузки на проезжей части дороги (рис. 5). Так после съезда колеса автомобиля от расчетной точки начинается обратимая

деформация. Но примерно через минуту происходит первая обратная деформация (частичный прогиб без приложения нагрузки).

На рисунке 5 отмечены две волны первичной и вторичной деформации дорожной одежды (без нагрузки) и две обратимые части этих деформаций. Первичная деформация начинается, как правило, в конце хода начальной общей обратимой деформации при ее реализации на 2/3 конечной величины. По всей видимости, повторное деформирование дорожной одежды является следствием образования вакуума на границе чаши прогиба, откуда вода после снятия нагрузки мигрирует в центральную ее часть.

После того как большой объем воды мигрирует в центральную часть чаши прогиба, вакуум образовывается уже на ее внешних контурах. Именно это и вызывает первичное деформирование — прогиб дорожной одежды без нагрузки.

Этот процесс повторяется дважды с уменьшением величины нетипичных деформаций. Первичный прогиб такой деформации составляет в среднем 20 %, а вторичный прогиб покрытия уже равен 10–11 % от конечной величины общей обратимой деформации. Такой физический процесс особенностей деформирования дорожных одежд в относительно-короткий временной интервал периода их оттаивания показывает, что деформации на проезжей части могут проявляться в виде продавливания покрытия проезжей части на полосах наката (рис. 6).

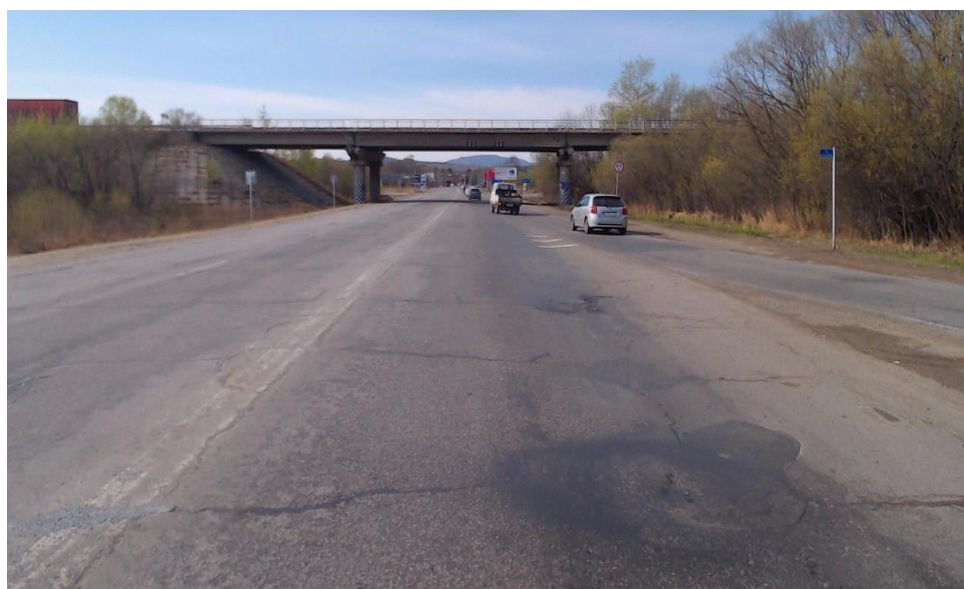


Рисунок 6. Деформации на проезжей части автомобильной дороги А370 (км 12+914) (водоотвод не обеспечен, застой воды в придорожной канаве справа) (фото автора)

Figure 6. Deformations on the carriageway of roadway А370 (km 12+914) (drainage is not provided, water stagnation in the roadside ditch on the right) (author's photo)

Видимые деформации, представленные на рисунке 6, как правило, являются следствием накопления микродеформаций в земляном полотне под дорожной одеждой от превышения сдвигающих усилий при переувлажнении грунта в процессе оттаивания. Образование колеи на проезжей части дорожной одежды происходит так же по схеме, приведенной выше. Следовательно, в целях исключения такого вида деформаций на полосах наката колес автомобилей, необходимо повысить требование к грунтам рабочего слоя земляного полотна.

Заключение

Conclusion

На основании проведенных исследований особенностей работы дорожной конструкции в условиях резко-континентального климата в период оттаивания сезонно-промерзающих грунтов земляного полотна, когда глубина промерзания материалов дорожной одежды и земляного полотна автомобильной дороги оказывается значительной, автором сделаны следующие выводы:

- При конструировании дорожных одежд нежесткого типа необходимо уточнение значений расчетной влажности грунтов земляного полотна. На сегодняшний день расчетная влажность грунтов, назначаемая при расчетах дорожных одежд, является исключительно теоретической величиной. В реальной же схеме процесса оттаивания грунта земляного полотна в приграничном его слое, влажность всегда будет практически выше расчетной.
- До полной деградации сезонно промерзшего слоя грунта под дорожной одеждой ее схема не соответствует расчетной, так как в этот период дорожная одежда представляет собой конструкцию на сжимаемом слое конечной толщины (до границы промерзшего слоя). Только после полной деградации сезонно промерзшего слоя в естественном основании или в теле насыпи, дорожная одежда будет полностью соответствовать теории упругого полупространства, то есть расчетной схеме.
- При проектировании автомобильных дорог необходимо повысить требования, предъявляемые к грунтам рабочего слоя земляного полотна, с целью обеспечения условий их сдвигоустойчивости, вплоть до их армирования и проведения других мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Радовский, Б.С.** Первые представления о прочности и расчете дорожных одежд: дорожные одежды до XX века / Б.С. Радовский // Дорожная техника. — 2012. — С. 120–133. — URL: https://highway.ucoz.ru/ld/0/67/prochnost_dorobj.pdf. (дата обращения: 12.02.2024).
2. Состояние современного методического обеспечения расчета и конструирования дорожных одежд / А.В. Кочетков, Н.Е. Кокодеева, П.Б. Рапопорт [и др.] // Вестник Пермского государственного технического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. — 2011. — № 1. — С. 65–74. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16811455>. — EDN ODXAEF. (дата обращения: 12.02.2024).
3. **Леонович, И.И.** Применение упруговязкой модели к расчету конструкций дорожных одежд нежесткого типа / И.И. Леонович, А.П. Лащенко // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. — 2016. — № 2. — С. 105–108. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26480958>. — EDN WHMODV. (дата обращения: 12.02.2024).
4. **Корсунский, М.Б.** Основы инженерного расчета дорожных одежд на надежность / М.Б. Корсунский // Совершенствование методов проектирования дорожных одежд нежесткого типа. Труды СОЮЗДОРНИИ / Москва: Союздорнии, 1983. — С. 23–34. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001139081>. (дата обращения: 12.02.2024).
5. **Радовский, Б.С.** Поведение дорожной конструкции как слоистой вязкоупругой среды под действием подвижной нагрузки / Б.С. Радовский // Известия вузов. Строительство и архитектура. — 1975. — № 4. — С. 141–146.
6. **Коган, Б.И.** Напряжения и деформации многослойных покрытий / Б.И. Коган // Труды ХАДИ. — 1953. — № 14. — С. 33–18.
7. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / под ред. Н.Н. Иванова. — Москва: Транспорт, 1973. — 328 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007407824> (дата обращения: 09.02.2024).
8. **Буртыль, Ю.В.** Моделирование взаимосвязи ровности и прочности нежестких дорожных одежд на основании теоретическо-практических исследований / Ю.В. Буртыль, Д.В. Капский. — DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583> // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. — 2022. — Т 19. — № 4. — С. 570–583. — URL: <https://vestnik.sibadi.org/jour/article/view/1510>. — EDN MGXUAY. (дата обращения: 09.02.2024).
9. **Ярмолинский, А.И.** Проектирование конструкций автомобильных дорог с учетом природно-климатических особенностей Дальнего Востока / А.И. Ярмолинский, В.А. Ярмолинский. — Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2005. — 196 с. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19637346> (дата обращения: 09.02.2024).
10. **Сухоруков, А.В.** К обоснованию периода осеннего влагонакопления при прогнозировании влажности грунтов земляного полотна автомобильных дорог Западно-Сибирского региона / А.В. Сухоруков // Техника и технологии дорожного хозяйства. — 2014. — № 1. — С. 21–25.
11. **Ланис, А.Л.** Влияние оттаивания сезонно-мерзлых грунтов на деформации земляного полотна / А.Л. Ланис, Д.А. Разуваев, Д.А. Усов. — DOI https://doi.org/10.52170/1815-9265_2021_58_104 // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 3. — С. 104–111. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47208627>. — EDN FKKNWQ. (дата обращения: 10.02.2024).
12. **Жуковский, Е.М.** Методика проектирования и конструирования нежестких дорожных одежд с различной прочностью по ширине проезжей части / Е.М. Жуковский. — DOI <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2022-19-6-125-133> // Вестник гражданских инженеров. — 2021. — № 6. — С. 125–133. — URL: <https://vestnik.spbgasu.ru/article/metodika-proektirovaniya-i-konstruirovaniya-nezhestkih-dorozhnyh-odezhd-s-razlichnoy>. — EDN PQTYUV. (дата обращения: 26.02.2024).
13. **Каримов, Э.М.** Влияние водно-теплого режима на техническое состояние земляного полотна автомобильных дорог в условиях V дорожно-климатической зоны Кыргызстана / Э.М. Каримов. — DOI <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-1-193-204> // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2020. — Т 22. — № 1. — С. 193–204. — URL: <https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/754>. — EDN IUBOHY. (дата обращения: 10.02.2024).

14. Лопашук, В.В. Технические и технологические аспекты повышения сроков службы нежестких дорожных одежд: монография / В.В. Лопашук, А.Е. Казаринов. — Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2022. — 102 с. — URL: <https://expose.gpntbsib.ru/expose/novye-postupleniya-po-tehnicheskim-naukam-19-aprelya-2023-g.-d45a629a/book/%D0%932022-25998755430639> (дата обращения: 07.12.2023).
15. Мерзликин, А.Е. Моделирование упругого однородного и двухслойного полупространства, применительно к задачам по расчету дорожных одежд методом конечных элементов / А.Е. Мерзликин, Н.В. Капустников // Дороги и мосты. — 2011. — № 25/1. — С. 63–72.

Сведения об авторах:

Кривко Елена Валерьевна — старший преподаватель кафедры «Автомобильные дороги», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: krivkoeva@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1009385

Статья получена: 10.03.2024. Принята к публикации: 27.05.2024. Опубликовано онлайн: 10.06.2024.

REFERENCES

1. Radovskiy B.S. [First ideas about the strength and design of road pavements: road pavements before the twentieth century]. *Road Building equipment*. 2012; 120–133. Available at: https://highway.ucoz.ru/_id/0/67_prochnost_doroj.pdf (accessed 12th February 2024). (In Russ.).
2. Kochetkov A.V., Kokodeyeva N.E., Rapoport P.B. et al. [The state of modern methodological support for the calculation and design of road pavements]. *Bulletin PNIPU. Protection of the environment, transport, life safety*. 2011;(1): 65–74. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16811455> (accessed 12th February 2024). (In Russ.).
3. Leonovich I.I., Lashchenko A.P. Application of Viscoelastic Models to Design Calculations Non-Rigid Pavement Type. Proceedings of BSTU. № 2. *Forest and Woodworking Industry*. 2016;(2): 105–108. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26480958> (accessed 12th February 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Korsunskiy M.B. [Fundamentals of engineering calculation of road pavements for reliability]. In: [Improving methods for designing non-rigid pavements. Proceedings of SOYUZDORNIA]. Moscow: Soyuzdornii; 1983. p. 23–34. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001139081> (accessed 12th February 2024). (In Russ.).
5. Radovskiy B.S. Povedeniye dorozhnoy konstruksii kak sloistoy vyazkouprugoy sredy pod deystviyem podvizhnoy nagruzki [Behavior of a road structure as a layered viscoelastic medium under the action of a moving load]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News from universities. Construction and architecture]*. 1975;(4): 141–146. (In Russ.).
6. Kogan B.I. Napryazheniya i deformatsii mnogosloynnykh pokrytiy [Stresses and deformations of multilayer coatings]. *Trudy KhADI [Proceedings of HADI]*. 1953;(14): 33–18. (In Russ.).
7. Ivanov N.N. ed. [Konstruirovaniye i raschet nezhestkikh dorozhnykh odezhd]. Moscow: Transport; 1973. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007407824> (accessed 9th February 2024). (In Russ.).
8. Burtyl Yu.V., Kapski D.V. Modelling the relationship of smoothness and resistibility in non-rigid pavements based on theoretical and practical studies. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(4): 570–583. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-583>.
9. Yarmolinskiy A.I., Yarmolinskiy V.A. [Design of highway structures taking into account the natural and climatic features of the Far East]. Khabarovsk: TOGU; 2005. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19637346> (accessed 9th February 2024). (In Russ.).
10. Sukhorukov A.V. K obosnovaniyu perioda osennego vlagonakopleniya pri prognozirovanii vlazhnosti gruntov zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog Zapadno-Sibirskogo regiona [Towards the justification of the period of autumn moisture accumulation when predicting soil moisture in the subgrade of highways in the Western Siberian region]. *Tekhnika i tekhnologii dorozhnoy khozyaystva [Road engineering and technology]*. 2014;(1): 21–25. (In Russ.).

11. Lanis A.L., Razuvaev D.A., Usov D.A. Influence of Thawing Soils on the Deformation Top of Subgrade. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2021;(3): 104–111. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.52170/1815-9265_2021_58_104.
 12. Zhukouski Ya.M. Methodology for the design and construction of non-rigid road pavement with varying strength values across the width of the roadway. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021;(6): 125–133. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2022-19-6-125-133>.
 13. Karimov E.M. Impact of Water and Temperature Conditions on Subgrade in Road-Building Climatic Zone V in Kyrgyzstan. *Journal of Construction and Architecture*. 2020;22(1): 193–204. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-1-193-204>.
 14. Lopashchuk V.V., Kazarinov A.E. [Technical and technological aspects of increasing the service life of flexible road pavements: monograph]. Khabarovsk: TOGU; 2022. Available at: <https://expose.gpntbsib.ru/expose/novye-postupleniya-po-tehnicheskim-naukam-19-aprelya-2023-g.-d45a629a/book/%D0%932022-25998755430639> (accessed 7th December 2024). (In Russ.).
 15. Merzlikin A.E., Kapustnikov N.V. [Modeling of an elastic homogeneous and two-layer half-space, in relation to problems of calculating road pavements using the finite element method]. *Dorogi i mosty*. 2011;(25/1): 63–72. (In Russ.).
-

Information about the authors:

Elena V. Krivko — Pacific State University, Khabarovsk, Russia, e-mail: krivkoeva@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1009385

Submitted: 10th March 2024. Revised: 27th May 2024. Published online: 10th June 2024.