УДК 625.85

© А. М. Симаковский, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: kafedra-ad@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-16-5-197-205

© A. M. Simanovskiy, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: kafedra-ad@yandex.ru

УПРУГИЕ ПРОГИБЫ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА В УСЛОВИЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

ELASTIC DEFLECTIONS OF ROAD PAVEMENT WITH THERMAL INSULATION FROM EXPANDED POLYSTYRENE IN THE CONDITIONS OF ST. PETERSBURG

Рассматривается проблема подбора дорожных конструкций с применением эффективной теплоизоляции для замены традиционных дорожных одежд на пучиноопасных грунтах в условиях Санкт-Петербурга. В качестве эффективной теплоизоляции рассмотрены плиты из пенополистирола ПЕНОПЛЭКС. Установлен параметр эквивалентности конструкций с теплоизоляцией и традиционных. Приведены результаты исследований упругих прогибов конструкций с эффективной теплоизоляцией и традиционных. Исследовано влияние различных грунтов на толщину защитного песчаного слоя над теплоизоляцией. Определены параметры дорожных одежд с теплоизоляцией различных категорий городских дорог для разных грунтов, а также толщины защитных слоев над теплоизоляцией, при которых удовлетворяется критерий прочности по упругому прогибу.

Ключевые слова: дорожная одежда, теплоизоляционный слой, морозозащитный слой, пучинистый грунт, упругий прогиб покрытия.

The article covers the problem of the selecting road structures with the use of effective thermal insulation for replacing traditional road pavement on heave-hazardous soils in the conditions of St. Petersburg. PENOPLEX expanded polystyrene plates are considered as effective thermal insulation. The equivalence parameter of pavements with thermal insulation and the traditional one is established. The results of calculations for the strength of the elastic deflection of structures with effective thermal insulation and the traditional ones are given. The effect of various soils on the thickness of the protective sand layer above the thermal insulation was investigated. Parameters of pavement with thermal insulation for various categories of urban roads for various soils were determined. The thickness of the protective layers above thermal insulation was determined, that results in satisfying the strength criterion for elastic deflection.

Keywords: road pavement, heat-insulating layer, frost-protective layer, heaving soil, elastic deflection of road pavement.

Настоящая работа посвящена сравнительному теоретическому исследованию упругих прогибов дорожных одежд с эффективной теплоизоляцией и традиционных конструкций, не содержащих специальных теплоизоляционных слоев, на городских улицах Санкт-Петербурга.

К эффективной теплоизоляции в дорожном деле относят различные пенопласты, которые применяют в целях снижения глубины сезонного промерзания, о чем говорится в работах Васильева С. И. и др. и Рувинского В. И. [1, 2].

Актуальность задачи обусловлена тем, что дорожные одежды на городских улицах устраи-

ваются, как правило, в выемке (корыте). Такие участки характеризуются высокой влажностью грунтов под дорожной одеждой и значительной величиной морозного пучения. В условиях города, центральная часть которого застроена памятниками истории и культуры, зачастую невозможно повышать высотные отметки покрытия при необходимости ремонта или усиления дорожных одежд. Наличие подземных коммуникаций ограничивает возможность заглубления дорожных одежд. Поэтому использование эффективной теплоизоляции, приводящее к снижению общей толщины дорожной одежды, является

конкурентоспособным вариантом по отношению к традиционным конструкциям. Особенное значение получает техническое решение при реконструкции и ремонте дорог в свете увеличения расчетных нагрузок согласно современным нормативным документам¹.

Этапы исследования следующие:

1. Выбор и рассмотрение конструкций дорожных одежд без эффективной теплоизоляции для различных условий (по нагрузке и грунтам).

2. Теоретическое исследование упругих прогибов конструкций, в том числе с теплоизоляцией.

3. Определение области применения конструкций с теплоизоляцией.

Выбор грунтовых условий и условий нагружения

Рассмотрено пять основных типов (групп) пучинистых грунтов² в условиях 3-го типа местности: песок пылеватый, супесь, суглинок легкий, суглинок тяжелый пылеватый, глина.

Рассмотрены условия для четырех условий нагружения (категорий городских улиц). Традиционные типы конструкций без теплоизоляции для соответствующих категорий улиц принимались по Альбому типовых конструкций³, в соответствии с которым устроено большинство дорожных одежд города и который действует по настоящее время.

¹ ГОСТ 32960–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения. М., 2015. 8 с.

² ОДН 218.046–01. Проектирование нежестких дорожных одежд. Отраслевые дорожные нормы. Государственная служба дорожного хозяйства Министерства транспорта Российской Федерации. М.: Информавтодор, 2001. 145 с.

³ Альбом А-385–88. Дорожные конструкции для Ленинграда. Вып. 1. Дорожные одежды. Институт «Ленгипроинжпроект». Л., 1989.

Общие характеристики рассмотренных дорожных конструкций

В исследовании рассмотрены следующие традиционные типы конструкций по Альбому А-385–88:

1. А-3 (для магистральных улиц общегородского значения);

2. Б-3 (для магистральных улиц районного значения);

3. Г-1 (для улиц местного значения);

4. АС (для стоянок автомобильного транспорта).

Толщины слоев покрытия и основания различных типов традиционных дорожных одежд представлены в табл. 1. Традиционные конструкции каждого типа на разных разновидностях пучинистых грунтов различаются только толщиной дополнительного слоя основания (морозозащитного слоя) (табл. 2).

Характеристика предлагаемых конструкций с теплоизоляцией

При конструировании дорожных одежд с теплоизоляцией мы учитывали большую вероятность их локального применения (в зоне пересечений с подземными коммуникациями). Чтобы не усложнять технологию строительства в этих случаях, в конструкциях с теплоизоляцией предусмотрены такие же покрытия и основания, что и в конструкциях без теплоизоляции для соответствующей категории городской улицы (см. рисунок). Теплоизоляция представлена плитами ПЕНОПЛЭКС (5 см) на монтажном слое из песка (10 см). Из технологических соображений между теплоизоляцией и основанием дорожной одежды предусмотрен защитный слой из песка. Толщину защитного слоя в исследовании вариовали от 20 до 40 см.

Таблица 1

Конструкция покрытия и основания традиционных типов дорожных одежд (по Альбому А-385–88)

Материал слоя	Толщины слоев для типов дорожной одежды, см			
	А-3	Б-3	Г-1	АС
Асфальтобетон мелкозернистый плотный, тип Б, марка I	5	5	4	4
Асфальтобетон крупнозернистый пористый, марка 1	9	8	8	6
Асфальтобетон крупнозернистый пористый, марка 1	10	8	–	–
Щебень гранитный	26	24	22	20

Таблица 2

**Толщина морозозащитного слоя традиционных типов дорожных одежд
(по Альбому А-385–88)**

Материал дополнительного слоя основания	Тип одежды	Толщина морозозащитного слоя (дополнительного слоя основания) для разных грунтовых условий h , см				
		Песок пылеватый	Супесь легкая	Суглинок легкий	Суглинок тяжелый пылеватый	Глина
Песок мелкий	А-3	50	40	65	70	65
	Б-3	50	40	70	75	70
	Г-1	55	45	75	80	75
	АС	40	35	45	70	45

Предлагаемые нами конструкции с теплоизоляцией обозначены буквой «П», добавляемой к обозначению традиционного типа конструкции. В табл. 3 и 4 для примера приведены основные характеристики предложенных конструкций с теплоизоляцией, а также традиционных конструкций по Альбому А-385–88 для магистральных улиц районного и местного значения.

Определение эквивалентности конструкций по нагрузке

Упругий прогиб используется как один из критериев прочности нежестких дорожных одежд при расчетах аналитическими [3–5] и приближенными [6] методами. Практически это

единственный критерий, который можно контролировать в существующих конструкциях дорожных одежд как при статическом нагружении [7–9], так и при динамическом [10–12]. Используется критерий упругого прогиба в различных грунтовых и природно-климатических условиях [7, 9, 13, 14].

В сложившейся практике расчетов критерий упругого прогиба трансформировался в рассмотрение общего модуля упругости дорожной конструкции и сопоставление его с требуемым модулем упругости [15], что может быть выражено зависимостью (1):

$$E_{\text{тр}} \leq E_{\text{общ}}, \quad (1)$$

Принцип подбора конструкций с теплоизоляцией для сравнения: а — традиционная дорожная одежда без теплоизоляции; б — дорожная одежда с теплоизоляцией

Таблица 3

Толщины слоев конструкций для магистральных улиц районного значения, см

Параметры дорожной одежды	Песок пылеватый		Супесь легкая		Суглинок легкий		Суглинок тяжелый пылеватый		Глина	
Традиционные конструкции по Альбому А-385–88. Тип Б-3										
Песок мелкий $h_{\text{дс}}$	50		40		70		75		70	
Толщина одежды $H_{\text{тр}}$	95		85		115		120		115	
Предложенные нами конструкции с теплоизоляцией. Условный тип П-Б-3										
Песок мелкий $h_{\text{з}}$	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25
Толщина одежды $H_{\text{до}}$	80	85	80	85	80	85	80	85	80	85

Примечание: $h_{дс}$ — толщина дополнительного слоя дорожной одежды, см; $h_з$ — толщина защитного слоя, см.

Таблица 4

Толщины слоев конструкций для улиц местного значения

Параметры дорожной одежды	Песок пылеватый		Супесь легкая		Суглинок легкий		Суглинок тяжелый пылеватый		Глина	
Традиционные конструкции по Альбому А-385–88. Тип Г-3										
Песок мелкий $h_{\text{дс}}$	55		45		75		80		75	
Толщина одежды $H_{\text{тр}}$	89		79		109		114		109	
Предложенные нами конструкции с теплоизоляцией. Условный тип П-Г-3										
Песок мелкий $h_{\text{з}}$	20	25	20	25	20	25	20	25	20	25
Итого толщина одежды $H_{\text{до}}$	69	74	69	74	69	74	69	74	69	74

Примечание: $h_{дс}$ — толщина дополнительного слоя дорожной одежды, см; $h_з$ — толщина защитного слоя, см.

где $E_{тр}$ — требуемый модуль упругости конструкции; $E_{общ}$ — общий модуль упругости конструкции.

Общий модуль упругости, приведенный Whiffin F. C. и др. [4], связывают с прогибом конструкции исходя из известного решения теории упругости для однородного полупространства. Таким образом, рассматривают максимальный прогиб не фактически многослойной дорожной одежды, а прогиб некой условной однородной, эквивалентной ей однородной конструкции. Из формулы (2), приведенной в ОДН 218.046–01, вытекает выражение (3):

$$\frac{l_{доп}}{l} = \frac{E_{общ}}{E_{тр}}, \quad (2)$$

где l — максимальный упругий прогиб дорожной одежды; $l_{доп}$ — предельно допускаемый упругий прогиб,

$$l_{доп} = f \left(\frac{1}{E_{тр}} \right). \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что, поскольку требуемый модуль упругости дорожных одежд капитального типа устанавливается в зависимости только от параметров нагрузки (давления на покрытие, размера отпечатка колеса и суммарного объема движения расчетных автомобилей за срок службы дорожной одежды), то и предельно допускаемый прогиб $l_{доп}$ дорожной одежды не зависит от ее конструкции и разновидности грунтов под ней. Отсюда следует, что:

1) все конструкции, рассчитанные на одну и ту же нагрузку, прогибы которых меньше $l_{доп}$, удовлетворяют критерию упругого прогиба независимо от конструкции дорожной одежды и разновидности грунта под ней;

2) все рассмотренные нами традиционные конструкции одного типа на различных грунтах, предназначенные для одной и той же категории дорог, прогибы которых меньше максимального прогиба L_{max} ($L_{max} \leq l_{доп}$) среди этих конструк-

ций, удовлетворяют критерию упругого прогиба и в этом смысле эквивалентны.

Исходя из изложенного, конструкция с теплоизоляцией эквивалентна по прочности традиционным конструкциям одного назначения и условий нагружения (одного типа), если ее прогиб по оси действия нагрузки не превышает максимальный упругий прогиб традиционной конструкции этого типа на любом из рассмотренных грунтов.

Исследование упругих прогибов

Авторы исследовали прогибы не условных эквивалентных дорожных одежд, приведенных к однородному полупространству, а прогибы реальных многослойных конструкций. Расчеты упругих прогибов как традиционных конструкций, так и предложенных конструкций с теплоизоляцией проводили по модели упругого слоистого полупространства с использованием программного комплекса, реализующего алгоритмы А. К. Приварникова [16].

Параметры движущейся нагрузки (диаметр отпечатка следа колеса 34 см для конструкций типов АС и П-АС и 39 см для остальных), характеристики материалов слоев покрытия и основания принимали по ОДН 218.046–01. Характеристики теплоизоляции ПЕНОПЛЭКС принимали по данным производителя.

Модули упругости грунтов для использования в расчетах определяли по методике ОДН 218.046–01. При назначении расчетной относительной влажности грунтов учитывали характерное для Санкт-Петербурга наличие сопутствующего дренажа и высокий уровень грунтовых вод в случае традиционных конструкций, а в случае конструкций с теплоизоляцией — отсутствие

фактора разуплотнения грунтов рабочего слоя земляного полотна вследствие предотвращения промерзания, что отмечается в [2].

Определенные нами вышеуказанным образом и принятые в дальнейших расчетах модули упругости грунтов приведены в табл. 5.

Результаты теоретических исследований упругих прогибов конструкций

В табл. 6–9 приведены определенные автором максимальные прогибы (в мм) верха покрытия по оси действия нагрузки рассмотренных традиционных дорожных одежд по Альбому А-385–88 и соответствующих им предложенных конструкций с теплоизоляцией на основе численного решения для многослойного упругого полупространства.

Из табл. 6 видно, что максимальный прогиб (0,87 мм) традиционной конструкции типа А-3 (без теплоизоляции) получен на суглинке тяжелом пылеватом. Таким образом, все предлагаемые конструкции П-А-3 с теплоизоляцией являются эквивалентными по прочности конструкциям А-3, так как их прогиб не превышает 0,87 мм. Следовательно, конструкция с плитами ПЕНОПЛЭКС с минимальными толщинами монтажного слоя песка (10 см) и защитного слоя песка между плитами и основанием дорожной одежды (20 см) пригодна для всех видов рассмотренных грунтов.

Не меняет полученного выше вывода то обстоятельство, что прогибы конструкций П-А-3 с плитами ПЕНОПЛЭКС для песка пылеватого, легкого суглинка и глины больше, чем соответствующих конструкций А-3 без теплоизоляции. Из табл. 6 видно, что последние имеют избыточ-

Таблица 5

Модули упругости грунтов, МПа

Грунты	Песок пылеватый	Супесь	Суглинок легкий	Суглинок тяжелый пылеватый	Глина
Традиционные конструкции без теплоизоляции по Альбому А-385–88	Расчетная влажность				
	0,76	0,74	0,80	0,85	0,80
	Модули упругости, МПа				
	60	44	29	27	29
Предложенные конструкции с использованием плит ПЕНОПЛЭКС	Расчетная влажность				
	0,75	0,70	0,75	0,75	0,75
	Модули упругости, МПа				
	60	49	34	38	34

ный запас по прогибу (прогибы их существенно меньше) по сравнению с конструкцией А-3 на суглинке тяжелом пылеватом, общий модуль упругости которой отвечает нормативным требованиям.

Результаты расчетов для конструкций магистральных улиц районного значения (Б-3 и П-Б-3) и улиц местного значения (Г-1 и П-Г-1) дали схожие результаты с конструкциями для магистральных дорог общегородского значения с той разницей, что для некоторых грунтов пришлось

увеличивать толщину защитного слоя над теплоизоляцией (см. табл. 7 и 8).

Конструкции для стоянок автомобильного транспорта (АС-1) рассчитаны на меньшую нагрузку, чем остальные. Из табл. 9 видно, что практически все конструкции с теплоизоляцией (П-АС-1) оказались эквивалентны по прочности конструкциям без теплоизоляции.

Выводы по результатам выполненных исследований прогибов предложенных конструкций с плитами ПЕНОПЛЭКС и рекомендации по использованию этих конструкций на различ-

Таблица 6

**Прогибы поверхности покрытия по оси нагрузки традиционных конструкций А-3
и предлагаемых П-А-3, мм**

Грунты	Песок пылеватый	Супесь	Суглинок легкий	Суглинок тяжелый пылеватый	Глина
Конструкции А-3	0,61	0,72	0,85	0,87	0,85
П-А-3, $H_{до} = 85$ см, $h_3 = 20$ см	0,65	0,72	0,87	0,82	0,87
П-А-3, $H_{до} = 90$ см, $h_3 = 25$ см	0,64	0,71	0,86	0,81	0,86

Примечание: $H_{до}$ — толщина дорожной одежды; h_3 — толщина защитного слоя из песка над теплоизоляцией.

Таблица 7

**Прогибы поверхности покрытия по оси нагрузки традиционных конструкций Б-3
и предлагаемых П-Б-3, мм**

Грунты	Песок пылеватый	Супесь	Суглинок легкий	Суглинок тяжелый пылеватый	Глина
Конструкции Б-3	0,66	0,78	0,90	0,92	0,90
П-Б-3, $H_{до} = 80$ см, $h_3 = 20$ см	0,71	0,78	0,94	0,89	0,94
П-Б-3, $H_{до} = 85$ см, $h_3 = 25$ см	0,70	0,77	0,93	0,87	0,93
П-Б-3, $H_{до} = 90$ см, $h_3 = 30$ см	0,69	0,76	0,91	0,86	0,91

Примечание: см. табл. 6.

Таблица 8

**Прогибы поверхности покрытия по оси нагрузки традиционных конструкций Г-1
и предлагаемых П-Г-1, мм**

Грунты	Песок пылеватый	Супесь	Суглинок легкий	Суглинок тяжелый пылеватый	Глина
Конструкции Г-1	0,66	0,78	0,90	0,92	0,90
П-Г-1, $H_{до} = 69$ см, $h_3 = 20$ см	0,85	0,93	1,10	1,04	1,10
П-Г-1, $H_{до} = 74$ см, $h_3 = 25$ см	0,84	0,91	1,08	1,02	1,08
П-Г-1, $H_{до} = 79$ см, $h_3 = 30$ см	0,83	0,90	1,06	1,00	1,06
П-Г-1, $H_{до} = 84$ см, $h_3 = 35$ см	0,82	0,89	1,04	1,00	1,04
П-Г-1, $H_{до} = 84$ см, $h_3 = 40$ см	0,81	0,88	1,02	0,97	1,02

Примечание: см. табл. 6.

Таблица 9

Прогибы поверхности покрытия по оси нагрузки традиционных конструкций АС и предлагаемых П-АС, мм

Грунты	Песок пылеватый	Супесь	Суглинок легкий	Суглинок тяжелый пылеватый	Глина
Конструкции АС	0,53	0,61	0,73	0,69	0,73
П-АС, $H_{до} = 69$ см, $h_3 = 20$ см	0,57	0,62	0,73	0,69	0,73

Примечание: см. табл. 6.

Таблица 10

Рекомендации по использованию предложенных конструкций с теплоизоляцией

Условный тип дорожной одежды с теплоизоляцией	Максимальный прогиб соответствующей традиционной конструкции без теплоизоляции L_{max} , мм	Толщина защитного слоя из песка над теплоизоляцией h_3 , см	Грунты, для которых удовлетворяется критерий упругого прогиба данного типа дорожной одежды с теплоизоляцией
П-А-3	0,87	20	Все рассмотренные грунты
П-Б-3	0,92	20	Песок пылеватый, супесь, суглинок тяжелый пылеватый
		30	Суглинок легкий, глина
П-Г-1	1,03	20	Песок пылеватый, супесь
		25	Суглинок тяжелый пылеватый
		40	Суглинок легкий, глина
П-АС	0,73	20	Все рассмотренные грунты

Примечания:

1. Толщины слоев покрытия и основания такие же, как в соответствующих типах традиционных дорожных одежд.
2. Толщина монтажного слоя под теплоизоляцией 10 см.

ных разновидностях грунтов земляного полотна представлены в табл. 10.

Библиографический список

1. Васильев С. И., Анферов В. Н., Мелкозеров В. М. Технология подготовки грунтов к разработке в зимний период при освоении полезных ископаемых Восточно-Сибирского региона. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 152 с.
2. Рувинский В. И. Пособие по устройству теплоизолирующих слоев из пенопласта Styrofoam на автомобильных дорогах России. М.: Транспорт, 2000. 71 с.
3. Радовский Б. С. Прогиб под центром подвижной нагрузки, действующей на вязкоупругое однородное полупространство // Вопросы расчета и конструирования дорожных одежд: труды СоюзДорНИИ. М., 1979. С. 17–26.
4. Whiffin F. C., Liste N. W. The application of elastic theory to flexible pavements / Proceedings of the First International Conference on Asphalt Pavements. The University of Michigan, 1962, pp. 499–521.
5. Смирнов А. В. Расчет дорожных конструкций автомагистралей на прочность и выносливость. Омск: СибАДИ, 2012. 116 с.
6. Вайнштейн Е. В., Вайнштейн В. М., Нехорошков П. А. Исследование изменения касательных напряжений и вертикальных перемещений от лесовозного автопоезда в конструкции дорожной одежды и земляного полотна // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона» № 4 (часть 2), 2012. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1399> (дата обращения: 01.07.2019).
7. Черепанов Б. М., Бодосова Т. С., Моисеева О. Л., Хоменко В. А., Казанцев В. Г. Оценка несущей способности дорожных конструкций эксплуатируемых автомобильных дорог в грунтовых условиях Алтайского края // Ползуновский вестник. 2012. № 1–2. С. 143–149.
8. Мошенжал А. В. Совершенствование проектирования дорожных одежд с конструктивными слоями из малосвязных грунтов, армированных геосинтетическими материалами: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11. Хабаровск, 2016. 155 с.

9. Сухоруков А. В. Обоснование региональных расчетных значений характеристик глинистых грунтов для проектирования дорожных одежд в условиях Западной Сибири: дис. ... канд. техн. наук.: 05.23.11. Томск, 2017. 166 с.

10. Тиратуриян А. Н., Бодров И. В., Симакова А. А., Фарниева М. В. Экспериментальные исследования рассеивания энергии в структуре дорожной конструкции при ударном нагружении // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2018. № 4. URL: <https://t-s.today/PDF/13SATS418.pdf> (доступ свободный). DOI: 10.15862/13SATS418

11. Alavi S., Lecates J. F., Tavares M. P. Falling Weight Deflectometer Usage, National cooperative Highway Research Program, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, WASHINGTON, D.C. 2008.

12. Roesset J. M. Nondestructive Dynamic Testing of Soils and Pavements. Tamkang Journal of Science and Engineering, 1998. Vol. 1, no. 2, pp. 61–81.

13. Яковлев Ю. М. Требуемые модули упругости для оценки прочности нежестких дорожных одежд на грунтах с повышенной влажностью // Строительство и эксплуатация автомобильных дорог: сб. науч. тр. М.: МАДИ, 1977. С. 36–40.

14. Кузнецов Ю. В., Мордвин С. С. Динамика изменения прочности нежестких дорожных одежд в осенне-весенний период // Проектирование автомобильных дорог: сб. науч. тр. М.: МАДИ (ГТУ), 2009. С. 174–182.

15. Марков И. А., Мерзликин А. Е., Яковлев Ю. М. К вопросу о требуемых модулях упругости нежестких дорожных одежд // Вопросы расчета и конструирования дорожных одежд: тр. СоюзДорНИИ. М., 1979. С. 99–104.

16. Приварников А. К., Ламзюк В. Д. Упругие многослойные основания. Днепрпетровск: Днепрпетровский университет, 1985. 162 с.

References

1. Vasil'ev S. I., Anferov V. N., Melkozerov V. M. *Tekhnologiya podgotovki gruntov k razrabotke v zimniy period pri osvoenii poleznykh iskopaemykh Vostochno-Sibirskogo regiona* [Technology of soil preparation for the winter period works in the development of minerals of the East Siberian region]. Krasnoyarsk, Sib. Fed. University Publ., 2012, 152 p.

2. Ruvinskiy V. I. *Posobie po ustroystvu teploizoliruyushchikh sloev iz penoplasta Styrofoam na avtomobil'nykh dorogakh Rossii* [Guidance instruction on design of Styrofoam polystyrene insulation layers on the motor roads of Russia]. Moscow, Transport Publ., 2000, 71 p.

3. Radovskiy B. S. *Progib pod tsentrom podvizhnoy nagruzki, deystvuyushchey na vyazkouprugoe odnorodnoe poluprostranstvo* [Deflection under the center of the mobile load acting on a viscoelastic homogeneous half-space]. *Trudy SoyuzdorNII «Voprosy rascheta i konstruirovaniya dorozhnykh odezhd»* [Proc. of SoyuzdorNII "Problems of calculation and construction of road clothes"]. Moscow, SoyuzDorNII Publ., 1979, pp. 17–26.

4. Whiffin F.C., Liste N.W. *The application of elastic theory to flexible pavements*. Proceedings of the First International Conference on Asphalt Pavements. The University of Michigan Publ., 1962, pp. 499–521.

5. Smirnov A. V. *Raschet dorozhnykh konstruktсий avtomagistralei na prochnost' i vynoslivost'* [Calculation of highway road structures for strength and endurance]. Omsk, SibADI Publ., 2012, 116 p.

6. Vaynshteyn E. V., Vaynshteyn V. M., Nekhoroshkov P. A. *Issledovanie izmeneniya kasatel'nykh napryazheniy i vertikal'nykh peremeshcheniy ot lesovoznogo avtopoezda v konstruktсии dorozhnoy odezhd i zemlyanogo polotna* [Investigation of changes in tangential stresses and vertical displacements from a timber truck train in the construction of road clothing and earthwork]. *Ehlektronnyy nauchnyy zhurnal «Inzhenernyy vestnik Dona» – Electronic scientific journal "Engineering Bulletin of the Don"*, no. 4 (Pt. 2), 2012. Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1399> (accessed: 01.07.2019).

7. Cherepanov B. M., et al. *Otsenka nesushchey sposobnosti dorozhnykh konstruktсий ehkspluatiruemykh avtomobil'nykh dorog v gruntovykh usloviyakh altayskogo kraia* [Assessment of the load-bearing capacity of road structures of operated highways in the ground conditions of the Altai territory]. *Polzunovskiy vestnik – Polzunovsky Bulletin*, 2012, no. 1–2, pp. 143–149.

8. Moshenzhal A. V. *Sovershenstvovanie proektirovaniya dorozhnykh odezhd s konstruktivnymi sloyami iz malosvyaznykh gruntov, armirovannykh geosinteticheskimi materialami. Diss. kand. tekhn. nauk* [Improvement of design of road clothes with constructive layers from the lowly cohesive soils reinforced with geosynthetic materials. PhD in Sci. Tech. diss.]. Khabarovsk, 2016, 155 p.

9. Sukhorukov A. V. *Obosnovanie regional'nykh raschetnykh znacheniy kharakteristik glinistykh gruntov dlya proektirovaniya dorozhnykh odezhd v usloviyakh Zapadnoy Sibiri. Diss. kand. tekhn. nauk* [Substantiation of regional calculation values of clay soil characteristics for designing road surfaces in Western Siberia. PhD in Sci. Tech. diss.]. Tomsk, 2017, 166 p.

10. Tiraturyan A. N., Bodrov I. V., Simakova A. A., Farnieva M. V. *Ehksperimental'nye issledovaniya rasseivaniya ehnergii v strukture dorozhnoy konstruktсии pri udarnom nagruzhении* [Experimental studies of energy dissipation in the structure of road construction

under shock loading]. *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya» – Internet journal “Transport Designs”*, 2018, no. 4. Available at: <https://t-s.today/PDF/13SATS418.pdf>

11. Alavi S., Lecates J. F., Tavares M. P. *Falling weight deflectometer usage, national cooperative highway research program*. Transportation Research Board, Washington, D.C. 2008.

12. Roeset J. M. Nondestructive Dynamic Testing of Soils and Pavements. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 1998, vol. 1, no. 2, pp. 61–81.

13. Yakovlev Yu. M. *Trebuemye moduli uprugosti dlya otsenki prochnosti nezhestkikh dorozhnykh odezhd na gruntakh s povyshennoy vlazhnost'yu* [Required elasticity modulus for assessing the strength of non-rigid road surfaces on soils with high humidity]. *Sb. nauch. tr. «Stroitel'stvo i ehkspluatatsiya avtomobil'nykh dorog»* [Coll. of sci. works “Construction and operation of roads”]. Moscow, MADI Publ., 1977, pp. 36–40.

14. Kuznetsov Yu. V., Mordvin S. S. *Dinamika izmeneniya prochnosti nezhestkikh dorozhnykh odezhd v osenne-vesenniy period* [Change dynamics of non-rigid road clothes strength in the autumn-spring period]. *Sb. nauch. tr. «Proektirovanie avtomobil'nykh dorog»* [Coll. of sci. works “Design of highways”]. Moscow, MADI (GTU) Publ., 2009, pp. 174–182.

15. Markov I. A., Merzlikin A. E., Yakovlev Yu. M. *K voprosu o trebuemykh modulyakh uprugosti nezhestkikh dorozhnykh odezhd* [To the issue of the required elasticity modules of non-rigid road clothes]. *Voprosy rascheta i konstruirovaniya dorozhnykh odezhd* [Issues of calculation and construction of road clothes]. *Trudy SoyuzdorNII* [Proc. of SoyuzdorNII]. Moscow, 1979, pp. 99–104.

16. Privarnikov A. K., Lamzyuk V. D. *Uprugie mnogosloynnye osnovaniya* [Elastic multilayer foundations]. Dnepropetrovsk, Dnipropetrovsk University Publ., 1985, 162 p.